

ИЗВЕСТИЯ

Гомельского государственного университета
имени Ф. Скорины

№ 6(135)

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.,
чл.-корр. НАН Беларуси
В.С. Смородин, д-р тех. наук, проф.
В.М. Хомич, д-р юрид. наук, проф.
О.Г. Шляхтова, ответственный секретарь

Члены редакционной коллегии по естественным наукам:

В.С. Аверин, д-р биол. наук, проф.
В.Ф. Багинский, д-р с.-х. наук, проф., член-корр.
НАН Беларуси
А. Баллестер-Болинше (Испания), д-р, проф. математики
Ван Сяо Фэн (Китай), д-р тех. наук, проф.
Го Вэньбинь (Китай), д-р физ.-мат. наук, проф.
В.П. Кудин, д-р тех. наук, проф.
А.А. Махнев (Россия), д-р физ.-мат. наук, проф.,
член-корр. РАН
В.В. Можаровский, д-р тех. наук, проф.
А.Н. Сердюков, д-р физ.-мат. наук, проф., член-
корр. НАН Беларуси
А.Н. Скиба, д-р физ.-мат. наук, проф.
Шэн Рикун (Китай), д-р тех. наук, проф.
Р. Эстебан Ромеро (Испания), д-р, проф. математики
АДРЕС РЕДАКЦИИ:
246028, Беларусь, Гомель, ул. Советская, 104,
Телефоны: +375 (232) 51-03-21
E-mail: vesti@gsu.by
Интернет-адрес: <http://vesti.gsu.by>

Francisk Skorina Gomel State University

PROCEEDINGS

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

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

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

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief S.A. KHAKHOMOV,
Sc. D., Docent of Physics
Deputy editor-in-chief 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,
Corresponding Member NASB
V.S. Smorodin, Sc. D., Professor
V.M. Homich, Sc. D., Professor
O.G. Shlyahova, executive secretary

Members of editorial board for the natural sciences

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

ИЗВЕСТИЯ

Гомельского государственного университета
имени Ф. Скорины

НАУЧНЫЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с 1999 г.
Выходит 6 раз в год

• 2022, № 6 (135) •

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ:

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

СОДЕРЖАНИЕ

Биология

Голубков В.В., Цуриков А.Г. Лишайники памятников истории: вред или польза?	5
Жерносеченко А.А., Исайкина Я.И., Лях Е.Г. Молекулярные особенности мезенхимальных стволовых клеток костного мозга и плаценты для хондрогенной дифференцировки клеток <i>in vitro</i>	9
Колесникович В.П. Подход к формированию проектного объекта, основанный на анализе природно-ресурсного комплекса республиканского ландшафтного заказника «Выдрица»	15
Литвинова Н.А. О местонахождениях редких видов растений Речицко-Сожской равнины (итоги полевых исследований в период с 2017 по 2021 гг.)	21
Макаренко Т.В., Пырх О.В., Хаданович А.В., Макаренко А.И. Мониторинг содержания соединений никеля и хрома в донных отложениях водоемов города Гомеля и прилегающих территорий	26
Матвеевков М.В. Детерминанты цитотоксических и фотосенсибилизирующих свойств экстрактов из лишайников в отношении опухолевой линии MCF-7	32
Никитина И.А. Влияние глутамата на энергетический метаболизм тимуса в условиях окислительного стресса, вызванного действием ионизирующего излучения и пероксинитрита	39
Потапенко А.М., Митин Н.В., Козлов А.К., Толкачева Н.В. Влияние длительного отсутствия рубок промежуточного пользования на состояние и устойчивость сосновых насаждений в дальней зоне чернобыльских выпадений	45
Протченко А.А., Галиновский Н.Г. К изучению сообществ жуужелиц (Coleoptera, Carabidae) некоторых прибрежных экосистем Гомельской области с разной степенью рекреационной нагрузки	50
Турчин Л.М. Новые сведения о лишайниках и близкородственных грибах на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника	56
Храмченкова О.М. Фотозащитные свойства экстрактов из плодовых тел макромицетов	61
Шумак С.В., Углянец А.В. Современный живой напочвенный покров в черноольшаниках Полесского государственного радиационно-экологического заповедника	66

ИНФОРМАТИКА

Долженко А.В., Осипенко Н.Б. <i>Разработка и использование голосового помощника на примере программного приложения «Омикрон»</i>	72
Козарь Р.В., Навроцкий А.А., Гуринович А.Б. <i>Распознавание медицинских изображений в задачах компьютерной диагностики</i>	77
Кончиц А.П., Сукач Е.И. <i>Моделирование динамики процесса воспроизводства популяции</i>	82

МАТЕМАТИКА

Бородич Р.В., Селькин М.В. <i>О пересечении A-допустимых не p-нильпотентных θ-подгрупп</i>	87
Жогаль С.П., Куксо А.М., Бочкарев Д.И., Поддубный А.А., Петрусевиц В.В. <i>Математическое моделирование подбора рецептуры состава гидрофобного профилактического</i>	92
Кемеш О.Н., Морозова И.М., Пантелеева Ж.И. <i>Неулучшаемость теоремы Дирихле в диофантовых приближениях в поле комплексных чисел</i>	97
Малинковский Ю.В. <i>О конструктивном описании времени обслуживания и входящего потока</i>	103

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Янцевич М.А. <i>Согласование патч-антенны для геолокации</i>	108
--	-----

ФИЗИКА

Емельянов В.В. <i>Повышение селективности травления нитрида кремния к диоксиду кремния субмикронных интегральных схем</i>	114
Емельянов В.А., Шершнева Е.Б., Никитюк Ю.В., Соколов С.И., Аушев А.Ю. <i>Оптимизация параметров лазерной двулучевой сварки кварцевого стекла с использованием метода планирования вычислительных экспериментов</i>	118
Лобанок М.В., Полонский Н.В., Козодоев С.В., Гайдук П.И. <i>Влияние термообработки на электрофизические характеристики контактов Pt к гетероструктурам SiC/Si</i>	124
Римский Г.С., Руткаускас А.В., Буневич М.А. <i>Электрические свойства твёрдых растворов $Ni_{1-x}M_xMnSb$ ($M = Ti, V, Cr$)</i>	130

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Соколов А.С. <i>Картографирование отложений сумской свиты в Гомельской области</i>	136
--	-----

ПЕРСОНАЛИИ

Скиба А.Н., Монахов В.С., Махнёв А.А., Сафонов В.Г., Васильев А.Ф., Жогаль С.П., Бородич Р.В. <i>Михаил Васильевич Селькин (к 75-летнему юбилею)</i>	138
--	-----

PROCEEDINGS

of Francisk Skorina Gomel State University

SCIENTIFIC, PRODUCTION AND PRACTICAL JOURNAL

Published since 1999

Released bimonthly

• 2022, № 6 (135) •

NATURAL SCIENCES:

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

• MATHEMATICS • PHYSICS

CONTENTS

BIOLOGY

Golubkov V.V., Tsurikov A.G. <i>Lichens of historical monuments: harm or benefit?</i>	5
Zhernosechenko A.A., Isaikina Ya.I., Liah E.G. <i>Molecular features of bone marrow and placenta mesenchymal stem cells for chondrogenic cell differentiation in vitro</i>	9
Kolesnikov V.P. <i>An approach to the formation of the project object, based on the analysis of the natural resource complex of the republican landscape reserve «Vydritsa»</i>	15
Litvinova N.A. <i>On the locations of rare plant species of the Rechitsko-Sozhskaya Plain (results of field research in the period from 2017 to 2021)</i>	21
Makarenko T.V., Pyrh O.V., Hadanovich A.V., Makarenko A.I. <i>Monitoring of content of nickel and chromium compounds in bottom sediments of reservoirs in the city of Gomel and adjacent territories</i>	26
Matveenko M.V. <i>Determinants of cytotoxic and photosensitizing properties of lichen extracts in relation to the tumor line MCF-7</i>	32
Nikitina I.A. <i>The effect of glutamate on the energy metabolism of the thymus under oxidative stress caused by exposure to ionizing radiation and peroxyxynitrite</i>	39
Potapenko A.M., Mitin N.V., Kozlov A.K., Tolkacheva N.V. <i>Influence of long-term absence of intermediate fellings on the condition and stability of pine stands in the far zone of Chernobyl fallout</i>	45
Protchenko A.A., Galinovsky N.G. <i>To the study of communities of ground beetles (Coleoptera, Carabidae) of some coastal ecosystems of the Gomel region with different degrees of recreational load</i>	50
Turchin L.M. <i>New data on lichens and closely related fungi on the territory of the Polesye State Radiation and Ecological Reserve</i>	56
Khramchankova V.M. <i>Photoprotective properties of extracts from the macromycetes fruiting bodies</i>	61
Shumak S.V., Uglianets A.V. <i>Modern living ground cover in the black alder forests of the Polesye State Radiation and Ecological Reserve</i>	66

INFORMATION TECHNOLOGY

Dolzhenok A.V., Osipenko N.B. <i>Development and use of a voice assistant on the example of the Omicron software application</i>	72
Kozar R.V., Naurotsky A.A., Gourinovitch A.B. <i>Recognition of medical images in computer diagnostics tasks</i>	77

Konchits A.P., Sukach E.I. <i>Modeling the dynamics of the population reproduction process..</i>	82
--	----

MATHEMATICS

Borodich R.V., Selkin M.V. <i>On the intersection of A-admissible non- p -nilpotent θ-subgroups</i>	87
Zhogal S.P., Kukso A.M., Bochkarev D.I., Poddubny A.A., Petrusevich V.V. <i>Mathematical modeling of recipe selection composition of hydrophobic preventive</i>	92
Kemesh O.N., Morozova I.M., Panteleeva Zh.I. <i>Unimprovability of Dirichlet's theorem in Diophantine approximation in the field of complex numbers.....</i>	97
Malinkovsky Yu.V. <i>On constructive description of service time and incoming flow</i>	103

RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATIONS

Yantsevich M.A. <i>Geolocation Patch-Antenna Matching</i>	108
---	-----

PHYSICS

Emelyanov V.V. <i>Improving the selectivity of silicon nitride to silicon dioxide etching of submicron integrated circuits.....</i>	114
Emelyanov V.A., Shershnev E.B., Nikitiuk Yu.V., Sokolov S.I., Aushev A.Yu. <i>Optimization of the parameters of laser double-beam welding of quartz glass using the method of planning computational experiments</i>	118
Lobanok M.B., Polonsky N.V., Kozodoev S.V., Gaiduk P.I. <i>Effect of heat treatment on the electrical characteristics of Pt contacts to SiC/Si heterostructures.....</i>	124
Rimsky G.S., Rutkauskas A.V., Bunevich M.A. <i>Electrical properties of solid solutions $Ni_{1-x}M_xMnSb$ ($M = Ti, V, Cr$).....</i>	130

ABSTRACTS

Sokolov A.S. <i>Mapping of Sumy Formation deposits in the Gomel region.....</i>	136
---	-----

PERSONALITY

Skiba A.N., Monahov V.S., Mahnev A.A., Safonov V.G., Vasiliev A.F., Zhogal S.P., Borodich R.V. <i>Mikhail Vasilievich Selkin (to the 75th anniversary).....</i>	138
---	-----

Биология

УДК 57.063:58.29:904

Лишайники памятников истории: вред или польза?

В.В. ГОЛУБКОВ, А.Г. ЦУРИКОВ

Обзорная статья посвящена проблеме произрастания лишайников на различных архитектурных сооружениях. Показано, что исторические некрополи, церкви, монастыри, статуи, мегалитические памятники, фортификации часто являются антропогенно-природными комплексами, служащими местообитанием редких и охраняемых видов растений и криптогамных организмов. В качестве примера приведены результаты изучения лишайнобиоты фортов Гродненской крепости 1887–1915 гг. Показано, решение об устранении биокolonизаторов архитектурных памятников должно приниматься только на основе доказанной их патогенности, в остальных же случаях следует ставить вопрос о сохранении биологического разнообразия.

Ключевые слова: криптогамы, биодетериорация, архитектурные памятники истории, форты Гродненской крепости, эпилиты.

The review article is devoted to the problem of lichen growth on various architectural structures. Many historical necropolises, churches, monasteries, statues, megalithic monuments, fortifications are often anthropogenic-natural complexes that serve as a habitat for rare and protected plant species and cryptogamic organisms. As an example, the results of modern lichen studies at the territories of the Grodno fortress forts (1887–1915) are given. The decision to eliminate biocolonizers of architectural monuments should be made only on the basis of their proven pathogenicity. In other cases, the issue of preserving biological diversity should be raised.

Keywords: cryptogams, biodeterioration, historical architectural monuments, forts of the Grodno fortress, saxicolous.

Начиная с античных времен одной из форм культурного наследия являлись различные архитектурные сооружения: некрополи, церкви, монастыри, статуи, мегалитические памятники, фортификации и др. Во многих случаях исходным материалом в их строительстве являлся каменистый субстрат (мрамор, гранит, песчаник, и др.), который с течением времени подвержен разрушению, в том числе и за счет поселения на его поверхности различных организмов, включая криптогамов (цианобактерий, водорослей, грибов, лишайников и мхов) [1]. Известно, что лишайники используют питательные вещества из воздуха и окружающей их влаги и могут существовать на бедных питательными веществами субстратах. Как правило, они являются плохими конкурентами, и, как многие другие криптогамные организмы, заселяют лишённые питательных веществ и труднодоступные для других организмов места обитания. При отсутствии естественных скальных обнажений многие лишайники заселяют искусственные каменистые субстраты, такие как кирпич, цемент и др. [2]–[4], часто разрастаясь и полностью покрывая их каменистые поверхности. При этом грибные гифы проникают не только в микротрещины, но и в сами минералы, в том числе в кварц. В результате образуются такие аутигенные минералы, как каолинит, монтмориллонит, галлуазит, гетит, ферригидрит, а также уэдделлит, уэвеллит и гумбольдтин [5]. По-видимому, проникновение лишайника внутрь каменистой породы является защитной стратегией для сохранения влажности в чрезвычайно сухой и ветреной среде, позволяя при этом сохранить доступ к достаточному количеству солнечного света [6]. Тем не менее, жизнедеятельность лишайников (как и некоторых других криптогамов) является причиной повреждения и разрушения (биодетериорации) различных архитектурных сооружений, на которых они поселяются и произрастают.

В 1990-х гг. проблемы биодетериорации архитектурных памятников истории вышли на международный уровень [6]–[9]. В рамках сохранения европейского культурного наследия были поставлены задачи по решению проблем защиты древних архитектурных памятников и сооружений от действия биодетериогенов. С целью сохранения памятников архитектуры бы-

ли разработаны специальные рекомендации по способам и средствам борьбы с бактериями (бактерициды), грибами (фунгициды), водорослями (альгициды) и лишайниками (лихеноциды), произрастающими на их поверхностях [7], [10]–[13].

С другой стороны, необходимо отметить, что лишенобиота памятников истории, архитектурных и фортификационных сооружений всегда интересовала лишенологов [4], [14]–[18]. В Беларуси большое внимание к себе привлекли форты Гродненской крепости (ФГК), сооруженные в 1887–1915 гг. [19], [20], ставшие объектом изучения историков, археологов и ботаников. Предварительное их обследование в начале 2000-х позволило выявить такие редкие и охраняемые в Беларуси виды растений, как *Anemone sylvestris* L., *Asplenium trichomanes* L., *Polypodium vulgare* L., *Pulsatilla pratensis* (L.) Mill. [21]. Кроме того, на бетонных обломках 6 форта впервые для республики был найден лишайник *Collema subflaccidum* Degel., а также подтвержден вид *Scytinium lichenoides* (L.) Otálora, P.M. Jørg. & Wedin, считавшийся в Беларуси исчезнувшим [15], [22]–[24] и позднее включенный в Красную книгу РБ [21].

На Международной научной конференции, посвященной охраняемым природным территориям и объектам Белорусского Поозерья [25], впервые был поднят вопрос об изучении биоразнообразия ФГК как одного из перспективных природоохранных объектов Гродненской области. С целью сохранения ФГК отделом культуры Гродненского районного исполнительного комитета в 2008 г. этому объекту был присвоен статус историко-культурных ценностей. К этому времени на их территории было выявлено уже 80 видов лишайников, из которых *Scytinium lichenoides* был включен в Красную книгу РБ, а *Rhizocarpon geographicum* (L.) DC. – в «Список растений и грибов, нуждающихся в профилактической охране» [21]. 2 лишайника (*Collema subflacidum* и *Protoblastenia rupestris* (Scop.) J. Steiner) впервые были приведены для территории Беларуси [15], [26]. Таким образом, условия местообитаний и произрастаний антропогенно-природного комплекса 6, 7 и 8 фортов Гродненской крепости способствовали сохранению многочисленного богатства редких, очень редких и включенных в Красную книгу РБ видов растений, мхов и лишайников, среди которых были отмечены представители малоизученных и неизвестных видов для территории Беларуси. С целью их сохранения 6, 7 и 8 фортов Гродненской крепости было предложено взять под охрану [15], [24]. Придание охрannого статуса старым фортификационным сооружениям было предложено также по результатам бриологических исследований этих объектов. В частности, было выявлено 28 редких и очень редких видов мхов, из которых 3 были включены в Красную книгу и Беларуси, 3 обладали охранным статусом на европейском уровне [27].

Дальнейшее изучение видового состава лишайников ФГК позволило выявить дополнительно еще 13 ранее неизвестных, редких или слабо изученных на территории республики видов лишайников (*Acarospora intermedia* H. Magn., *Cladonia pocillum* (Ach.) O.J. Rich., *Dermatocarpon miniatum* (L.) W. Mann., *Diploschistes muscorum* (Scop.) R. Sant., *Placidium squamulosum* (Ach.) Breuss, *Placynthium nigrum* (Huds.) Gray, *Rhizocarpon lavatum* (Fr.) Hazsl., *Rhizocarpon lecanorinum* Anders, *Rhizocarpon petraeum* (Wulfen) A. Massal., *Sarcogyne hypophaea* (Nyl.) Arnold, *Sarcogyne hypophaeoides* Vain. ex H. Magn., *Staurothele drummondii* (Tuck.) Tuck., *Umbilicaria deusta* (L.) Baumg.) [16]–[18], [28]–[31]. Таким образом, из 96 видов лишайников ФГК 38 оказались эпилитами, из которых 23 вида были представлены редкими облигатными кальцефилами.

Обозначенная ранее проблема повреждения и разрушения лишайниками и другими криптогамами различных архитектурных и фортификационных сооружений привела к необходимости дополнительных исследований видового состава колонизирующих их организмов. В итоге старые ФГК оказались местообитаниями и «хранилищами» редких и включенных в Красную книгу РБ. Компенсируя отсутствие выходов на поверхность твердых горных известковых пород на равнинной территории Беларуси, форты сконцентрировали группу очень редких и краснокнижных кальцефилов, редко встречающихся на территории республики. Проблема сохранения биоразнообразия на памятниках истории была отмечена и в некоторых европейских странах. В Нидерландах на 54 изученных мегалитических памятниках было выявлено 128 различных видов лишайников, 27 из которых оказались представителями Красной книги. Также было отмечено, что памятники были (а некоторые до сих пор остаются) важными местообитаниями не только лишайников, но и редких краснокнижных мхов (*Andreaea rothii* F. Weber & D. Mohr, *A. rupestris* Hedwig). В результате в настоящее время все эти сооружения в Нидерландах охраняются как заповедники. Однако в повседневной практике такая защита означает лишь то, что памятники не демонтируются [4].

В работах [17], [23], [24], [27], [32] показано, что изучение организмов на старых исторических памятниках и фортификационных сооружениях способствует увеличению биологического разнообразия территорий и сохранению местообитаний редких и краснокнижных видов. К примеру, на граните голландского памятника был отмечен редкий случай произрастания эпифитного вида *Punctelia jeckeri* (Roum.) Kalb., ранее не отмечавшегося в этой стране [4]. Очевидно, что решение об устранении биокolonизаторов архитектурных памятников должно приниматься только на основе доказанной их патогенности, в остальных же случаях следует ставить вопрос о сохранении биологического разнообразия.

Изучение эпилитных лишайников древних и старых исторических памятников культуры, средневековых крепостей и фортификаций позволило выявить «две стороны одной медали» – вред и пользу. Уклоняясь от конкуренции и выбирая подходящие условия для существования эпилитные лишайники, как и некоторые другие криптогамы, колонизировали различные древние сооружения, впоследствии вызывая биологическую деградацию. С другой стороны, на территории равнинных стран с отсутствующими выходами на поверхность твердых известняковых горных пород древние сооружения оказались единственным доступным субстратом для очень редких горных кальцефилов и видов, включенных в Красные книги и Красные списки, являющихся важной частью биологического разнообразия этих стран. Таким образом, антропогенная трансформация ландшафтов способствовала не только исчезновению и уменьшению численности аборигенных видов, но и, как показали исследования, создала условия для появления и сохранения новых и редких лишайников и бриофитов. Исходя из вышесказанного, следует, что биоразнообразие очень редких и включенных в Красную книгу РБ кальцефилов, встречающихся на территории республики, должно быть обеспечено условиями, необходимыми для их охраны, позволяющими им длительное существование и сохранение в наше время.

Литература

1. Indagini microanalitiche e microbiologiche di patine e croste presenti su pietre calcaree e marmi esposti all'aerosol marino e all'inquinamento atmosferico / F. Zezza [et al.] // La pulitura delle superfici dell'architettura : Atti del convegno di studi, Bressanone, 3–6 luglio 1995 / G. Biscontin [ed.]. – Padova, 1995. – P. 293–303.
2. Checklist van de Nederlandse lichenen en lichenicole fungi / A. Aptroot [et al.] // Buxbaumia. – 1999. – Vol. 50, № 1. – P. 4–64.
3. Aptroot, A. Monitoring lichens on monuments / A. Aptroot, P. W. James // Monitoring with Lichens – Monitoring Lichens / P. L. Nimis, C. Scheidegger, P. A. Wolseley [eds.]. – Springer, 2002. – P. 235–249.
4. Sparrius, L. B. Changes in the lichen flora of megalithic monuments in the Netherlands / L. B. Sparrius, A. Aptroot // Bibliotheca Lichenologica. – 2003. – Vol. 86. – P. 441–452.
5. The role of lichens in the weathering of granitic buildings / M. Del Monte [et al.] // Degradation and conservation of granitic rocks in monuments : Proceedings of the EC workshop held in Santiago de Compostela (Spain) on 28–30 November 1994 / M. A. Vicente Hernández, J. Delgado-Rodriguez, J. Acevedo [eds.]. – Brussels, 1996. – P. 301–306.
6. Ariño, X. Biological diversity and cultural heritage / X. Ariño, C. Saiz-Jimenez // Aerobiologia. – 1996. – Vol. 12. – P. 279–282.
7. Schnabel, L. The treatment of biological growths on stone : a conservator's viewpoint / L. Schnabel // International Biodeterioration. – 1991. – Vol. 28. – P. 125–131.
8. Nimis, P. L. Studies on the biodeterioration potential of lichens, with particular reference to endolithic forms / P. L. Nimis, M. Tretiach // Interactive physical weathering and bioreceptivity study on building stones, monitored by Computerized X-ray Tomography (CT) as a potential non-destructive research tool. Environment ; Protection and Conservation of European Cultural Heritage, Research Report 2 / M. De Cleene [ed.]. – Brussels, 1996. – P. 63–122.
9. Bartoli, A. The lichens of the Munazio Planco's Mausoleum (Gaeta) / A. Bartoli, G. Massari, S. Ravera // Progress and Problems in Lichenology in the Nineties. Book of abstracts, The third IAL symposium, Salzburg, 1–7 September 1996. – Salzburg, 1996. – P. 145.
10. Il controllo del degrado biologico. I biocidi nel restauro dei materiali lapidei / G. Caneva [et al.]. – Fiesole : Nardini, 1996. – 200 p.
11. Biodeterioration of cultural heritage: some case studies / K. L. Garg [et al.] // Conservation preservation and restoration : traditions, trends and techniques / G. Kamalakkar, V. Pandit Rao, M. Veerender [eds.]. – Hyderabad : Birla Archaeological & Cultural Research Institute (BACRI), 1995. – P. 31–38.
12. Piervittori, R. Literature on lichens and biodeterioration of stonework III / R. Piervittori, O. Salvadori, D. Isocrono // Lichenologist. – 1998. – Vol. 30, № 3. – P. 263–277.

13. Kozarski, P. Współczesne metody i techniki konserwatorskie zwiększające wartość użytkową budowli i terenów pofortecznych / P. Kozarski // Fortyfikacja. – 1999. – Vol. 9. – P. 1–74.
14. Малышева, Н. В. Лишайники Санкт-Петербурга / Н. В. Малышева. – СПб. : Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2003. – 100 с.
15. Голубков, В. В. Шестой форт Гродненской крепости как один из перспективных и рекомендуемых природоохранных объектов Гродненской области / В. В. Голубков, Е. Е. Блудов // Охраняемые природные территории и объекты Белорусского Поозерья : современное состояние, перспективы развития : II Междунар. науч. конф., 13–14 декабря 2005 г. : тез. докл. ; редкол.: А. М. Дорофеев (отв. ред.) [и др.]. – Витебск : Издательство ВГУ, 2005. – С. 60–61.
16. Голубков, В. В. Новые местонахождения редких и «краснокнижных» лишайников из Беларуси / В. В. Голубков // Актуальные проблемы изучения и сохранения фито- и микобиоты : сб. ст. II Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 12–14 нояб. 2013 г. ; редкол.: В. В. Лысак [и др.]. – Минск, 2013. – С. 188–190.
17. Голубков, В. В. Созологический анализ, исследование и сохранение лишайнобиоты на особо охраняемых природных территориях Беларуси / В. В. Голубков // Современное состояние, тенденции развития, рациональное использование и сохранение биологического разнообразия растительного мира : материалы Междунар. науч. конф., Минск – Нарочь, 23–26 сентября 2014 г. ; редкол.: А. В. Пугачевский (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Экоперспектива, 2014. – С. 309–313.
18. Яцына, А. П. Новые и интересные находки лишайников и лишайофильного гриба в Беларуси / А. П. Яцына // Веснік ВДУ. – 2013. – № 3 (75). – С. 62–67.
19. Пивоварчик, С. А. Проблемы изучения и использования фортификационного наследия XIX – начала XX века в Беларуси / С. А. Пивоварчик // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. – 2005. – № 3. – С. 21–28.
20. Пивоварчик, С. А. Белорусские земли в системе фортификационного строительства Российской империи и СССР (1772–1941) / С. А. Пивоварчик. – Гродно : ГрГУ, 2006. – 252 с.
21. Красная книга Республики Беларусь : Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды дикорастущих растений / М-во природных ресурсов и охраны окружающей среды, НАН Беларуси ; редкол.: Л. И. Хоружик [и др.]. – Минск : БелЭн, 2005. – 456 с.
22. Bachmann, E. Litauische Flechten / E. Bachmann, F. Bachmann // Hedwigia. – 1920. – Vol. 61, № 6. – P. 308–342.
23. Голубков, В. В. Некоторые особенности биоразнообразия лишайнобиоты трансформированных природных ландшафтов г. Гродно и его окрестностей / В. В. Голубков // Современные направления деятельности ботанических садов и держателей ботанических коллекций по сохранению биоразнообразия растительного мира : матер. Междунар. науч. конф., посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.В. Смольского, Минск, 27–29 сентября 2005 г. ; редкол.: В. Н. Решетников (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Эдит ВВ, 2005. – С. 202–204.
24. Голубков, В. В. Флора лишайников Беларуси : состояние изученности и перспективы исследований / В. В. Голубков // Флора лишайников России : Состояние и перспективы исследований : труды международного совещания, посвященного 120-летию со дня рождения Всеволода Павловича Савича, Санкт-Петербург, 24–27 октября 2006 г. – СПб., 2006. – С. 76–79.
25. Охраняемые природные территории и объекты Белорусского Поозерья : современное состояние, перспективы развития : II Междунар. науч. конф., 13–14 декабря 2005 г. : тезисы докладов ; редкол.: А. М. Дорофеев (отв. ред.) [и др.]. – Витебск : Издательство ВГУ, 2005. – 200 с.
26. Голубков, В. В. Дополнение к лишайофлоре Березинского биосферного заповедника / В. В. Голубков, П. Н. Белый // Ботаника (исследования). – 2021. – Вып. 41. – С. 84–98.
27. Sakovich, A. Comparative analysis of the bryophyte floras of northwest Belarus concrete fortification and the Carpathians / A. Sakovich, G. Rykovsky // Biodiv. Res. Conserv. – 2011. – Vol. 24. – P. 23–27.
28. Цуриков, А. Г. Ревизия лишайников группы видов *Cladonia pyxidata* в Беларуси / А. Г. Цуриков, В. В. Голубков, Н. В. Цурикова // Веснік Віцебскага дзяржаўнага ўніверсітэта. – 2015. – № 2–3. – С. 47–52.
29. Golubkov, V. V. Some new records of *Rhizocarpon* from North-Eastern Poland and NorthWestern Belarus / V. V. Golubkov, A. Matwiejuk // Acta Mycol. – 2009. – Vol. 44, № 2. – P. 201–210.
30. Yatsyna, A. New and noteworthy lichens to Belarus / A. Yatsyna, J. Motiejūnaitė // Both. Lith. – 2015. – Vol. 21, № 1. – P. 57–63.
31. Knudsen, K. Acarosporaceae of Belarus / K. Knudsen, J. Kocourková // Herzogia. – 2020. – Vol. 33, № 2. – P. 394–406.
32. Ariño, X. Biological diversity and cultural heritage / X. Ariño, C. Saiz-Jimenez // Aerobiologia. – 1996. – Vol. 12. – P. 279–282.

Молекулярные особенности мезенхимальных стволовых клеток костного мозга и плаценты для хондрогенной дифференцировки клеток *in vitro*

А.А. ЖЕРНОСЕЧЕНКО, Я.И. ИСАЙКИНА, Е.Г. ЛЯХ

Исследованы особенности хондрогенного потенциала мезенхимальных стволовых клеток (МСК) из костного мозга и плаценты. Результаты показали, что нативные МСК из разных источников отличаются по уровню экспрессии хондрогенных маркеров и ответу на факторы-индукторы хондрогенеза, поэтому для эффективной дифференцировки МСК необходим экспериментальный подбор этих факторов.

Ключевые слова: мезенхимальные стволовые клетки, хондрогенная дифференцировка.

The features of chondrogenic differentiation of mesenchymal stem cells (MSC) have been studied. The results showed that native MSC obtained from different tissues showed a different level of expression of chondrogenic markers. The different effectiveness of the use of differentiation factors confirms the need for experimental selection of inducing factors. Successful chondrogenic differentiation of MSCs requires a multivariate analysis of all conditions.

Keywords: mesenchymal stem cells, chondrogenic differentiation.

Введение. Суставной хрящ имеет низкие репаративные свойства из-за малого количества хондроцитов и отсутствия кровоснабжения, поэтому восстановление хрящевой ткани сталкивается с многочисленными проблемами. Артроскопическая санация, микроперелом, аутологичная или аллогенная трансплантация хряща – это прежде всего симптоматическое лечение и обезболивание, которые не способствуют регенерации поврежденной хрящевой ткани или уменьшению воспаления суставов. Кроме того, замещенная волокнистая хрящевая ткань отличается от натурального гиалинового хряща [1].

В связи с низкой эффективностью консервативного лечения патологий хрящевой ткани существует запрос на поиск альтернативных методов, и перспективной может являться клеточная терапия с использованием мезенхимальных стволовых клеток (МСК). Эти клетки могут быть увеличены *ex vivo* до клинически необходимого (значимого) количества и после экспансии способны сохранять хондрогенный потенциал.

МСК, выделенные из различных тканей, интенсивно изучаются и охарактеризованы многими исследовательскими группами [2]. На данный момент разработаны протоколы получения МСК из различных источников, в частности, из костного мозга, жировой ткани, плаценты, пуповинной крови, пульпы зуба, кожи и подкожной клетчатки, слюнных желез, менструальной крови, периферической крови и т. д. [3]. Тканевые источники МСК принято делить на взрослые (костный мозг, периферическая кровь, жировая ткань, лёгочная ткань и сердце и т. д.) и неонатальные (пуповинная кровь, амниотическая жидкость, плацента, плодные оболочки, пупочный канатик, Вартонов студень и т. д.) [4].

Для унификации характеристик МСК, полученных в разных лабораториях, и облегчения обмена данными между исследователями Международное общество клеточной терапии (The International Society for Cellular Therapy (ISCT)) в 2006 году предложило минимальные критерии для установления принадлежности клеток к МСК: наличие адгезивных свойств в стандартных условиях культивирования; экспрессия поверхностных молекул CD105, CD73 и CD90 и отсутствие экспрессии CD45, CD34, CD14 или CD11, CD79 или CD19 и HLA-DR; способность к дифференцировке в остеогенном, адипогенном и хондрогенном направлении *in vitro* [5].

В тоже время МСК, выделенные из различных тканей, могут отличаться потенциалом к дифференцировке [6].

В настоящее время многие группы исследователей экспериментально подбирают и оценивают эффективность различных ростовых факторов и их комбинаций для хондрогенной дифференцировки МСК. TGFβ является основным ростовым фактором для стимуляции хондрогенеза в условиях как *in vivo*, так и *in vitro*. В большинстве работ применяется комбинация TGFβ с другими цитокинами (IGF, BMP, FGF, дексаметазон и т. д.).

Целью нашего исследования было сравнение уровня экспрессии хондрогенных маркеров в недифференцированных МСК, полученных из костного мозга и плаценты, с целью выбора ис-

точника МСК для дальнейшего применения в репаративной медицине, а также оценка влияния различных условий индукции клеток на хондрогенную дифференцировку МСК костного мозга.

Объект и методы исследований. В качестве объекта исследований использовались культуры МСК, полученные из костного мозга (КМ-МСК) и из плаценты (П-МСК). Клетки в культурах обладали фенотипом, характерным для МСК (более 95 % клеток, экспрессирующих на своей поверхности CD90, CD105 и CD73 антигены и менее 2 % клеток, несущих CD45, CD14 и CD34 антигены).

Получение КМ-МСК. Для получения МСК моноклеарные клетки выделяли из проб костного мозга на гистопакет плотностью 1,077 г/мл (Sigma, США), отмывали в 0,9 %-ном NaCl (ОАО «Несвижский завод медицинских препаратов», Беларусь), ресуспендировали в IMDM (Life technologies, США) с 10 %-ной эмбриональной телячьей сывороткой FBS (Life technologies, США) и переносили в концентрации $2-3 \times 10^6$ /мл во флакон с площадью поверхности 25 см² (Sarstedt, Германия).

Получение П-МСК. МСК из ткани плаценты выделяли ферментативным способом. Фрагменты плаценты смешивали с 0,14 % раствором коллагеназы I (Stem Cell Technologies, Канада) в соотношении 1:1, инкубировали 30 минут при 37°C с последующей инактивацией фермента 10 % FBS (Sigma, США).

КМ-МСК (n=19) и П-МСК (n=11) инкубировали при +37°C и 5 % CO₂ со сменой среды через каждые 3–4 дня. При получении 80–90 % конфлюэнтного слоя МСК дезадгезировали 0,25 %-ным трипсином-ЭДТА (Sigma, США), отмывали в 0,9 % NaCl и переносили во флаконы 25 см² в количестве $0,5 \times 10^6$ для экспансии.

Дифференцировка КМ-МСК и П-МСК в хондрогенном направлении в 2D-культуре. Использовали МСК 2-го или 3-го пассажей, которые культивировали в среде DMEM, содержащей 10 нг/мл TGFβ3 или TGFβ1, 100 нг/мл IGF, 100 нМ дексаметазона, 1 % антибиотика, в течение 7–10 суток. Смену среды проводили на 3–4-й день.

Методом количественной полимеразной цепной реакции в реальном времени (ПЦР) определяли экспрессию генов *COL2*, *COL1*, *COL10*, *SOX9*, *AGG*, *COL11*, *COMP*, *VER* в образцах КМ-МСК (n = 19) и П-МСК (n = 11). Методом обратной транскрипции проводили синтез комплементарных цепочек ДНК, используя в качестве матрицы выделенную РНК, для чего 1 мкг РНК в концентрации 0,1 мкг/1 мкл воды денатурировали в течение 10 минут при 70°C. Затем аликвоту РНК, охлажденную на льду, вносили в смесь для обратной транскрипции (4 мкл 5 × – кратного буфера для обратной транскриптазы (Promega, США), 2 мкл 10 мМ смеси дезнуклеотидтрифосфатов, 1 мкл 50 мМ случайных праймеров (рэндом гексамеров) (Invitrogen, США), 0,5 мкл ингибитора рибонуклеаз в концентрации 40 Ед/мкл, 1 мкл 200 Ед/мкл обратной транскриптазы MMLV (Promega, США) и 1,5 мкл воды и инкубировали, используя программу: 20°C – 10 минут, 42°C – 45 минут, 99°C – 3 минуты. Разводили ДНК водой до конечного объема 50 мкл. В работе использовали праймеры к исследуемым генам. Дизайн праймеров осуществлялся с помощью онлайн-программ Primer3Plus® (<https://www.bioinformatics.nl/cgi-bin/primer3plus/primer3plus.cgi>) и PrimerBlast® (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/tools/primer-blast/>), таким образом, чтобы они отжигались в наиболее консервативных участках при температуре 60°C. В качестве контрольного гена использовали ген ABL и значение экспрессии генов рассчитывали как отношение экспрессии интересующих генов по отношению к контрольному гену ALB. В качестве флуоресцентного красителя использовали SYBR Green. Для приготовления реакционной смеси использовали набор QuantiTect SYBR Green PCR Kits (QIAGEN, США). ПЦР проводили как однокомпонентную реакцию (в каждой пробирке праймеры к одной мишени). Условия проведения реакции были следующими: 50°C – 2 мин, 95°C – 15 мин, 94°C – 15 сек, 60°C – 30 сек, 72°C – 30 сек. Анализ специфичности амплификации проверяли по кривым плавления.

Окраска на присутствие щелочной фосфатазы проводилась с использованием набора Alkaline Phosphatase (Sigma-Aldrich, США). К 1 мл Sodium Nitrite Solution добавляли 1 мл FPV-Alkaline Solution, ресуспендировали и оставляли на 2 минуты. Затем добавляли 45 мл дистиллированной воды и 1 мл Naphthol AS B1 Alkaline Solution. Фиксировали образцы КМ-МСК в течение 30 мин, промывали дистиллированной водой. Окрашивали образцы в течение 15 мин при 18–26 С в темноте. Промывали дистиллированной водой. Докрашивали гематоксилин-эозином.

Статистическая обработка данных проводилась с использованием программ «Statistica» («StatSoft», США, лицензионный номер продукта STA862D175437Q) и включала методы описательной статистики с определением медианы, 25 и 75 перцентилей, а также методы анализа

для непараметрического распределения: достоверность различий между независимыми выборками оценивали с помощью U-критерия Манна-Уитни. Для анализа зависимости между показателями применяли коэффициент корреляции Спирмана (Spearman Rank Order Correlations, r). При уровне значимости $p < 0,05$ различия показателей считались достоверными. На стадии планирования эксперимента было определено, что для получения мощности исследования равной 80 % (при $p < 0,05$) объем выборки должен составлять не менее 10 образцов.

Результаты исследования и обсуждение. Экспрессия генов-маркеров хондрогенеза в МСК. Была проанализирована экспрессия основных генов, отвечающих за программу хондрогенеза: в качестве маркеров гиалиноподобной хрящевой ткани исследовали гены *COL2A*, *COL11* и *SOX9*, маркера волокнистого хряща – *COL1*, маркера гипертрофии хондроцитов – *COL10* и маркеров синтеза протеогликанов – *AGG*, *COMP*, *VER*.

Нами установлено, что уровень экспрессии *COL1* в 2 раза, *SOX9* в 10 раз, *AGG* в 180 раз, *COMP* в 170 раз выше в КМ-МСК, чем в П-МСК. В свою очередь П-МСК более сильно экспрессируют *COL2* и *COL10*, уровень которых в 20 и в 90 раз соответственно выше, чем в КМ-МСК. Разница в экспрессии *COL11* и *VER* в обоих МСК не наблюдалась (таблица 1).

Таблица 1 – Относительный уровень экспрессии в недифференцированных КМ-МСК и П-МСК

Ген	КМ-МСК (n = 19)	П-МСК (n = 11)	P
	Уровень экспрессии, Ме (25 %; 75 %)	Уровень экспрессии, Ме (25 %; 75 %)	
<i>COL2</i>	0,0001 (0,0001–0,0005)	0,002 (0,001–0,004)	0,0002
<i>COL1</i>	386,68 (152,22–652,58)	193,34 (48,22–330,84)	0,025
<i>COL10</i>	0,001 (0,0004–0,01)	0,09 (0,02–0,21)	0,005
<i>SOX9</i>	0,31 (0,28–0,99)	0,03 (0,002–0,08)	0,00001
<i>AGG</i>	0,90 (0,33–2,19)	0,005 (0,003–0,02)	0,00001
<i>COL11</i>	0,01 (0,01–0,03)	0,02 (0,01–0,03)	0,76
<i>COMP</i>	1,38 (0,51–4,76)	0,01 (0,002–0,03)	0,000001
<i>VER</i>	6,59 (0,16–22,32)	3,66 (2,69–7,21)	0,55

Полученные нами данные частично согласуются с результатами исследований Е. Muñíos-López и соавт., которые проводили заселение носителя недифференцированных КМ-МСК и МСК, полученных из амниона плаценты. Через 8 недель с помощью иммуногистохимического анализа была проведена оценка уровней коллагенов II и I типов для обоих МСК, которая показала, что синтез коллагена II типа в МСК плацентарного происхождения выше, чем в КМ-МСК, тогда как КМ-МСК более активно синтезировали коллаген I типа [7].

В своем исследовании мы наблюдали для П-МСК высокую корреляцию экспрессии *COL2* с экспрессией *AGG* ($r = 0,8$; $p = 0,0004$), *COL11* ($r = 0,79$; $p = 0,002$), *COMP* ($r = 0,60$; $p = 0,029$), тогда как в КМ-МСК корреляция между экспрессией *COL2* и экспрессией аналогичных генов слабая: *AGG* ($r = 0,4$; $p = 0,045$), *COL11* ($r = 0,45$; $p = 0,03$) и *COMP* ($r = 0,54$; $p = 0,011$). Для КМ-МСК установлена положительная корреляция между уровнем экспрессии *COL2* и *COL10* ($r = 0,69$; $p = 0,0005$), которая отсутствовала в П-МСК, тогда как в П-МСК наблюдалась положительная взаимосвязь между *COL11* и *COL10* ($r = 0,66$; $p = 0,038$). Известно, что присутствие положительной корреляции между *COL2* (или *COL11*) и *COL10* является негативным моментом, так как способствует приобретению клетками гипертрофического фенотипа.

Проведенное нами исследование показало, что после преддифференцировки МСК в хондрогенном направлении в течение 7 суток в КМ-МСК отмечался по сравнению с П-МСК более высокий уровень экспрессии *COL1* в 4 раза, *SOX9* в 330 раз, *AGG* в 60 раз, *COMP* в 20 раз. В то же время достоверной разницы в экспрессии генов *COL2*, *COL10*, *COL11* и *VER* не наблюдалось (таблица 2)

Таблица 2 – Относительный уровень экспрессии генов-маркеров хондрогенеза в преддифференцированных КМ-МСК и П-МСК

Ген	КМ-МСК (n = 19)	П-МСК (n = 11)	P
	Уровень экспрессии, Ме (25 %; 75 %)	Уровень экспрессии, Ме (25 %; 75 %)	
<i>COL2</i>	0,002 (0,001–0,004)	0,001 (0,0003–0,02)	0,4761
<i>COL1</i>	32,90 (17,88–53,82)	8,63 (7,46–12,38)	0,0012
<i>COL10</i>	0,009 (0,002–0,06)	0,04 (0,02–0,05)	0,0644

Окончание таблицы 2

SOX9	0,66 (0,33–1,14)	0,002 (0,001–0,098)	0,00002
AGG	0,12 (0,06–0,71)	0,002 (0,0002–0,004)	0,00003
COL11	0,04 (0,03–0,11)	0,029 (0,017–0,033)	0,1731
COMP	0,49 (0,19–1,06)	0,025 (0,009–0,05)	0,0002
VER	1,50 (0,93–4,00)	1,11 (0,92–1,54)	0,4083

Таким образом, можно отметить различный профиль экспрессии генов в нативных МСК, полученных из различных источников. Имея различный первоначальный уровень экспрессии генов и их связей, воздействие ростовых факторов будет давать различные результаты после дифференцировки МСК в хондрогенном направлении, некоторые из которых были нами отмечены в более ранней работе [8].

Также различиями в экспрессии генов в нативных МСК и хондрогенно преддифференцированных МСК, полученных из различных источников, можно объяснить противоречивые результаты, полученные в исследованиях по оценке эффективности недифференцированных и преддифференцированных МСК в восстановлении хряща. Так, использование преддифференцированных в хондрогенном направлении КМ-МСК для репарации суставного хряща имеет преимущество перед недифференцированными МСК, так как сопровождается более активным синтезом коллагена II типа, сафранин О-положительных протеогликанов и заполнением дефектов суставной поверхности гиалиноподобной тканью [9]–[12]. С другой стороны, применение недифференцированных МСК перинатального происхождения приводило к более благоприятному восстановлению хряща, чем использование МСК после преддифференцировки в хондрогенном направлении [13].

Влияние ростовых факторов на хондрогенную преддифференцировку КМ-МСК.

При анализе хондрогенной дифференцировки КМ-МСК ($n = 3$) с применением различных комбинаций ростовых факторов (TGF β 1/IGF и TGF β 3/IGF) нами было отмечено, что на 4-е сутки дифференцировки при использовании TGF β 1/IGF наблюдается более интенсивный синтез щелочной фосфатазы по сравнению с TGF β 3/IGF. Тем не менее, на 7-е сутки нами не было выявлено разницы в синтезе данного фермента клетками при воздействии как TGF β 1/IGF, так и TGF β 3/IGF (рисунок 1). Объяснением может служить установленный факт, что МСК – гетерогенная популяция клеток, содержащая бипотентные стволовые клетки, 60–80 % из которых обладают остео-хондрогенным потенциалом [14]. Так как изомер TGF β 1 является индуктором как остеогенной, так и хондрогенной дифференцировки МСК [15], то при его применении в меньшем количестве клеток включается программа хондрогенеза, в отличие от изомера TGF β 3, который направлено стимулирует включение дифференцировки МСК по хондрогенному пути. Подобное заключение сделал по результатам своего исследования и F. Barry [16].

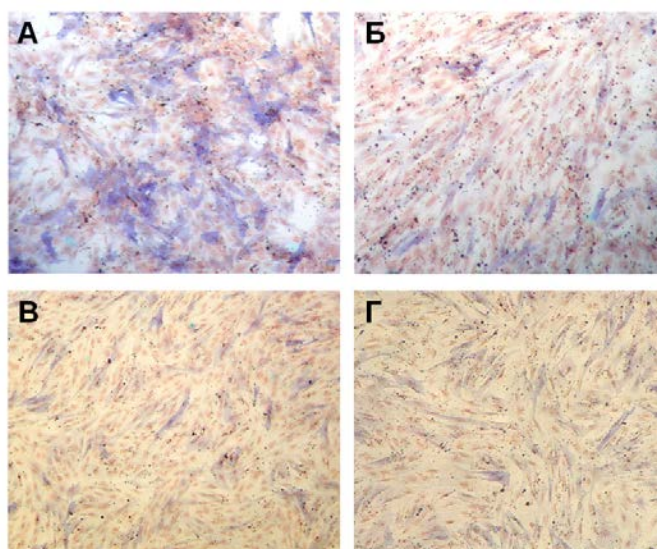


Рисунок 1 – Окраска на щелочную фосфатазу культуры КМ-МСК на 4-е (А, Б) и 7-е (В, Г) сутки хондрогенной дифференцировки при применении TGF β 1/IGF (А, В) и TGF β 3/IGF (Б, Г), ($\times 40$)

Морфология МСК при дифференцировке в 2D-системе. Реализация хондрогенной программы в МСК под влиянием TGF β /IGF в 2D-культуре характеризовалась изменением морфологии клеточной культуры. Так МСК, которые до начала дифференцировки представляли монослойную культуру (рисунок 2(А)), после воздействия индукторов хондрогенеза образовывали комплексы в форме очагов или сфероидов (рисунок 2 (Б)), как бы воссоздавая трехмерное микроокружение, подобное тем межклеточным взаимодействиям, которые наблюдаются на станции конденсации при эмбриональном развитии. Это также было отмечено G.R. Erickson и соавт. [17], но отрицалось T. Ruhl [18].

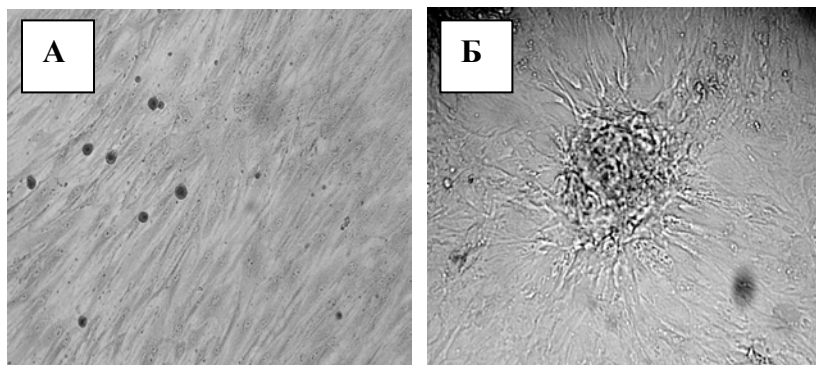


Рисунок 2 – Образование сфероидов в 2D-культуре МСК при хондрогенной дифференцировке ($\times 100$) (А – культура недифференцированных МСК; Б – культура МСК после хондрогенной дифференцировки)

Следует отметить, что в нашем эксперименте не удалось провести длительное культивирование КМ-МСК в 2D-культуре в присутствии ростовых факторов, так как, начиная с 9–10 суток, происходило «скручивание» («заплетание») и открепление монослойной культуры от пластика флакона (планшета) (рисунок 3). Причиной могло быть начало синтеза клетками белков матрикса и их секреции во внеклеточное пространство. В пользу данного предположения свидетельствуют результаты, полученные другими авторами, которые наблюдали секрецию клетками компонентов внеклеточного матрикса на 14-е сутки дифференцировки [19].

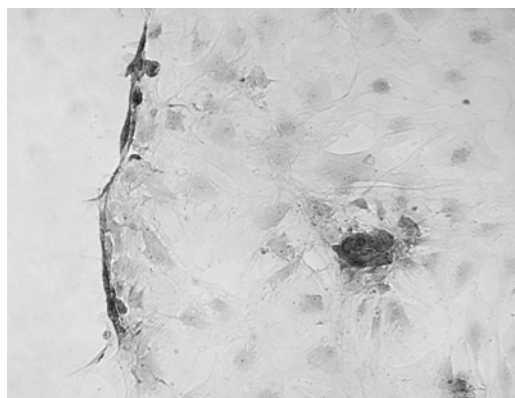


Рисунок 3 – Открепление 2D-культуры от поверхности флакона ($\times 100$)

Заключение. Полученные нами данные подтверждают различный профиль экспрессии генов-маркеров хондрогенеза в МСК, полученных из костного мозга и ткани плаценты, что требует разного подхода для использования клеток из этих источников для восстановления хрящевой ткани, а именно, проведения предварительной хондрогенной индукции МСК костного мозга в культуре с подбором ростовых факторов и продолжительности индукции до введения в дефект.

Литература

1. Application of mesenchymal stem cell therapy for the treatment of osteoarthritis of the knee : A concise review / A. T. Wang [et al.] // Review World J Stem Cells. – 2019. – Vol. 11, № 4. – P. 222–235.
2. Potential for osteogenic and chondrogenic differentiation of MSC / A. Lavrentieva [et al.] // Review Adv Biochem Eng Biotechnol. – 2013. – Vol. 129. – P. 73–88.

3. Isolation, cultivation, and characterization of human mesenchymal stem cells / D. Mushahary [et al.] // *Cytometry part A*. – 2018. – Vol. 93, № 1. – P. 19–31.
4. Шахпазян, Н. К. Мезенхимальные стволовые клетки из различных тканей человека : биологические свойства, оценка качества и безопасности для клинического применения / Н. К. Шахпазян, Т. А. Астрелина, М. В. Яковлева // *Гены & Клетки*. – 2012. – Т. 7, № 1. – С. 23–33.
5. Minimal criteria for defining multipotent mesenchymal stromal cells. The International Society for Cellular Therapy position statement / M. Dominici [et al.] // *Cytotherapy* – 2006. – Vol. 8, № 4. – P. 315–317.
6. Gene expression profile of mesenchymal stem cells from paired umbilical cord units : cord is different from blood / M. Secco [et al.] // *Stem Cell Rev.* – 2009. – Vol. 5. – P. 387–401.
7. Human Amniotic Mesenchymal Stromal Cells as Favorable Source for Cartilage Repair / E. Muiños-López [et al.] // *Tissue Engineering Part A*. – 2017. – Vol. 3, № 17-18. – P. 901–912.
8. Жерносеченко, А. А. Хондрогенный и остеогенный потенциал мезенхимальных стволовых клеток костного мозга и плаценты / А. А. Жерносеченко, Я. И. Исайкина, Т. В. Филипович, Е. Г. Лях // *Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. мед. наук*. – 2021. – Т. 18, № 1. – С. 36–44.
9. Matrix-Associated Implantation of Predifferentiated Mesenchymal Stem Cells Versus Articular Chondrocytes : In Vivo Results of Cartilage Repair After 1 Year / B. Marquass [et al.] // *The American journal of sports medicine*. – 2011. – Vol. 39, № 7. – P. 1401–1412.
10. Repair of chronic osteochondral defects using predifferentiated mesenchymal stem cells in an ovine model / M. Zscharnack [et al.] // *Am J Sports Med.* – 2010. – Vol. 38. – P. 1857–1869.
11. Articular Cartilage Repair with Mesenchymal Stem Cells After Chondrogenic Priming : A Pilot Study / T. D. Bornes [et al.] // *Tissue Eng Part A*. – 2018. – Vol. 24, № 9-10. – P. 761–774.
12. Аутоотрансплантация мезенхимальных стволовых клеток для регенеративного восстановления повреждений суставного хряща / Д. В. Букач, А. В. Белецкий [и др.] // *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя медыцынскіх навук*. – 2015. – № 1. – С. 5–11.
13. Comparison of Undifferentiated Versus Chondrogenic Predifferentiated Mesenchymal Stem Cells Derived From Human Umbilical Cord Blood for Cartilage Repair in a Rat Model / Y. B. Park [et al.] // *Am. J. Sports Med.* – 2019. – Vol. 47, № 2. – P. 451–461.
14. Muraglia, A. Clonal mesenchymal progenitors from human bone marrow differentiate in vitro according to a hierarchical model / A. Muraglia, R. Cancedda, R. Quarto // *J. Cell. Sci.* – 2000. – Vol. 113, pt. 7. – P. 1161–1166.
15. Osteogenic commitment of Wharton’s jelly mesenchymal stromal cells : mechanisms and implications for bioprocess development and clinical application [Electronic resource] / R. Cabrera-Pérez [et al.] // *Stem Cell Research a Therapy*. – 2019. – Vol. 10, № 1. – Mode of access : https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6883559/pdf/13287_2019_Article_1450.pdf. – Date of access : 10.02.2021.
16. Chondrogenic differentiation of mesenchymal stem cells from bone marrow : differentiation-dependent gene expression of matrix components / F. Barry [et al.] // *Experimental Cell Research*. – 2001. – Vol. 268, № 2. – P. 189–200.
17. Chondrogenic potential of adipose tissue-derived stromal cells in vitro and in vivo / G. R. Erickson [et al.] // *Biochem. a Biophys. Research Communications*. – 2002. – Vol. 290, № 2. – P. 763–769.
18. Ruhl, T. Quantification of chondrogenic differentiation in monolayer cultures of mesenchymal stromal cells [Electronic resource] / T. Ruhl, J. P. Beier // *Analytical Biochemistry*. – 2019. – Vol. 582. – Mode of access : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003269719301307?via%3Dihub>. – Date of access : 10.02.2021.
19. Improvement of the chondrocyte-specific phenotype upon equine bone marrow mesenchymal stem cell differentiation : influence of culture time, transforming growth factors and type I collagen siRNAs on the differentiation index [Electronic resource] / T. Branly [at al.] // *Intern. J. of Molecular Sciences*. – 2018. – Vol. 19, № 2. – Mode of access : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5855657/pdf/ijms-19-00435.pdf>. – Date of access : 10.02.2021.

УДК 574.633.21.502.5(476.5)

Подход к формированию проектного объекта, основанный на анализе природно-ресурсного комплекса республиканского ландшафтного заказника «Выдрица»

В.П. КОЛЕСНИКОВИЧ

В представленной статье предлагается подход, направленный на объединение на общей платформе описательной информации о «проектном объекте», ориентированной на эффективное информационное обеспечение исследовательских, природоохранных и природопользовательских задач. Изучается природно-ресурсный комплекс, особо охраняемая природная территория (ООПТ) республиканского ландшафтного заказника «Выдрица», где при проведении мероприятий по благоустройству ландшафтов утрачивает свои природные качества и приобретает облик частично урбанизированной. В результате выявлено, что снижение негативных последствий рекреационных нагрузок в ходе природоохранных мероприятий может быть достигнуто также за счет повышения рекреационной устойчивости территорий, путем создания «проектных объектов».

Ключевые слова: проектный объект, природно-ресурсный комплекс, туристско-рекреационный потенциал, сохранение биоразнообразия, ключевые признаки.

The submitted article proposes an approach aimed at combining on the overall description of the descriptive information about the «project object», focused on effective information support for research, environmental and primary tasks. The natural resource complex, a specially protected natural area (SPNA) of the republican landscape reserve «Vydritsa», is being studied, where, during landscape improvement activities, it loses its natural qualities and takes on the appearance of a partially urbanized one. As a result, it was found that reducing the negative effects of recreational loads during environmental protection measures can also be achieved by increasing the recreational stability of the territories by creating «project objects».

Keywords: project object, natural resource complex, tourism and recreational potential, conservation of biodiversity, key features.

Введение. Целью данной работы является решение комплекса отраслевых задач, связанных с изучением и сохранением биоразнообразия. Предлагается использование биоинформационного подхода к созданию проектного объекта как определенного итогового результата эволюции и интеграции принципиальных основ ландшафтного и экосистемного подходов.

Предполагается, что сохранение биоразнообразия может обеспечиваться комбинацией оригинальных и традиционных природоохранных путей, включающих охрану видов, популяций, экосистем, а также обоснование и организацию ООПТ различного ранга, учитывающих максимальную репрезентативность составляющих биоразнообразия проектного объекта.

Предлагаемый подход характеризуется комплексностью и высокой оперативностью картографического анализа, с целью создания отраслевых баз знаний с широким привлечением методов моделирования, модульным характером построения и исключительным разнообразием разрабатываемых продуктов и приложений [1]–[9].

Исследование проектного объекта проводится на примере республиканского заказника «Выдрица», включенного в национальную экологическую сеть, преобразование которого осуществлено согласно Постановления Совета Министров Республики Беларусь от 1 февраля 2020 г № 61 «О преобразовании республиканского заказника «Выдрица».

В связи с изменением границ, режимов охраны и использования, предполагается, что более подробное изучение данного «проектного объекта» может являться наиболее актуальным в современных условиях, а специфика предложенного исследования требует наиболее подробного изложения фактического материала с учетом анализа предметной области [1], [10]–[12], [7], [13], [14], [9].

Существенно, что целью преобразования заказника «Выдрица» (элемента национальной экологической сети: ядро национального значения N3 «Выдрица») общей площадью

17403,38 га, является сохранение в естественном состоянии уникального природного комплекса с популяциями редких и исчезающих, в том числе занесенных в Красную книгу Беларуси видов растений и животных.

При этом инвентаризация и мониторинг состояния биоразнообразия выполнены на основе существующего методического подхода, применяемого для наземных, водных и лесных экосистем. По результатам планируется разработка плана управления республиканским ландшафтным заказником «Выдрица», включающего мероприятия по формированию и функционированию элементов национальной экологической сети [14], [15], [16].

Уникальность избранного проектного объекта заключается в том, что республиканский государственный ландшафтный заказник «Выдрица» образован на территории крупных лугово-пойменных, старично-озерных, болотных, лесоболотных и лесных массивов, находящихся в долине реки Березина, расположенных на территории Жлобинского и Светлогорского административных районов Гомельской области в пространстве, заключенном между населенными пунктами Паричи–Дворище–Добровольща–Замен–Рынья–Плесовичи–Антоновка–Старина–Светлогорск–Паричи.

Материалы и методика исследований. В основной части работы описан биоэкологический потенциал исследуемой территории, с целью выделения природно-ресурсного потенциала проектного объекта и выделения специализированных рекреационных зон для отвлечения неорганизованного туризма от традиционных мест отдыха и вовлечения новых ресурсов в производство уникальных экотуристических услуг [2], [8].

Поскольку места концентрации организованных туристов в настоящее время выступают «ядрами» рекреационных зон, посещение заказника «Выдрица» традиционно связано с отраслевыми объектами: оборудованной для отдыха экотуристической базы «Уречье», расположенной у деревни Судовица, санаторий «Серебряные ключи», охотничья дача ГЛХУ «Светлогорский лесхоз».

Сформировавшиеся рекреационные территории включают земли интенсивного рекреационного использования (занятые круглогодичными и сезонными лечебно-оздоровительными и туристскими учреждениями) и сопутствующего рекреационного использования (рекреационные угодья: пляжи, леса, парки, поляны, опушки), где концентрируется основная часть отдыхающих.

На территории заказника выделено 5 естественных ландшафтов, представленных 12 природными урочищами с довольно сложной морфологической структурой.

1. Ландшафт пологоволнистых равнин основной (донной) морены представлен в виде небольших по площади выположенных повышений, рассеянных в виде островов в северной части территории заказника и приуроченных здесь к наиболее высоким гипсометрическим ступеням.

2. Ландшафт водно-ледниковой равнины – зандры получил наиболее широкое распространение на водораздельных пространствах заказника и смежных с ним обширных площадях незаметно сливающийся в южном направлении с древнеаллювиальными низинами Полесья. Наряду с преобладающим здесь плоским и слабоволнистым рельефом четко выражены древние ложбины стока и отдельные обширные понижения, в которых грунтовые воды подходят близко к дневной поверхности. В результате формируются два резко контрастно различающихся ландшафтных урочища – длинных слабополосых склонов со слабоврезанными ложбинами, а также глубоковрезанных ложбин и обширных понижений.

3. Ландшафт плоских озерно-ледниковых низин характеризует однородная морфологическая структура. Представленный одним урочищем, он приурочен к обширным озеровидным расширениям (на территории заказника площадью 150–200 га), находящихся в широких долинах Олы и Выдрицы. Существовавшие здесь в позднепоозерское время озерные бассейны были спущены этими реками. На днищах бывших озер в условиях избыточного постоянного увлажнения, создаваемыми жесткими грунтовыми водами, сформировались низинные болота с достаточно мощными торфяными горизонтами.

4. Надпойменные террасы, являясь неотъемлемыми элементами речной долины Березины, генетически и исторически связанные с ней, в то же время представляют достаточно автономное природное образование, растительный и особенно почвенный покров которого несет отчетливо выраженные признаки зональных черт.

5. Пойменные террасы представляют совершенно особый вид ландшафта, подверженный очень сильному воздействию природных факторов и находящийся в состоянии ярко выраженного развития и преобразования. Растительный и почвенный покров пойм отличается исключительной пестротой и динамичностью в пространстве и, следовательно, пойменный ландшафт характеризуется очень сложной морфологической структурой. В поймах имеются как наиболее молодые, только что образовавшиеся участки (прибрежные отмели, зарастающие водоемы), еще едва затронутые процессом почвообразования, так и участки относительно большого возраста, покрытые травяным покровом под вполне развитыми почвами.

Подавляющая часть заказника находится в пределах Стрешинской водноледниковой низины, относящейся к геоморфологической области равнины и низины Предполесья. Вдоль северной границы ее проходит линия предельного распространения Сожского ледника. На крайнем юго-востоке территории заказника расположена периферийная часть Речицкой аллювиальной низины области Полесской низменности. В непосредственной близости от заказника с севера примыкают пространства Центрально-Березинской равнины и Бобруйской водноледниковой равнины с краевыми ледниковыми образованиями, являющиеся составной частью области равнин и низин Предполесья, с юга – территории Озаричской моренно-ледниковой низины и озерно-аллювиальной низины, относящиеся к собственно Полесской низменности.

Гидрологические особенности проектного объекта уникальны тем, что территория заказника относится к Днепровскому гидрологическому бассейну, системе реки Березина. Гидрологическая сеть включает: главную р. Березину, ее левые притоки первого и второго порядка – р. Ола, р. Выдрица, старичные озера в пойме и болотные массивы на прилегающей территории.

Примечательно то, что в пойме р. Березины в границах заказника расположено более 26 старичных озер. Озера являются неотъемлемой частью пойменных ландшафтов, им принадлежит важная роль в формировании природного комплекса – в регулировании стока рек, процессах самоочищения воды, накоплении вещества в донных отложениях. Акватория и берега служат местом обитания богатой и разнообразной фауны и флоры. В то же время окружающая территория используется в качестве сельскохозяйственных угодий и мест отдыха. В старичных озерах сосредоточены большие запасы природных ресурсов: водных, биологических, растительных, животных, минеральных, рекреационных и информационных. Старичные озера имеют площадь от 0,001 до 0,2 км². Из всего разнообразия пойменных водоемов в пределах заказника «Выдрица» наиболее типичными являются оз. Белогорское и озеро без названия у д. Здудичи.

На исследуемой территории находятся обширные болотные угодья как один из основных гидрологических объектов на территории заказника, служащим естественным барьерным объектом, ограничивающим доступ и естественным способом снижающим антропогенную нагрузку на территории. На территории заказника в пределах Светлогорского и Жлобинского районов насчитывается 23 болотных массива, среди которых преобладают болота низинного типа, приуроченные к понижениям рельефа и поймам рек.

Территории заказника определяются его отношением к северной части подзоны широколиственных лесов на контакте с подзоной смешанных подтаежных лесов. Биотические комплексы здесь слагаются преимущественно широколиственно-лесными и таежными элементами флоры и фауны.

Поскольку основную часть этой территории занимают заболоченные леса и леса по болоту. В целом проектный объект представляет мозаичное сочетание пойменных, старично-озерных, долинно-речных, лесоболотных, лугово-болотных, болотных и лесных, большей частью заболоченных, частично мелиорированных природных комплексов, находящихся в водосборном бассейне р. Березины. Нередко встречаются фрагменты широколиственных лесов, в составе которых присутствуют дуб, ясень, липа, вяз (ильм), граб и клен. Весьма примечательным для этой территории является также сочетание лесоболотных и суходольных растительных комплексов, представленных насаждениями сосны, ели, ясеня, ольхи черной и дуба с довольно обильным подлеском и богатым напочвенным покровом, в составе которого встречается немало редких и исчезающих видов растений.

Установлено произрастание 670 видов сосудистых растений, относящихся к 355 роду, 99 семействам, 55 порядкам, 6 классам и 5 отделам. Среди них 5 видов плаунов. 6 видов

хвощей, 11 видов папоротникообразных, 3 вида голосеменных и 445 видов покрытосеменных (289 двудольных и 156 однодольных). По жизненным формам выявленные виды распределяются следующим образом: 31 дерево, 39 кустарников, кустарничков и полукустарников; 443 многолетних и 157 вид малолетних (однолетних и двулетних) травянистых растений.

Группа редких и исчезающих растений представлена следующими 14 видами, включенными в Красную книгу Республики Беларусь, на территории заказника выявлено 24 их конкретных местонахождения. При общей площади лесов заказника земли министерства лесного хозяйства занимают 83,6 % и колхозные леса – 16,4 %, при этом административным районам леса располагаются почти поровну.

Животный мир и фауна исследуемой территории предлагаемого проектного объекта, в соответствии с зоогеографическим районированием Беларуси, находится в восточном районе области елово-широколиственных лесов. В фаунистическом отношении область характеризуется значительным видовым разнообразием, так как в ней представлены виды, характерные как для европейского широколиственного леса, так и темнохвойного леса. Значительная площадь и породный состав лесов, наличие мелких и крупных контуров сельхозугодий, болот и кустарников, обширная пойма р. Березины создают разнообразный и по-своему уникальный биоценотический фон.

Из 12 видов земноводных Беларуси на территории заказника отмечены 10 видов, что составляет 83,3 % батрахофауны республики. Из 7 видов рептилий Беларуси в заказнике встречаются 6 видов, что составляет 85,7 %. При этом один вид – болотная черепаха – внесен в Красную книгу Беларуси, а гадюка обыкновенная является ресурсным видом. Доля мелких воробьиных орнитофауны заказника составляет 51,7 % (73 вида). На долю птиц других 15 отрядов приходится 48,3 % (69 видов). Из неворобьиных по количеству видов доминируют представители отряда ржанкообразные – 14 видов (кулики, чайки). Дневные хищные птицы представлены 11 видами, из них 4 являются редкими, охраняемыми и включены в Красную книгу Беларуси (скопа, пустельга, кобчик, чеглок).

Значительное количество видов птиц (24 вида) являются объектами спортивной охоты (ресурсные виды). Таким образом, в заказнике встречаются 142 вида птиц. В список видов не включены птицы пролетные, 4 вида гусей (гуменник, белолобый гусь, серый гусь и пискулька) – объекты спортивной охоты, которые на весенних пролетах в течение апреля в значительном количестве концентрируются на залитой пойме реки Березина.

Результаты исследований и их обсуждение. В результате приведенного выше детального исследования природно-ресурсного комплекса территории следует отметить, что необходимо создать эталонный проектный объект на изучаемой территории [1], [3].

Основной задачей создания проектного объекта является выделение ключевых признаков различных типов туристического пространства, с целью составления «ядра признаков», характеризующих выделенный проектный объект, а так же детального изучения природно-ресурсного комплекса для установления уникальных параметров территорий [11], [5], [17].

Основным способом территориальной трансформации должно стать развитие проектного объекта, основанное на линейно-мобильных формах рекреации (экскурсии и походы), с целью оптимального расширения спектра услуг и выделения специализированных рекреационных зон [2], [4], [6]–[9].

Рационально провести группирование заказников по степени туристско-рекреационной освоенности с выделением трех групп: с высоким, средним и низким уровнем туристско-рекреационной освоенности. Для каждого заказника целесообразно привести современную структуру видов туристско-рекреационной деятельности [1], [4], [8], [15].

Далее следует предметно рассмотреть социально-экономический потенциал, который в границах охраняемых территорий включаются земли 11 землевладельцев и категорий земель, крупнейшие из них Жлобинский и Светлогорский лесхозы (69 % общей площади).

Практически вся остальная территория находится во владении сельскохозяйственных предприятий. Автомобильная и железная дороги в границах полосы отвода, а также земли сельского совета и садоводческого товарищества, находящиеся внутри заказника, в него не включаются.

Радиоактивное загрязнение территории в результате аварии на ЧАЭС резко ухудшило экологическое состояние земель и условия хозяйствования на ней. Так, около 10 % земель

сельскохозяйственных предприятий Жлобинского района, включаемых в заказник, загрязнены радионуклидами и выведены из хозяйственного оборота. При этом в Светлогорском районе ситуация несколько лучше, что может служить темой отдельного исследования в обозначенном тематическом сегменте (радиационная генетика).

Сельскохозяйственная освоенность охраняемой территории весьма незначительна (только 7 %), как и распаханность сельскохозяйственных земель (11 %). Болота и кустарники занимают около 9 % площади, под водой – 0,5 %. То есть, природные составляющие ландшафта явно доминируют над антропогенными, что свидетельствует об экологической стабильности территории на фоне ее высокой естественной защищенности.

Поскольку туристско-рекреационная деятельность сконцентрирована преимущественно вдоль русла реки Березина и ее многочисленных старичных водоемов, с помощью функционального зонирования её влияние на природные комплексы и рекреационные угодья ограничить невозможно. Здесь поле деятельности специалистов по ландшафтной архитектуре, задача которых повысить устойчивость рекреационных угодий в местах отдыха [8].

Рассматриваемые рекреационные территории не имеют капитальных сооружений и существуют благодаря устойчивым рекреационным потокам в местах разрешенных стоянок. С помощью выделения альтернативных рекреационных угодий возможна переориентация самодетельного туристского потока и ликвидация этих опасных для природы рекреационных проектных объектов [6].

С целью обеспечения управления природопользованием данной территории на основе представленных данных целесообразно подготовить справочно-информационную систему отраслевых баз знаний, взяв за примеры «проектных объектов» заказники республиканского значения Республики Беларусь [7].

Таким образом, выделение рекреационной зоны и ее специализированных участков позволяет заложить основы диверсификации туристского обслуживания и территориально наметить основные приоритеты развития туристских функций для обоснования границ ООПТ различного ранга с целью их дальнейшего стимулирования [8].

Предложенные процедуры должны выполняться на основе оригинальных и стандартных процедур зонирования и комплексного ландшафтно-экологического анализа объектов представленного биоразнообразия (видов, популяций, территориальных группировок, экосистем) или природных территориальных комплексов различных масштабов.

Именно с этой целью был избран данный проектный объект для проработки и дальнейшего использования практик формирования природно-ресурсных комплексов территорий различной функциональной направленности (генография, эко-генетика). Для разработки эффективной методики регионального управления природно-ресурсными комплексами в настоящее время необходимо преобразование изучаемого проектного объекта в рамках национальной экологической сети. Фактические масштабы необходимых инвентаризационных и мониторинговых работ столь велики, что требуется установление приоритетности в выборе объектов, возможное лишь при получении надежной информационной основы исследователями и лицами, принимающими решения [12], [6]–[8], [13], [16].

Заключение. В научной статье последовательно проанализированы, предложены и сформулированы новые адресные представления об использовании биоинформационных технологий для решения задач изучения, оценки и сохранения биоразнообразия на различных природных уровнях, отдельных территориях, в лесных и водных экосистемах [8].

Для управления компонентами биоресурсов в стратегиях отраслевого прогнозирования и планах действий правомерно учитывать специфику территории с целью сохранения аборигенных видов, их популяции, биогеоценозов, местообитания животных и создания новых модельных территорий на базе предполагаемого проектного объекта [7].

Ориентация народно-хозяйственного комплекса страны на интенсивное развитие туризма обуславливает необходимость планирования параметров развития туристической и рекреационной деятельности на ООПТ. В связи с этим алгоритм оценки биоразнообразия состоит из серии последовательных этапов: выбор объекта биоразнообразия, определение целей и задач; идентификация параметров и способов оценки [12].

Целесообразно с учетом антропогенных нагрузок и угроз природным ландшафтам, комплексам и объектам в пределах рассматриваемой территории выделить оптимальное «ядро объекта», которое должно быть основой, определяющей её статус и функции [6].

Далее требуется создание буферного ареала между природным ядром и ареалом интенсивного хозяйства, что соответствует концепции поляризации ландшафта как средства формирования экологической устойчивости [3].

Литература

1. Абдуллина, Д. Р. Методика определения природной рекреационной емкости территории [Электронный ресурс] / Д. Р. Абдуллина, Н. Н. Мальцева, И. М. Потравный. – Режим доступа : <http://www.landindustry.ru/content/view/1172/136/>. – Дата доступа : 25.01.2021.
2. Боков, В. А. Нормирование антропогенной нагрузки на окружающую природную среду : учеб. пособие для ВУЗов / В. А. Боков, Т. В. Бобра, А. И. Лычак. – Симферополь : ТЭИ, 1998. – 110 с.
3. Временная методика определения рекреационных нагрузок на природные комплексы при организации туризма, экскурсий, массового повседневно-отдыха и временные нормы этих нагрузок / Лаб. лесоведения НАН Украины, ВНИИ лесоводства и механизации лесн. хоз-ва, Укр. НИИ лесн. хоз-ва и агролесомелиорации. – Киев., 2017. – 34 с.
4. Гракова, Л. В. Оценка туристско-рекреационного потенциала развития экологического туризма Беларуси / Л. В. Гракова, Н. С. Шевцова, М. Г. Ясовеев // Весці Беларус. дзярж. пед. ун-та імя М. Танка. Сер. 3, Фізіка. Матэматыка. Інфарматыка. Біялогія. Геаграфія. – 2009. – № 4. – С. 50–55.
5. Гракова, Л. В. Потенциал развития экологического туризма Беларуси / Л. В. Гракова // Весці Беларус. дзярж. пед. ун-та імя М. Танка. Сер. 3, Фізіка. Матэматыка. Інфарматыка. Біялогія. Геаграфія. – 2012. – № 1. – С. 75–81.
6. Кирейков, А. А. Технологии оценки состояния и управление качеством окружающей среды на выбранных территориях, мониторинг биологического статуса экосистем / А. А. Кирейков, В. П. Колесникович // Весці БДНУ. – 2019. – № 3. – С. 33–44.
7. Колесникович, В. П. Закономерности формирования, состояние, динамика развития, туристско-рекреационного потенциала Республики Беларусь / В. П. Колесникович // Весці БДПУ. – 2019. – № 3. – С. 45–56.
8. Колесникович, В. П. Стратегия сохранения и рационального использования туристско-рекреационного потенциала водных и наземных экосистем / В. П. Колесникович, М. А. Зима // Веснік Полес ГУ. Сер. Прыродазнаучыя навук. – 2019. – № 2. – С. 51–60.
9. Саранча, М. А. Методологические проблемы интегральной оценки туристско-рекреационного потенциала территории / М. А. Саранча // Вестник Удмуртского ун-та. – 2011. – № 1. – С. 118–127.
10. World cultural and natural heritage. Collection of Materials for Preparation of Documentation for Inscription of Sites on the UNESCO // World Cultural and Natural Heritage List. – Minsk, 2018. – 87 p.
11. Государственная программа развития туризма в Республике Беларусь на 2016–2020 годы [Электронный ресурс] / М-во спорта и туризма Республики Беларусь. – Режим доступа : <http://www.mst.by>. – Дата доступа : 10.02.2019.
12. Инструкция о порядке определения и установления нормативов допустимой нагрузки на особо охраняемые природные территории : утв. постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, 30 декабря 2008 г., № 129 : в ред. постановления Минприроды от 19.08.2019 г., № 19 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2021.
13. Национальная стратегия развития системы особо охраняемых природных территорий до 1 янв. 2030 г. : утв. постановлением Совета Министров Республики Беларусь, 02.07.2014 г., № 649 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2021.
14. Охрана окружающей среды в Беларуси : статистический сборник / М-во статистики и анализа Респ. Беларусь. – Минск, 2018. – 207 с.
15. Статистический ежегодник 2019 : статистический сборник // М-во статистики и анализа Респ. Беларусь. – Минск, 2019. – 314 с.
16. Об экологической сети : Указ Президента Республики Беларусь, 13 марта 2018 г., № 108 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2021.
17. Потаев, Г. А. Природные рекреационные ресурсы Беларуси : обзорная информация / Г. А. Потаев. – Минск : БелНИЦ «Экология», 2005. – 42 с.

УДК 57.063:581.95:502.172:582(476.2-292.484)«2017-2021»

О местонахождениях редких видов растений Речицко-Сожской равнины (итоги полевых исследований в период с 2017 по 2021 гг.)

Н.А. ЛИТВИНОВА

В географии растений полевой этап геоботанических работ очень важен и служит для получения фактического материала с целью последующего научного анализа. В результате полевых геоботанических исследований в период с 2017 по 2021 гг. нами был собран гербарный материал на территории Речицко-Сожской равнины. В статье дается информация о выявленных местонахождениях редких растений Беларуси с указанием географических координат большинства находок и их значимости. Перечислены местонахождения охраняемых видов растений, а также видов нехарактерных для белорусской флоры и показывающих характер ее современной динамики.

Ключевые слова: местонахождения редких растений, Речицко-Сожская равнина, Гомельское Полесье, охраняемые растения, динамика флоры.

In plant geography the field stage of geobotanical work is very important and serves to obtain factual material for subsequent scientific analysis. As a result of the field geobotanical studies in the period from 2017 to 2021, we collected herbarium material on the territory of the Rechitsko-Sozhskaya Plain. The article provides information about the identified locations of rare plants of Belarus, indicating the geographical coordinates of most of the finds and their significance. The locations of protected plant species, as well as species uncharacteristic of the Belarusian flora and showing the nature of its modern dynamics are listed.

Keywords: locations of rare plants, Rechitsko-Sozhskaya Plain, Gomel Polesie, protected plants, flora dynamics.

Введение. В период с 2017 по 2021 гг. нами проводились полевые исследования на территории Речицко-Сожской равнины, которая является физико-географическим районом в составе Гомельского Полесья. Как любая таксономическая единица, Речицко-Сожская равнина имеет свои физико-географические особенности, позволившие выделить ее в качестве отдельного физико-географического района. Она имеет площадь более 8000 км². На западе граничит с Василевичской низменностью, на севере – с Чечерской равниной (Восточное Предполесье, Предполесская провинция). Нами проводился сбор гербарного материала в Добрушском, Ветковском, Гомельском, Лоевском и Речицком районах. Было собрано около 500 растений, гербарный материал хранится в гербарии кафедры ботаники БГУ.

Результаты и их обсуждение. В результате проведения полевых исследований были обнаружены следующие местонахождения редких и охраняемых видов растений:

1. *Genista germanica* L. – Дрок германский. Речицкий район (окрестности д. Копань, сухой сосновый лес, 2017 г.). В указанном местонахождении был представлен несколькими особями. *G. germanica* является охраняемым растением, имеет 4 категорию национального природоохранного статуса. *G. germanica* – центрально-европейский неморальный вид, находящийся в Беларуси на северной и восточной границе ареала. Основная часть мест произрастания сосредоточена на юго-востоке Беларуси.

2. *Dracoccephalum ruyschiana* L. – Змееголовник Руйша. Речицкий район (окрестности д. Копань, сосновый лес, 2017 г.). В указанном местонахождении было обнаружено несколько особей. Данный вид является охраняемым, имеет 2 категорию национального природоохранного значения. *D. ruyschiana* – евразийский лесостепной вид, находящийся в Беларуси вблизи северо-западной границы ареала. И.К. Пачоский указывал, что *D. ruyschiana* является реликтом древней флоры, так как обладает широким ареалом при разбросанных местонахождениях [1, с. 230]. Популяция в окрестностях д. Копань была выявлена в 2001 г., занимала площадь равную 0,6 га и насчитывала приблизительно 400 разновозрастных особей [2, с. 125].

3. *Iris sibirica* L. – Ирис сибирский. Гомельский район (окрестности аг. Поколюбичи, пойменный луг р. Сож, 2021 г.), Речицкий район (окрестности д. Александровка, 52.31 N, 30.57 E, 2021 г.). В окрестностях Поколюбич вид обилен, в окрестностях Александровки

представлен несколькими особями. *I. sibirica* является охраняемым, имеет 4 категорию национального природоохранного статуса. Вид занесен в Красные книги Латвии, Литвы, Брянской и Псковской области России, Украины [2, с. 242]. *I. sibirica* является европейско-западносибирским плуризональным видом, в Беларуси растет в пределах ареала.

4. *Salvia pratensis* L. – Шалфей луговой. Ветковский район (окрестности д. Золотой Рог, 52,524 N, 31.0788 E, 2020 г.; окрестности аг. Старое Село, городище раннего железного века). В указанных местонахождениях вид обилен, занимает значительную площадь, растет на склонах возвышенностей в составе луговых фитоценозов. Охраняемый, имеет 4 категорию национального природоохранного значения. *S. pratensis* является европейским реликтовым лесостепным видом, находящимся в Беларуси на северной границе ареала.

5. Гибрид. *Oenothera casimiri* Rostanski (*Oenothera biennis* L. × *Oenothera rubricaulis* Kleb.). Ветковский район (окрестности аг. Старое Село, среди зарослей кустарников, 52,529 N, 31.169 E, 2020 г.).

6. *Oenothera canovirens* Steele. Ветковский район (окрестности аг. Старое Село, вблизи старичного озера, 52.5246 N, 31.1495 E, 2021), Гомельский район (окрестности п. Калинино, 52.5083 N, 31.0702 E, 2021 г.). В литературных источниках для флоры Беларуси не приводится [3], [4]. В Беларуси является редким видом. Данный вид встречается в Центральной Европе, на юге Скандинавского полуострова, странах Балтии. Вероятный район происхождения: Северная Америка [5].

7. *Potentilla alba* L. – Лапчатка белая. Гомельский район (окрестности г. Гомеля, 52.47 N, 31.06 E, смешанный лес, 2021 г.). В указанном местонахождении *P. alba* довольно обильна, занимает значительную площадь. Местонахождение вида в окрестностях г. Гомеля отмечал еще И.К. Пачоский в начале XX в [6]. Охраняемая, имеет 3 категорию национального природоохранного значения. С XIX в. лапчатка белая – редкий вид, поэтому в ряде стран Европы занесена в списки растений, находящихся под угрозой исчезновения, в России она в Красных книгах Московской, Смоленской, Рязанской, Липецкой и др. областей [7]. В Беларуси вид растет на северной границе ареала. *P. alba* является ценным лекарственным сырьем.

8. *Urtica galeopsifolia* J. Jacq. ex Blume – Крапива пикульниколистная. Ветковский район (окрестности аг. Старое Село, пойменный луг, 2021 г.). Евразийский вид, находящийся в Беларуси в пределах ареала. В Беларуси *U. galeopsifolia* встречается редко. Во «Флоре БССР» не упоминается [8]. В определителе В.И. Парфенова вид описан для флоры Беларуси как очень редкое растение [3]. Отмечено его местонахождение в Лепельском, Мозырском и Гомельском районах [3]. Сейчас выявлены новые местообитания этого вида в Брестском, Ивацевичском, Новогрудском, Воложинском и Слуцком районе, г. Минске (данные мобильного приложения iNaturalist). Для Ветковского района вид указывается впервые.

9. *Platanthera chlorantha* (Custer) Rchb. – Любка зеленоцветная. Гомельский район (Бобовичский сельсовет, сырой широколиственный лес, 52.3 N, 30.7 E, 2021 г.). В указанном местонахождении было обнаружено около 10 особей. Данный вид является охраняемым, имеет 4 категорию национальной природоохранной значимости. *P. chlorantha* включена в Красные книги Латвии, Литвы, Псковской и Смоленской областей России, Украины [2, с. 245]. Она является европейско-средиземноморским неморальным видом. *P. chlorantha* распространена в Европе, на Кавказе, Юго-западной Азии и Северной Африке [2, с. 236], [9]. В Беларуси данный вид находится в отдельных локалитетах и островных местах произрастания на северной и северо-восточной границах ареала [2, с. 236]. Указанное нами местонахождение выявлено впервые.

10. *Koeleria cristata* Kar. & Kir. – Тонконог гребенчатый. Гомельский район (окрестности аг. Поколюбичи, пойменный луг, 2021 г.). В Беларуси встречается очень редко. Во «Флоре БССР» не упоминается [10]. Во «Флоре Беларуси» отмечено, что вид в естественных условиях встречается только на юго-западе республики в долине р. Буг и заносится в другие районы страны [11]. Указаны местонахождения вида только в Витебской, Гродненской, Минской и Могилевской областях [11]. Указанное нами местонахождение выявлено впервые.

11. *Plantago stepposa* Kuprian. – Подорожник степной. Гомельский район (окрестности г. Гомеля, Плесы, у дороги, 52.47 N, 31.06 E, 2021 г.). *P. stepposa* – восточноевропейский степной вид, в Беларуси находится за западной границей ареала. Основная популяция вида

сосредоточена на юге России и в Украине. Во «Флоре БССР» *P. stepposa* не упоминается [12]. В определителе В.И. Парфенова данный вид указан как редкий для Беларуси, отмечено его произрастание в южных, юго-восточных и центральных районах республики [3].

12. *Galium physocarpum* Ledeb. – Подмаренник вздутоплодный. Гомельский район (Бобовичский сельсовет, окраина смешанного леса, 52.3 N, 30.7 E, 2021 г.). Во «Флоре БССР» *G. physocarpum* не упоминается [13]. В определителе В.И. Парфенова указан как редкий вид, произрастающий в южной части республики [3, с. 224]. Восточноевропейско-азиатский вид, в Беларуси произрастает на западной границе ареала. *G. physocarpum* внесён в Красную книгу Литвы (с 2007 г.), а также в региональные Красные книги Украины (Закарпатской, Львовской и Тернопольской областей).

13. *Tropa natans* L. – Рогульник плавающий. Речицкий район (окрестности д. Александровка, р. Днепр, 52.31 N, 30.57 E, 2021 г.). *T. natans* является евразийским бореальным видом. Охраняемый, имеет 3 категорию национального природоохранного значения. Данный вид включен в Красные книги Латвии, Литвы, Польши, Брянской, Псковской и Смоленской областей России, Украины [2, с. 175].

14. *Crepis rheadifolia* M. Bieb. – Скерда маколистная. Ветковский район (окрестности аг. Старое Село, у дороги, 52.52453 N, 31.147735 E, 2021 г.). Была представлена 5 особями. Впервые для флоры Беларуси *C. rheadifolia* указана И.К. Пачоским в 1897 г. под названием *Barkhausia rheadifolia* [14]. Вид был отмечен как очень редкое растение, найден 23 июля в сосновом лесу на поляне около д. Ручаевки Речицкого уезда Минской губернии (Лоевский район) [14]. Во «Флоре БССР» (1959 г.) вид упоминается только для Лоевского района Гомельской области [12]. В Гомельской области *C. rheadifolia* обнаружена спустя более 120 лет после первого упоминания для флоры Беларуси. *C. rheadifolia* – европейско-западноазиатский субпонтический вид, заносный.

15. *Dianthus borussicus* (Vierh.) Juz. – Гвоздика прусская. Речицкий район (окрестности д. Глушец, опушка леса, 52.48 N, 30.31 E, 2021 г.). *D. borussicus* является европейским видом. В определителе В.И. Парфенова и «Флоре БССР» как отдельный вид не упоминается [3], [8]. *D. borussicus* схожа с *D. arenarius*, может рассматриваться как ее разновидность.

16. *Filipendula stepposa* Juz. – Таволга степная. Ветковский район (окрестности аг. Старое Село, пойменный луг, 52.51 N, 31.12 E, 2021 г.). *F. stepposa* является восточноевропейско-западносибирским степным видом. В Беларуси данный вид находится за северо-западной границей ареала. В определителе В.И. Парфенова и «Флоре Беларуси» не упоминается [3], [8].

17. *Senecio tataricus* Less. – Крестовник татарский. Ветковский район (окрестности аг. Старое Село, пойменный луг р. Сож, 52.521 N, 31.169 E, 2021 г.). В определителе В.И. Парфенова указан как редкий вид, произрастающий в южной части республики (бассейн Припяти и Днепра) [3]. *S. tataricus* – восточноевропейско-азиатский вид, в Беларуси находится на северо-западной границе ареала.

18. *Prunella grandiflora* (L.) Scholler – Черноголовка крупноцветковая. Речицкий район (окрестности д. Хотецкое, сосновый лес, 2021 г.). Была представлена несколькими особями. *P. grandiflora* является южноевропейским видом. Была включена в 4-е издание Красной книги Беларуси [2, с. 191]. Местонахождение *P. grandiflora* в Речицком районе отмечено в литературных источниках [2, с. 191].

19. *Anthericum ramosum* L. – Венечник ветвистый. Ветковский район (окрестности аг. Старое Село, окраина смешанного леса, 52.5095 N, 31.1162 E, 2021 г.). Венечник ветвистый в указанном местонахождении представлен более 50 особями. *A. ramosum* является центральноевропейским неморальным видом, в Беларуси находится на северной границе ареала. Данный вид внесен в Список видов профилактической охраны 4-го издания как «пограничный» опушечно-лесной декоративный вид, требующий внимания [2, с. 423]. *A. ramosum* – охраняемое растение в Польше и Украине [2, с. 423].

20. *Clematis recta* L. – Ломонос прямой. Ветковский район (окрестности аг. Старое Село, городище раннего железного века, окраина смешанного леса, 52.509332 N, 31.115217 E, 2021 г.). Популяция *C. recta* в аг. Старое Село насчитывала более 10 особей. *C. recta* является европейским лесостепным и степным видом, в Беларуси находится на северной границе ареала. Данный вид охраняемый, имеет 2 категорию национального природоохранного значения. В Ветковском районе *C. recta* ранее уже был выявлен.

21. *Viola uliginosa* Besser – Фиалка топяная. Добрушский район (окрестности г. Добруша, 52.4 N, 31.35 E, сырой смешанный лес, 2021 г.). Данный вид является охраняемым, имеет 4 категорию национального природоохранного значения. *V. uliginosa* – европейский вид, в Беларуси находится на северной границе ареала. В Гомельской области сосредоточена значительная часть мировой популяции *V. uliginosa*. Местонахождение данного вида в Добрушском районе было известно ранее [2, с. 225].

22. *Cerastium glutinosum* Fr. – Ясколка клейкая. Лоевский район (окрестности д. Мохов, луг, вдоль тропы, 52.006 N, 30.746 E, 2021 г.). В указанном местонахождении довольно обильна. *C. glutinosum* является европейско-западноазиатским степным видом. В определителе В.И. Парфенова и «Флоре БССР» *C. glutinosum* не упоминается [3], [8]. Данный вид редко встречается в Беларуси. В гербарии Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины хранится образец «Пойменный луг в 3 км вост. пос. Хвоенск Житковичского р-на. 18.06.1973 Н. Дайнеко» (ГОМ-5331), который может указывать на принадлежность данного вида к аборигенной флоре южной части Беларуси [15, с. 148].

23. *Myosotis sparsiflora* Pohl – Незабудка редкоцветковая. Лоевский район (окрестности д. Мохов, окраина смешанного леса, 52.006 N, 30.746 E, 2021 г.). *M. sparsiflora* является европейским неморальным видом. В Беларуси данный вид находится в пределах ареала, но встречается редко.

24. *Gnaphalium rossicum* Kirp. – Сушеница русская. Ветковский район (окрестности д. Хальч, берег р. Сож, песчаный берег, 52.562 N, 31.153 E, 2021 г.). *G. rossicum* является восточноевропейско-азиатским видом, в Беларуси находится на северо-западной границе ареала. В определителе В.И. Парфенова данный вид не упоминается [3].

25. *Salvinia natans* (L.) All. – Сальвиния плавающая. Ветковский район (окрестности аг. Старое Село, старица р. Сож, 52.49503 N, 31.12577 E, 2021 г.). *S. natans* является евразийским неморально-лесостепным видом, в Беларуси находится на северной границе ареала. Данный вид охраняемый, имеет 4 категорию национального природоохранного значения. *S. natans* включена в Красные книги Украины, Польши и Литвы. Местообитание *S. natans* в Ветковском районе выявлено впервые.

26. *Epipactis palustris* (L.) Crantz – Дремлик болотный. Гомельский район (аг. Поколюбичи, заболоченный луг у оз. Сетен, 52.4983 N, 31.0333 E, 2021 г.). В указанном местонахождении данный вид обильен, произрастает совместно с *Dactylorhiza baltica*. До 90-х гг. XX в. *E. palustris* и *D. baltica* здесь отсутствовали, появились после зарастания озера и прекращения выпаса скота на лугу. *E. palustris* – европейско-западноазиатский суббореально-лесостепной вид. Он внесен в Список видов профилактической охраны 4-го издания как лугово-болотный декоративный вид, требующий внимания [2, с. 424]. *E. palustris* является охраняемым растением в Польше и Украине [2, с. 424].

27. *Dactylorhiza fuchsii* (Druce) Sob – Пальчатокоренник Фукса. Гомельский район (Бобовичский сельсовет, сырой широколиственный лес, 52.3 N, 30.7 E, 2021 г.). *D. fuchsii* в выявленном местообитании представлен более 20 особями. *D. fuchsii* – это евразийский неморальный вид. Он внесен в Список видов профилактической охраны 4-го издания как болотно-лесной декоративный и лекарственный вид, требующий внимания [2, с. 425]. Охраняемое растение в Латвии, Литве, Польше и Украине [2, с. 425].

28. *Chaerophyllum bulbosum* L. – Бутень клубненосный. Гомельский район (окрестности аг. Поколюбичи, пойменный луг р. Сож, 52.471 N, 31.097 E, 2021 г.). В Беларуси данный вид встречается редко. *C. bulbosum* является европейским неморально-лесостепным видом, в Беларуси находится в пределах ареала.

Заключение. В результате полевых геоботанических исследований нами обнаружены новые местонахождения редких и охраняемых растений Беларуси, подтверждено произрастание охраняемых видов в ранее выявленных местообитаниях. Хозяйственная деятельность человека повлияла на увеличение интенсивности заноса новых видов растений, отмечено появление *Oenothera canovirens*, *Plantago stepposa*, *Crepis rheadifolia*, *Cerastium glutinosum*. Климатические изменения в сторону потепления способствуют распространению *Crepis rheadifolia*, *Cerastium glutinosum*.

Благодарность. Выражаю благодарность к.б.н., доценту кафедры ботаники БГУ М.А. Джусу за помощь в определении видов рода *Oenothera*.

Литература

1. Козловская, Н. В. Хорология флоры Белоруссии / Н. В. Козловская, В. И. Парфенов. – Минск : Наука и техника, 1972. – 299 с.
2. 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.
3. Определитель высших растений Беларуси / под ред. В. И. Парфенова. – Минск : Дизайн ПРО, 1999. – 472 с.
4. Флора Флора БССР / Институт биологии Академии наук Белорусской ССР ; ред.: Н. А. Дорожкин, М. П. Томин ; сост.: В. Н. Васильев [и др.]. – Минск : Издательство Академии наук Белорусской ССР, 1950. – Т. 3. – 490 с.
5. Rostański, K. The genus *Oenothera* in Belgium / K. Rostański, F. Verloove // *Dumortiera*. – 2015. – № 106. – Р. 12–42.
6. Пачоский, И. К. Флора Полесья и прилежащих местностей / И. К. Пачоский – СПб. : тип. Демакова, 1899. – 115 с.
7. Грязнов, М. Ю. Биоразнообразие *Potentilla alba* L. Биологические особенности лекарственных и ароматических растений и их роль в медицине / М. Ю. Грязнов, Ф. М. Хазиева, А. Н. Сидельников, С. А. Тоцкая // Сборник научных трудов Междунар. научно-практической конф., посвященной 85-летию ВИЛАР, Москва, 23–25 июня 2016 г. – М., 2016. – С. 207–209.
8. Флора БССР / Институт биологии Академии наук Белорусской ССР ; ред.: Н. А. Дорожкин. – Минск : Издательство Академии наук Белорусской ССР, 1949. – Т. 2. – 510 с.
9. GBIF [Electronic resource]. – Mode of access : <https://www.gbif.org>. – Date of access : 25.05.2022.
10. Флора БССР / Ботанический сад Академии наук БССР ; ред.: Б. К. Шишкин, Н. А. Дорожкин ; сост.: С. Г. Горшкова [и др.]. – М. : Сельхозгиз, 1949. – Т. 1. – 432 с.
11. Флора Беларуси. Сосудистые растения: в 6 т. / Д. И. Третьяков [и др.] ; НАН Беларуси, Ин-т эксперим. ботаники им. В.Ф. Купревича ; под общ. ред. В. И. Парфенова. – Минск : Беларус. навука, 2013. – Т. 2 : Liliopsida (Acoraceae, Alismataceae, Araceae, Butomaceae, Commelinaceae, Hydrocharitaceae, Juncaginaceae, Lemnaceae, Najadaceae, Poaceae, Potamogetonaceae, Scheuchzeriaceae, Sparganiaceae, Typhaceae, Zannichelliaceae). – 447 с.
12. Флора БССР / Институт биологии Академии наук Белорусской ССР ; Институт биологии Академии наук Белорусской ССР. – Минск : Издательство Академии наук Белорусской ССР, 1959. – Т. 5. – 267 с.
13. Флора БССР / Институт биологии Академии наук Белорусской ССР ; ред.: Б. К. Шишкин, М. П. Томин ; сост.: Н. В. Козловская [и др.]. – Минск : Издательство Академии наук Белорусской ССР, 1955. – Т. 4. – 527 с.
14. Михайловская, В. А. Баркгаузия – *Barkhausia* Moench. / В. А. Михайловская // Флора БССР. – Минск : изд. АН БССР, 1959. – Т. 5. – С. 194–196.
15. Тихомиров, В. Н. Семейство *Caryophyllaceae* Juss. во флоре Беларуси – проблемы и перспективы изучения / В. Н. Тихомиров // Флора и растительность в меняющемся мире : проблемы изучения, сохранения и рационального использования : материалы Международной научной конференции, Минск, 24–27 сентября 2019 г. – Минск : Колорград, 2019. – С. 144–155.

УДК 57.044:546.74:546.76:556.531:627.157(476.2-21Гомель)

Мониторинг содержания соединений никеля и хрома в донных отложениях водоемов города Гомеля и прилегающих территорий

Т.В. МАКАРЕНКО, О.В. ПЫРХ, А.В. ХАДАНОВИЧ, А.И. МАКАРЕНКО

Определены значения фоновых концентраций изучаемых металлов в донных отложениях водоемов, которые составили для никеля 2,99 мг/кг; для хрома – 4,63 мг/кг соответственно. За период исследований с 2010 по 2019 гг. в целом отмечено снижение содержания исследуемых металлов в отложениях в 1,2–4,9 раза для никеля и в 1,1–11,2 раза для хрома, что свидетельствовало о снижении антропогенной нагрузки на водные экосистемы. В период с 2019 по 2021 гг. единой динамики, отражающей снижение содержания соединений хрома в донных отложениях всех изучаемых водоемов, не установлено. Концентрация соединений никеля в донных отложениях снижается, за исключением водоемов с высокой антропогенной нагрузкой. По индексу геоаккумуляции элементов исследуемые водоемы и водотоки г. Гомеля и прилегающие территории следует отнести к 1 классу по степени загрязнения (незагрязненные до умеренно загрязненных).

Ключевые слова: тяжелые металлы, водные экосистемы, загрязнение, токсичность, фоновые концентрации, никель, хром.

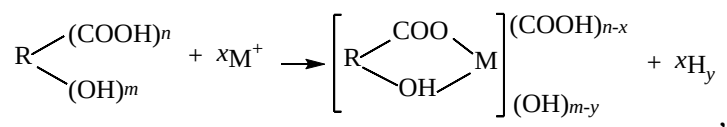
The values of background concentrations of the studied metals in the bottom sediments of the reservoirs were determined, which amounted to 2,99 mg/kg for nickel; for chromium – 4,63 mg/kg, respectively. During the period of the research from 2010 to 2019, in general, there was a decrease in the content of the studied metals in the sediments by 1,2–4,9 times for nickel and by 1,1–11,2 times for chromium, which indicated a decrease in the anthropogenic load on aquatic ecosystems. In the period from 2019 to 2021, no unified dynamics reflecting the decrease in the content of chromium compounds in the bottom sediments of all the studied reservoirs was established. The concentration of nickel compounds in the bottom sediments decreases, with the exception of the reservoirs with a high anthropogenic load. According to the geo-accumulation index of elements, the investigated reservoirs and streams of the city of Gomel and adjacent territories should be classified as class 1 by the degree of pollution (uncontaminated to moderately contaminated).

Keywords: heavy metals, water ecosystems, pollution, toxicity, background concentrations, nickel, chromium.

Введение. Тяжелые металлы являются наиболее распространенными загрязнителями водной среды. Они способны аккумулироваться различными компонентами водных экосистем, в частности донными отложениями, что обусловлено сорбцией, низкой растворимостью в воде большинства их химических форм, способностью вступать в реакции комплексобразования [1].

Донные отложения выступают в качестве факторов формирования гидрохимического режима водоема в целом, являются одним из индикаторов загрязнения водных экосистем соединениями тяжелых металлов. Часть загрязняющих веществ водоемов концентрируется в донных отложениях, оказывает токсическое действие на бентосные организмы и способна передаваться по трофическим цепям [2], [3]. В донных отложениях металлы представлены в различных состояниях: прочно связанные в кристаллических решетках минералов; адсорбированные на поверхности оксидов железа и марганца, глинистых минералов, органического материала; в кристаллической решетке вторичных минералов или аморфных оксидах и гидроксидов железа, марганца и др., аккумулируются поровыми и внутренними (грунтовыми) водами, карбонатами, сульфидами, силикатами и компонентами биоты [4].

Донные отложения являются природными сорбентами, одним из главных компонентов которых являются органические вещества [5]. В состав органической составляющей донных отложений входят остатки гуминовых кислот – высокомолекулярные органические вещества, которые способны сорбироваться минеральной фазой осадков и связывать металлы. Это является важнейшим фактором уменьшения мобильности тяжелых металлов [6]. Гуминовые вещества способны к образованию органометаллических комплексов, снижающих токсичность ряда металлов [7].



где М – $Fe(OH)_2^+$, $Fe(OH)^{2+}$, $Al(OH)_2^+$ или $Al(OH)^{2+}$.

Среди наиболее распространенных природных сорбентов, наряду с органическим веществом, следует выделить глины, оксиды и гидроксиды железа, марганца и алюминия. Общая последовательность, в которой располагаются природные сорбенты по их способности аккумулировать тяжелые металлы, такова: гидроксиды марганца > гуминовые кислоты > гидроксид железа (III) > глинистые минералы [8]. Ионы металлов способны непосредственного связываться с кристаллической решеткой глин. Сорбенты могут находиться в водоеме либо во взвешенном состоянии, осаждаясь при соответствующих условиях на дно, либо входить в состав донных отложений [9], [10]. Сорбция металлов взвешенными глинистыми частицами играет большую роль, чем поглощение осадками, представленными глинами [11]. Отмечается, что в донных отложениях наиболее токсичны и доступны для гидробионтов обменные формы тяжелых металлов и особенно та их часть, которая связана с органическим веществом и гидроксидами железа и марганца [12].

При определенных условиях донные отложения могут выступать в качестве потенциального источника вторичного загрязнения водной массы и носить локальный характер или охватывать весь водоем в зависимости от вызвавших его причин [13]. Это происходит под влиянием физико-химических факторов (снижение pH и окислительно-восстановительного потенциала Eh на границе раздела фаз «донные отложения – вода», дефицита растворенного кислорода в водной толще и в самих донных отложениях, наличия органических комплексообразующих веществ микробиологических процессов, протекающих в водоемах; деструкции органических веществ под действием бактериофлоры и др.) [14]. Следовательно, изучение вопросов, посвященных особенностям накопления тяжелых металлов донными отложениями, является актуальным.

Цель: изучение динамики содержания соединений никеля и хрома в донных отложениях водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий, установление фоновых концентраций данных металлов для проведения эколого-химических исследований загрязнения водных экосистем.

Объект, материалы и методы исследования. Объект исследований – донные отложения, отобранные в водоемах и водотоках г. Гомеля и прилегающих территорий. При выборе водоемов руководствовались близостью физико-географических условий, при этом водоемы характеризовались существенным различием степени хозяйственного освоения и техногенной нагрузки. На территории города располагаются водоемы: Дедно, Шапор, Любенское, У-образное. В пригородной зоне отдыха находятся озера Володькино и Гребной канал. В качестве водоема, не испытывающего видимой антропогенной нагрузки, выбран старичный комплекс р. Сож, который находится в окрестностях д. Поляновка (Ветковский район, Гомельская область) и расположен на 15 км выше г. Гомеля по течению.

Отбор проб донных отложений и подготовку их к анализу проводили в соответствии с [15]. Определение количественного содержания никеля и хрома в отобранных образцах донных отложений проводили на базе Государственного научного учреждения «Институт радиобиологии НАН Беларуси» на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой с пробоподготовкой образцов в системе микроволнового вскрытия.

За период исследований с 2010 по 2021 гг. содержание тяжелых металлов в донных отложениях изучаемых водоемов снизилось и для некоторых водоемов черты г. Гомеля концентрация изучаемых металлов оказалась ниже, чем в старичном комплексе р. Сож, который долгое время использовался как водоем сравнения. Это вызвало необходимость выбора новых фоновых концентраций изучаемых металлов в донных отложениях для проведения сравнительного анализа загрязнения водных экосистем изучаемой территории. Для установления фоновых концентраций тяжелых металлов в донных отложениях был использован статистический метод [16]. Согласно данному методу отдельно в каждом выделенном периоде (сезоне) исключаются непоказательные экстремальные значения концентрации, затем рассчитывают средние значения концентрации тяжелых металлов в исследуемых образцах. Период с наибольшей средней концентрацией вещества принимают в рассматриваемой версии за основную фоновую величину.

Результаты и их обсуждение. Проанализировав большой объем данных, предложено в качестве фоновой величины для соединений никеля в донных отложениях использовать концентрацию 2,99 мг/кг. Сравнительный анализ содержания никеля в донных отложениях водоемов в 2010 и 2019 гг. подтвердил снижение антропогенной нагрузки на водные экосистемы (рисунок 1).

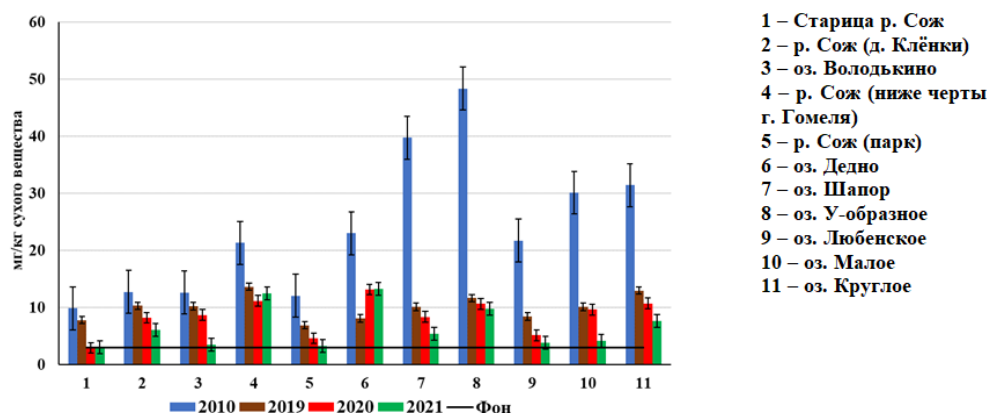


Рисунок 1 – Содержание соединений никеля в донных отложениях водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий

Содержание металла в донных отложениях в течение периода исследований уменьшилось, в среднем – в 1,5 раза. Максимальное снижение содержания никеля отмечено для оз. У-образное, а незначительное – для отложений оз. Володькино и Старичного комплекса р. Сож. Можно предположить, что соединения никеля используются в производственных процессах на предприятиях г. Гомеля в меньших количествах, чем ранее, так как в период с 2019 по 2021 гг. количественное содержание металла в донных отложениях водоемов снизилось, за исключением водоемов с высокой антропогенной нагрузкой (р. Сож ниже черты г. Гомеля и оз. Дедно). В отложениях Старичного комплекса отмечено низкое содержание соединений никеля в период с 2010 по 2019 гг. Резкое снижение концентрации металла в 2020 г. по сравнению с 2019 г., вероятно, вызвано изменением форм нахождения никеля в донных отложениях и переходом его соединений в водную растительность, и обусловлено процессами самоочищения водных экосистем. Отмечено, что в донных отложениях Старичного комплекса р. Сож концентрация никеля 2020 г в два раза ниже, чем в 2019 г., при этом содержание металла в 2021 г. осталось на уровне 2020 г. При общем снижении содержания никеля в отложениях водоемов г. Гомеля такое поведение в компонентах отложений Старичного комплекса р. Сож требует более детального изучения. Концентрация никеля в донных отложениях, отобранных в оз. Дедно и на участке р. Сож ниже административной черты г. Гомеля в 2019 г., значительно ниже, чем в 2010 г., и сравнимы с величинами, полученными для образцов участка р. Сож выше черты города. Это указывает на снижение поступления никеля в вышеуказанные водоемы. Оз. Дедно испытывало значительную антропогенную нагрузку, что отразилось на высоком содержании изучаемого тяжелого металла в отложениях водоема.

Установлено значительное снижение концентрации никеля в отложениях оз. Володькино и оз. Малое в 2021 г. по сравнению с таковыми, полученными в 2020 г., что, вероятно, связано с переходом металла в более доступную биологическую форму и извлечением его из донных отложений водной растительностью, которая в большом количестве произрастает в данных водоемах. В 2020 г. в оз. Малое по решению горисполкома Железнодорожного района г. Гомеля большая часть водной растительности была удалена для улучшения экологического состояния водоема, что сказалось на резком снижении содержания никеля в отложениях данного водоема. Объяснить снижение содержания изучаемого металла в отложениях оз. Володькино, расположенного выше черты г. Гомеля по течению, можно как снижением содержания никеля в газопылевых выбросах предприятий города, так и снижением поступления загрязнителей в водоем с водой р. Ипуть, впадающей в оз. Володькино. Незначительные изменения в сторону снижения концентрации металла отмечены в донных отложениях

оз. У-образное, что может являться как следствием недоступности его в отложениях, так и поступлением соединений никеля в водоем извне с поверхностным стоком. В донных отложениях р. Сож парковой зоны в период исследований с 2019 по 2021 гг. отмечено содержание никеля ниже фонового значения (2,99 мг/кг сухого вещества), что объясняется изменением структуры дна реки при реконструкции набережной. В донных отложениях оз. Дедно, участка р. Сож ниже административной черты города и оз. У-образное, отобранных в период с 2019 по 2021 гг., концентрация никеля превышала фоновые значения в 6,8, 4,3, 4,3 раза соответственно.

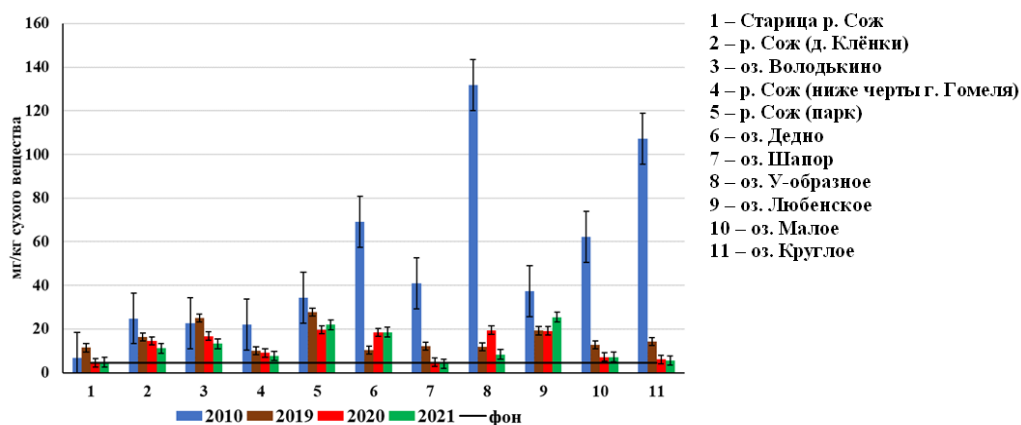


Рисунок 2 – Содержание соединений хрома в донных отложениях водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий

В процессе анализа большого объема фактического материала определено фоновое содержание соединений хрома в донных отложениях, которое составило 4,63 мг/кг (рисунок 2). Установлено, что концентрация хрома в донных отложениях изучаемых водоемов в 2019 г. ниже по сравнению с данными, полученными в 2010 г. Максимальное снижение характерно для оз. У-образное (в 11,2 раза), значительные изменения отмечены для таких водоемов как оз. Дедно (уменьшение в 6,7 раза) и оз. Круглое (уменьшение в 7,5 раза). Однако в чистых водных экосистемах, таких как Старичный комплекс и оз. Володькино, концентрация хрома в донных отложениях увеличилась. Для оз. Володькино увеличение не столь значительное (1,1 раза), для донных отложений Старицы р. Сож – 1,7 раза. В 2020 г. в отложениях Старичного комплекса содержание соединений хрома снизилось по сравнению с показателями 2019 г. в 2,5 раза, в 2021 г. содержание осталось на уровне 2020 г. В данный период осуществлялась очистка водоемов от водной растительности, что, вероятно, влечет за собой быстрое самоочищение водных экосистем, в частности, донных отложений и воды водоемов. В донных отложениях оз. Володькино содержание металла в 2020 г. снизилось в 1,5 раза, но дальнейшее изменение концентрации хрома в 2021 г. в сторону уменьшения не столь значительны. Минимальная концентрация соединений хрома 2019 г. характерно для р. Сож парковой зоны, что даже ниже величины, определенной для Старичного комплекса р. Сож. Отмечено, что в донных отложениях оз. У-образное концентрация металла в 2019 г. сопоставима с таковой в Старичном комплексе несмотря на то, что в 2010 г. водоем был самым загрязненным в отношении соединений хрома.

Максимумы содержания соединений металла отмечалось в течение периода исследований характерно для участка р. Сож ниже административной черты г. Гомеля, что обусловлено влиянием городской агломерации на водную экосистему реки. В 2020 г. содержание хрома в донных отложениях исследуемого участка снизилось, в 2021 г. концентрация металла увеличилась, но не достигла величины 2019 г. В оз. Дедно, которое испытывает значительную нагрузку, зафиксировано минимальное содержание соединений хрома, что свидетельствует о снижении антропогенной нагрузки на водную экосистему в период с 2010 по 2019 гг. В период исследований 2020–2021 гг. в водоеме концентрация металла увеличилась в 1,8 раза по сравнению со значением 2019 г., что, вероятно, обусловлено увеличением антропогенного воздействия на водоем.

Единой динамики, отражающей снижение содержания соединений хрома в донных отложениях всех изучаемых водоемов, не установлено. Для ряда водоемов содержание хрома снижается в 2020 г. и остается практически на таком же уровне 2021 г. Для других содержа-

ние ионов хрома в период с 2019 по 2020 гг. менялось незначительно, но в 2021 либо увеличилось, либо незначительно снижалось. Полученные данные не дают возможности предположить о значительном снижении антропогенного поступления хрома в окружающую среду. Участок р. Сож выше города по течению был более загрязненным на протяжении 2019–2021 гг., по сравнению с участком р. Сож парковой зоны. Вероятно, поверхностный сток с огородов дачных участков и частного сектора содержит достаточное количество соединений хрома, которое может влиять на загрязнение водной экосистемы р. Сож выше г. Гомеля по течению. Накоплению металлов на участке реки в парковой зоне препятствует быстрое течение и малое количество органических веществ, а также проведенная реконструкция дна. В 2020 г. минимальное содержание соединений хрома отмечено в Старичном комплексе, и практически такая же величина характерна для водоема городской черты – оз. Шапор, где снижение концентрации в сравнении с 2019 г. составило 2,6 раза. В 2021 г. содержание металла в отложениях оз. Шапор минимально за весь период исследований. В отложениях оз. У-образное отмечался немонотонный характер варьирования содержания изучаемого металла: в 2020 г. его концентрация в исследуемом объекте увеличилась в 1,6 раза по сравнению с 2019 г.; в 2021 г. отмечено снижение в 2,3 раза по сравнению с показателями 2020 г. Дать объяснение данному факту довольно сложно, так как антропогенная нагрузка на водоем практически не изменилась. Высокое содержание металла на протяжении всего периода исследований определено в донных отложениях оз. Любенское. Максимальная концентрация металла зафиксирована в 2021 г., хотя предполагалось, что в водоеме будет происходить снижение содержания хрома, в отложениях с учетом того факта, что в данной водной экосистеме была изменена структура дна при реконструкции озера. Данный факт требует более детального изучения. В оз. Малое концентрация хрома в 2020 г. снизилась в 1,8 раза по сравнению с 2019 г., но в 2021 г. осталась практически неизменной, несмотря на то, что из водоема практически полностью удалили водную растительность. Вероятно, соединения хрома характеризуются малой доступностью для водной растительности в отложениях водоема, при этом не исключается поступление соединений хрома извне. В донных отложениях практически всех изучаемых водоемов содержание соединений хрома превышало фоновую величину. В 2019 г. максимальное превышение фоновой концентрации металла – 32,0 раза – отмечено для донных отложений оз. У-образное. Для отложений оз. Круглое превышение фона составило 22,8 раза. Незначительное превышение фоновых концентраций элемента в изучаемом объекте характерно для участка р. Сож парковой зоны (1,9 раза). В 2020 г. зафиксировано превышение фоновых концентраций хрома в 19,3 раза в донных отложениях оз. Дедно. В оз. У-образное фоновая величина концентраций хрома превышена в 12,6 раза, незначительное увеличение характерно для реки парковой зоны. В 2021 г. отмечена аналогичная тенденция – превышение фона характерно для донных отложений оз. Дедно, минимальное – для участка р. Сож выше города по течению и для отложений оз. Малое.

При анализе степени загрязнения донных отложений водных экосистем следует учитывать геохимические особенности изучаемого региона, так как строение материнских пород, формирующих отложения водоемов данного региона, оказывает значительное влияние как на содержание, так и на накопление металлов в экосистемах. С целью определения степени загрязнения донных отложений изучаемыми металлами рассчитаны индексы геоаккумуляции по формуле [17]:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1,5B_n} \right).$$

Рассчитанные значения индексов геоаккумуляции элементов находятся в интервале 0–1. Это означает, что изучаемые водные экосистемы следует отнести к классу 1 (незагрязненные до умеренно загрязненных).

Заключение. С учетом снижения содержания тяжелых металлов в донных отложениях изучаемых водных экосистем установлены новые фоновые концентрации для соединений никеля – 2,99 мг/кг, для соединений хрома – 4,63 мг/кг. За период исследований с 2010 по 2019 гг. в целом отмечено снижение содержания исследуемых металлов в отложениях в 1,2–4,9 раза для никеля и в 1,1–11,2 раза для хрома, что свидетельствовало о снижении антропогенной нагрузки на водные экосистемы. В период с 2019 по 2021 гг. единой динамики, отражающей снижение содержания соединений хрома в донных отложениях всех изучаемых водоемов, не установлено. Концентрация соединений никеля в донных отложениях снижается, за исключением водоемов с

высокой антропогенной нагрузкой (р. Сож ниже черты города и оз. Дедно). За весь период исследований только в 2021 г. в донных отложениях водоемов концентрация соединений никеля и хрома была либо ниже, либо равна фоновой величине. Высокий уровень загрязнения донных отложений соединениями никеля характерен для участка р. Сож ниже городской черты, озер Уобразное и Круглое. Значительное содержание соединений хрома наблюдалось на участках р. Сож выше г. Гомеля по течению (д. Кленки), в парковой зоне р. Сож, в озерах Володькино и Любенское. Исследуемые водоемы и водотоки г. Гомеля и прилегающих территорий по рассчитанным значениям индексов геоаккумуляции никеля и хрома по степени загрязнения следует отнести к 1 классу (незагрязненные до умеренно загрязненных).

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках темы ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда».

Литература

1. Линник, П. Н. Комплексообразование ионов металлов в природных водах / П. Н. Линник, Б. И. Набиванец // Гидробиол. журнал. – 1983. – Т. 19, № 3. – С. 82–95.
2. Даувальтер, В. А. Оценка токсичности металлов, накопленных в донных отложениях озер / В. А. Даувальтер // Водные ресурсы. – 2000. – Т. 27, № 4. – С. 469–476.
3. Тяжелые металлы в донных отложениях Иваньковского водохранилища / В. Ф. Бреховских [и др.] // Водные ресурсы. – 2001. – Т. 28, № 3. – С. 310–319.
4. Мунтяну, Г. Г. Влияние Резинско-Рыбницкого промышленного комплекса на содержание ртути (II), меди (II), свинца (II), кадмия (II) в Дубоссарском водохранилище реки Днестр / Г. Г. Мунтяну, В. И. Мунтяну // Гидробиол. журнал. – 2004. – Т. 40, № 4. – С. 80–96.
5. Тяжелые металлы в донных отложениях Верхней и Нижней Волги / В. Ф. Бреховских [и др.] // Водные ресурсы. – 2002. – Т. 29, № 5. – С. 587–595.
6. Hart, B. T. Uptake of trace metals by sediments and suspended particulates: a review / B. T. Hart // Hydrobiologia. – 1982. – № 91. – P. 299–313.
7. Орлов, Д. С. Химия почв : учебник / Д. С. Орлов. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 2005. – 376 с.
8. Тарновский, А. А. Геохимия донных отложений современных озер / А. А. Тарновский. – Л., 1980. – 172 с.
9. Даувальтер, В. А. Концентрации металлов в донных отложениях закисленных озер / В. А. Даувальтер // Водные ресурсы. – 1998. – Т. 25, № 3. – С. 358–365.
10. Новиков, Б. И. Донные отложения днепровских водохранилищ / Б. И. Новиков. – Киев, 1985. – 172 с.
11. Донные отложения водохранилищ и их влияние на качество воды / А. И. Денисова [и др.] ; под общ. ред. А. И. Денисовой – Киев : Наук. Думка, 1987. – 164 с.
12. Белоконь, В. Н. Формы нахождения тяжелых металлов в донных отложениях водохранилищ Днепра. II. Кадмий, свинец / В. Н. Белоконь, Е. П. Нахшина // Гидробиол. журнал. – 1990. – Т. 26, № 2. – С. 83–89.
13. Тяжелые металлы в донных отложениях Иваньковского водохранилища / В. Ф. Бреховских [и др.] // Водные ресурсы. – 2001. – Т. 28, № 3. – С. 310–319.
14. Кондратьева, Л. М. Вторичное загрязнение водных экосистем / Л. М. Кондратьева // Водные ресурсы. – 2000. – Т. 27, № 2. – С. 221–231.
15. Охрана окружающей среды и природопользование. Аналитический (лабораторный) контроль и мониторинг окружающей среды. Порядок проведения наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях = Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне. Аналітычны (лабараторны) кантроль і маніторынг навакольнага асяроддзя. Парадак правядзення назіранняў за ўтрыманнем забруджвальных рэчываў у донных асадках : ТКП 17.13–22–2018 (33140). – Введ. 01.07.2018. – Минск : ГУ «Республиканский центр аналитического контроля в области охраны окружающей среды», 2018. – 31 с.
16. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Правила установления фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов = Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне. Гідрасфера. Правілы ўстанаўлення фонавых канцэнтрацый хімічных рэчываў у вадзе водных аб'ектаў : ТКП 17.06–04–2012 (02120). – Введ. 17.06.2012. – Минск : БелГИСС: Госстандарт, 2012. – 23 с.
17. Лукашев, О. В. Временная и межвидовая изменчивости содержания металлов в компонентах водных объектов г. Гомеля / О. В. Лукашев, Н. В. Жуковская, Т. В. Макаренко // Проблемы региональной геологии запада Восточно-Европейской платформы и смежных территорий : матер. III Междунар. науч. конф., Минск, 15 дек. 2021 г / БГУ ; редкол.: О. В. Лукашев (гл. ред.). – Минск, 2021. – С. 227–237.

Детерминанты цитотоксических и фотосенсибилизирующих свойств экстрактов из лишайников в отношении опухолевой линии MCF-7

М.В. МАТВЕЕНКОВ

Приведен количественный цитотоксический и фотомодифицирующий профиль для тридцати пяти экстрактов, полученных из пяти распространенных видов лишайников Юго-Востока Беларуси. Выраженный цитотоксический эффект ($IC_{50} < 30$ мкг/мл) выявлен у одиннадцати экстрактов. Почти все экстракты обладали фотосенсибилизационными свойствами и были сгруппированы по силе воздействия, а также по наличию концентрационно-зависимых эффектов. Методом множественной регрессии показано, что цитотоксические свойства экстрактов, в большей степени, обусловлены применяемыми для их получения растворителями. Фотосенсибилизирующие свойства экстрактов почти в равной мере обусловлены всеми экспериментальными факторами. Наблюдается достоверная тенденция к усилению их сенсибилизирующих свойств по мере роста применяемой концентрации и использования для их получения растворителей неполярной природы.

Ключевые слова: экстракты из лишайников, культура карциномы человека (MCF-7), цитотоксичность, доза ультрафиолета, фотосенсибилизация, множественная регрессия.

A quantitative cytotoxic and photomodifying profile for thirty-five extracts obtained from five common lichen species in the South-East of Belarus is given. A pronounced cytotoxic effect ($IC_{50} < 30$ µg/ml) was detected in eleven extracts. Almost all the extracts had photosensitizing properties and were grouped according to the strength of the effect, as well as the presence of concentration-dependent effects. The method of multiple regression showed that the cytotoxic properties of the extracts are largely determined by the solvents used to obtain them. The photosensitizing properties of the extracts are almost equally due to all experimental factors. There is a significant trend towards an increase in their sensitizing properties as the applied concentration increases and the use of non-polar solvents for their preparation.

Keywords: lichen extracts, human cancer cell line (MCF-7), cytotoxicity, ultraviolet dose, photosensitivity, multiple regression.

Введение. В последнее время активно разрабатывается научное обоснование возможности применения экстрактов из лишайников в качестве соединений с фотозащитными свойствами. В пользу этого говорят исследования спектра их фотопоглощения и структурных особенностей ряда полифункциональных ароматических соединений [1], [2]. Описана их способность снижать поступившие на кожу дозы ультрафиолета, проявлять фотозащитные биологические эффекты (антиоксидантные, антиапоптотические, противовоспалительные и т. д.) [3]–[5]. Вместе с тем существуют работы, указывающие на возможность данных веществ усиливать повреждающее действие ультрафиолета [6]–[8]. Эта слабо изученная область является теоретической перспективой для изучения возможности изменения фоточувствительности опухолевых клеток. Таким образом, представляется актуальным и значимым дать подобным эффектам количественную оценку. Варьирование экспериментальных условий использования экстрактов позволяет обозначить важные аспекты возможного биотехнологического применения лишайниковой биомассы. Существует необходимость установить влияние на фотомодифицирующие свойства экстрактов: условий экстрагирования, доз ультрафиолета, концентрационно-зависимых эффектов и, наконец, видовой и эколого-географической принадлежности лишайника. Выводы, полученные в результате широкого и систематичного скрининга свойств экстрактов, могут способствовать решению как прикладных задач, так и являться теоретической основой для разработки новых подходов в способах коррекции жизнеспособности опухолевых клеток.

Цель работы: оценка влияния экспериментальных факторов на цитотоксические и фотомодифицирующие характеристики различных фракций веществ, выделенных из пяти распространенных видов лишайников Юго-Востока Беларуси – *Cladonia arbuscula*, *Evernia prunastri*, *Hypogymnia physodes*, *Ramalina pollinaria*, *Xanthoria parietina* – в отношении опухолевой линии клеток MCF-7.

Методы исследований. *Получение экстрактов лишайников.* 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 г. Гомеля на типичных для каждого вида субстратах. Талломы высушивали до воздушно-сухого состояния, измельчали. Навески измельченной биомассы экстрагировали ацетоном, бензолом, гексаном, метанолом, хлороформом, этанолом и этилацетатом в аппарате Со-кслета. Растворитель удаляли с помощью ротационного испарителя. Полученные экстракты хранили в сухом темном месте при температуре -18°C.

Подготовка стабильных клеточных линий. Использовали культуру опухолевых клеток карциномы молочной железы человека MCF-7. Культура клеток была получена в НИЛ физиологии кафедры физиологии человека и животных Белорусского государственного университета. Режим культивирования стандартный: 37°C, 90 % влажности воздуха с 5 % содержанием CO₂, коэффициент субкультивирования 1/5. Состав среды: DMEM/F-12, 11039 GIBCO; 100 Ед/мл пенициллин; 100 мкг/мл стрептомицин; 0,25 мкг/мл амфотерицин-В; 10 % инактивированной эмбриональной телячьей сыворотки, HiCloneInc.

Инкубация клеток с экстрактами. Культуру клеток преинкубировали в 96-и луночных планшетах до достижения ими фазы экспоненциального роста. Затем вносили в лунки планшета раствор экстракта, серийно разведенный в питательной среде, в диапазоне концентраций 200–0,78 (мкг/мл). По прошествии 48 ч. оценивали жизнеспособность клеток по методу, описанному ниже. Подробно схема инкубации описана в статье [9].

Для определения модификации фототоксических эффектов после периода преинкубации в планшете культуру клеток пошагово экспонировали в каждом ряду лунок планшета заданное время на поверхности стеклянного УФ-фильтра системы гель-документации Chemidoc (Biorad), предварительно добавив в питательную среду растворы экстрактов лишайников в концентрациях 2,5; 5,0 и 10,0 мкг/мл. Использовали параметры и схему облучения, описанные в статье [10]. Жизнеспособность клеток определяли по методу, описанному ниже.

Жизнеспособность клеточных популяций в эксперименте определяли с помощью МТТ-теста, определяющего метаболическую активность клеток – тест на скорость восстановления 3-[4,5-диметилтиазол-2-ил]-2,5-дифенилтетразолия бромид (MTT, M5655, Sigma) [11].

Анализ выживаемости клеток в экспериментальных условиях проводили с помощью аппроксимации полученных зависимостей «доза-эффект» или «концентрация-эффект» уравнением Хилла с варибельным коэффициентом наклона. Для статистической проверки гипотез о различии действия отдельных экстрактов сравнивали параметры экспериментальных кривых выживаемости клеток сопоставлением регрессионных моделей на вложенность методом F-теста [12]. Анализ результатов исследования производили с помощью программных продуктов Graph Pad Prism (Version 8.01) и Microsoft Excel. Для оценки связи экспериментальных факторов и исследуемых свойств экстрактов использовали метод множественной регрессии, с кодировкой категориальных независимых переменных. Анализ результатов исследования производили с помощью программных продуктов GraphPad Prism (Version 8.01) и Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение. Количественно токсичность экстрактов определяли по концентрации, ингибирующей жизнеспособность клеток в эксперименте на 50 % (IC₅₀, мкг/мл), полученной на основании аппроксимации кривой ингибирования жизнеспособности клеток. Аналогичным образом определяли величины ингибирования 10 % и 90 % жизнеспособности клеток. Относили экстракты к цитотоксичным на основании критерия рекомендованным Национальным институтом онкологии США (NCI) [13]. В результате токсичными экстрактами в отношении изучаемой опухолевой культуры клеток можно считать: ацетоновый, гексановый, хлороформный, этилацетатный из вида *Cladonia arbuscula*; ацетоновый и гексановый из *Evernia prunastri*; ацетоновый и этанольный экстракт из *Hypogymnia physodes*; хлороформный из вида *Ramalina pollinaria*; хлороформный и этилацетатный из *Xanthoria parietina* (таблица 1).

Таблица 1 – Различные аналитические величины цитотоксического эффекта экстрактов из лишайников в линии MCF-7, оцененные с помощью МТТ-теста после 48 часов инкубации

Экстракты		IC ₁₀ , мкг/мл	IC ₅₀ , мкг/мл	IC ₉₀ , мкг/мл
<i>Cladonia arbuscula</i>	ацетон	<1,00	4,18 ± 0,46	5,89
	бензол	<1,00	54,35 ± 7,28	155,30
	гексан	7,24	24,46 ± 1,57	79,47

Окончание таблицы 1

	метанол	6,89	$46,92 \pm 8,20$	>200
	хлороформ	1,66	$9,50 \pm 0,63$	>200
	этанол	<1,00	$59,67 \pm 12,45$	45,04
	этилацетат	2,75	$14,81 \pm 1,11$	>200
<i>Evernia prunastri</i>	ацетон	<1	$5,62 \pm 1,08$	11,71
	бензол	<1	$51,36 \pm 3,73$	93,74
	гексан	14,26	$29,71 \pm 1,97$	59,88
	метанол	25,39	$102,40 \pm 46,99$	>200
	хлороформ	7,2	$45,07 \pm 8,97$	92,34
	этанол	<1	$64,13 \pm 8,23$	>200
	этилацетат	22,86	$57,72 \pm 4,80$	87,68
<i>Hypogymnia physodes</i>	ацетон	1,97	$4,08 \pm 0,79$	5,67
	бензол	<1	$37,55 \pm 3,73$	99,20
	гексан	17,47	$35,08 \pm 2,66$	68,36
	метанол	33,79	$70,84 \pm 4,40$	136,3
	хлороформ	9,093	$32,77 \pm 3,55$	121,00
	этанол	4,67	$7,07 \pm 0,34$	8,37
	этилацетат	9,019	$36,60 \pm 3,53$	150,30
<i>Ramalina pollinaria</i>	ацетон	21,89	$49,92 \pm 4,15$	77,14
	бензол	1,12	$34,19 \pm 3,433$	91,47
	гексан	17,29	$37,64 \pm 2,72$	79,78
	метанол	36,01	$71,97 \pm 8,44$	136,40
	хлороформ	<1	$10,40 \pm 1,096$	29,85
	этанол	11,44	$58,46 \pm 6,48$	156,20
	этилацетат	<1	$45,96 \pm 8,041$	117,10
<i>Xanthoria parietina</i>	ацетон	49,04	$102,20 \pm 9,35$	>200
	бензол	5,31	$30,66 \pm 4,62$	>200
	гексан	22,58	$69,95 \pm 8,44$	>200
	метанол	19,41	$108,60 \pm 26,29$	>200
	хлороформ	<1	$14,21 \pm 2,96$	80,79
	этанол	23,85	$81,98 \pm 9,95$	>200
	этилацетат	<1	$20,05 \pm 2,96$	55,67

Оценивали влияние экспериментальных факторов («вид» и «экстрагент») на количественный показатель цитотоксичности экстрактов (IC_{50} , мкг/мл) методом множественной регрессии. На основании коэффициента множественной регрессии, растворители, взятые для экстракции лишайников, обуславливали 38 % ($R^2 = 0,38$; при $p = 0,0268$) вариации количественного показателя цитотоксичности.

По показателям бета-коэффициентов извлечения экстракты, полученные с помощью хлороформа, обладают на 21,33 мкг/мл более низким значением полуингибирующей концентрации ($\beta = -21,33$ мкг/мл; $p = 0,0014$). Метанольные экстракты, наоборот, менее токсичны и имеют на 36,43 мкг/мл более высокую концентрацию половинного ингибирования клеток ($\beta = 36,43$ мкг/мл; $p = 0,0469$). Экстрагирование с помощью ацетона, гексана, этанола и этилацетата не вносит значимых и достоверных изменений в цитотоксические свойства экстрактов (рисунок 1). Видовая принадлежность лишайника, взятого для получения экстракта, достоверно не влияет на изменение их цитотоксических свойств ($R^2 = 0,17$; при $p = 0,22$).

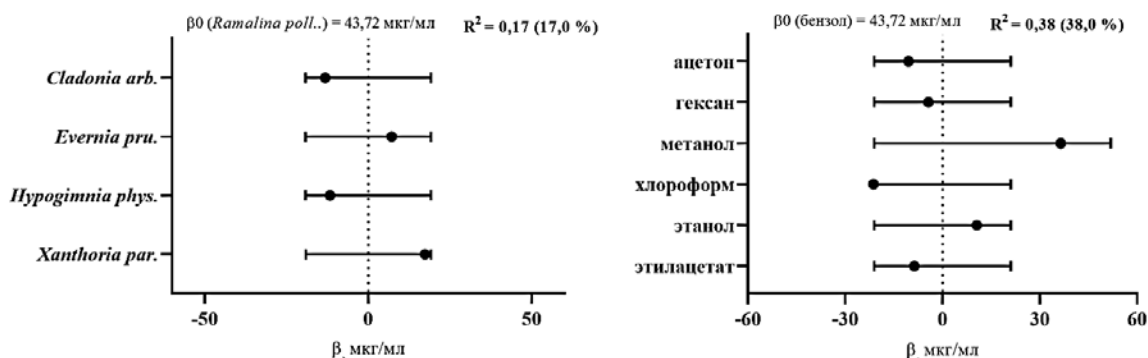


Рисунок 1 – Влияние различных экспериментальных факторов на цитотоксические свойства экстрактов

Таким образом, можно говорить, что в значительной степени цитотоксические свойства экстрактов обуславливаются применяемыми для их получения растворителями. Изменение данных свойств хорошо соотносится с природой экстрагента. Для полярных протонных растворителей (метанол и этанол) характерно получение в среднем менее токсичных экстрактов. Применение полярных апротонных и неполярных растворителей (ацетон, бензол, гексан, хлороформ, этилацетат) позволяет получить субстанции с повышенными токсическими свойствами.

Оценивали способность экстрактов усиливать повреждающее действие ультрафиолета на клетки через фактор фотосенсибилизации (ФФ):

$$\text{ФФ} = \frac{\text{ID}_{50}(\text{опыт})}{\text{ID}_{50}(\text{контроль})},$$

где ID_{50} (опыт) – величина полулетальной дозы облучения клеток при добавлении в питательную среду экстрактов лишайников; ID_{50} (контроль) – то же, без добавления экстрактов лишайников.

Для этого облучали клетки градиентом доз, вызывающих суб-, полу и летальные эффекты. Аппроксимировали полученные кривые выживаемости для определения полулетальной дозы ультрафиолета в отношении клеток, культивируемых с экстрактами из лишайников и без них. По критерию отсутствия выраженных токсических свойств в большинстве случаев были выбраны следующие концентрации – 2,5 мкг/мл, 5 мкг/мл и 10 мкг/мл.

Некоторые экстракты проявили способность полностью подавлять жизнеспособность клеток при облучении их самыми малыми дозами ультрафиолета. В данном случае сложно оценить реальную полулетальную дозу излучения для опытной группы, поэтому она принималась за теоретически минимальную – 0,02 мДж/см².

Большинство экстрактов обладали концентрационно-зависимыми фотосенсибилизирующими свойствами. Из них, как наиболее сильные фотосенсибилизаторы, можно охарактеризовать следующие экстракты: ацетоновые, этилацетатные, гексановые, бензольные и хлороформные, выделенные из видов *Evernia prunastri*, *Hypogymnia physodes*, *Ramalina pollinaria*; ацетоновый из *Ramalina pollinaria* и бензольный из *Cladonia arbuscula*. В концентрации 2,5 мкг/мл наблюдается слабый фотозащитный эффект (ФФ = 0,82 у бензольного экстракта из *Hypogymnia physodes*), либо усиление действия ультрафиолета до 2,83 раз – гексановый из *Ramalina pollinaria*. В концентрации 5 мкг/мл усиливается летальное действие излучения вплоть до 31,17 раз – гексановый из *Ramalina pollinaria*. Дальнейшее увеличение концентрации перечисленных экстрактов способствует усилению повреждающих свойств ультрафиолетового излучения до 254,31 раз (гексановый и ацетоновый из *Hypogymnia physodes*; гексановые, бензольные и хлороформные из *Evernia prunastri* и *Ramalina pollinaria*, бензольный из *Cladonia arbuscula*) (таблица 2).

Более слабым сенсибилизирующим действием обладали экстракты, выделенные из биомассы лишайников при помощи метанола и этанола. В концентрации 2,5 мкг/мл ряд извлечений данной группы не способен оказывать какого-либо достоверного эффекта: метанольные из *Evernia prunastri*, *Hypogymnia physodes* и *Xanthoria parietina*, а также этанольные из *Evernia prunastri* и *Ramalina pollinaria*. Либо же проявляет сравнительно слабый эффект – ФФ = 1,35–2,24 (у метанольных из *Ramalina pollinaria* и *Cladonia arbuscula*, а также этанольных из *Cladonia arbuscula* и *Xanthoria parietina*).

Таблица 2 – Величины модификации цитотоксического действия ультрафиолета экстрактами из лишайников в отношении опухолевых клеток MCF-7

Экстракты		ID ₅₀ , мДж/см ²		
		ФИЦ		
1		2,5 мкг/мл	5 мкг/мл	10 мкг/мл
2		3	4	
<i>Cladonia arbuscula</i>	ацетон	0,02 254,31	0,02 254,31	0,02 254,31
	бензол	2,36 ± 0,61 2,50	1,50 ± 0,46 3,94	0,02 254,31
	гексан	0,02 254,31	0,02 254,31	0,02 254,31
	метанол	3,79 ± 0,21 1,56	2,72 ± 0,39 2,17	0,26 ± 0,077 22,31
	хлороформ	0,02 254,31	0,02 254,31	0,02 254,31

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5
	этанол	4,39 ± 0,57 1,35	2,37 ± 0,82 2,49	0,33 ± 1,29 17,89
	этилацетат	0,02 254,31	0,02 254,31	0,02 254,31
<i>Evernia prunastri</i>	ацетон	4,25 ± 0,59 1,39	3,99 ± 0,58 1,48	2,75 ± 0,81 2,15
	бензол	4,03 ± 0,36 1,47	1,34 ± 0,11 4,41	0,02 254,31
	гексан	4,98 ± 0,40 1,18	0,28 ± 0,078 20,80	0,02 254,31
	метанол	5,36 ± 0,30 1,10	5,33 ± 0,35 1,11	4,21 ± 0,35 1,40
	хлороформ	3,30 ± 0,26 1,79	1,41 ± 0,11 4,18	0,02 254,31
	этанол	6,67 ± 0,36 0,88	5,50 ± 0,32 1,07	3,78 ± 0,42 1,56
	этилацетат	5,62 ± 0,32 1,05	3,58 ± 0,37 1,65	0,58 ± 0,13 10,25
<i>Hypogymnia physodes</i>	ацетон	3,40 ± 0,99 1,73	1,58 ± 0,36 3,73	0,02 254,31
	бензол	7,21 ± 0,50 0,82	5,11 ± 0,66 1,16	0,21 ± 0,097 28,42
	гексан	2,90 ± 0,1 2,03	1,24 ± 0,35 4,76	0,02 254,31
	метанол	4,82 ± 0,30 1,22	4,82 ± 0,28 1,22	2,10 ± 0,24 2,81
	хлороформ	3,88 ± 0,30 1,52	1,64 ± 0,18 3,59	0,03 ± 0,016 189,04
	этанол	4,96 ± 0,31 1,19	2,56 ± 0,31 2,30	0,44 ± 0,12 13,41
	этилацетат	4,00 ± 0,37 1,48	2,30 ± 0,37 2,56	0,10 ± 0,043 57,56
<i>Ramalina pollinaria</i>	ацетон	3,64 ± 0,30 1,62	2,07 ± 0,18 2,85	0,59 ± 0,10 9,99
	бензол	3,33 ± 0,38 1,77	0,35 ± 0,10 17,10	0,02 254,31
	гексан	2,09 ± 2,83	0,19 ± 0,068 31,17	0,02 254,31
	метанол	4,05 ± 0,28 1,46	3,79 ± 0,21 1,56	0,55 ± 0,082 10,71
	хлороформ	3,45 ± 0,24 1,71	1,26 ± 0,11 4,70	0,02 254,31
	этанол	5,62 ± 0,40 1,05	5,76 ± 0,39 1,02	2,83 ± 0,28 2,08
	этилацетат	3,28 ± 0,30 1,80	2,07 ± 0,28 2,85	0,07 ± 0,04 84,23
<i>Xanthoria parietina</i>	ацетон	0,68 ± 0,38 8,67	0,33 ± 0,14 17,80	0,21 ± 0,11 27,76
	бензол	0,25 ± 0,059 23,72	0,16 ± 0,042 37,01	0,21 ± 0,05 28,74
	гексан	1,69 ± 1,13 3,49	1,37 ± 1,64 4,30	0,97 ± 1,41 6,11
	метанол	4,94 ± 0,57 1,19	4,02 ± 0,44 1,47	2,88 ± 0,36 2,05
	хлороформ	0,14 ± 0,053 43,29	0,07 ± 0,032 89,86	0,03 ± 0,026 172,46
	этанол	2,63 ± 0,26 2,24	1,74 ± 0,21 3,38	0,94 ± 0,14 6,25
	этилацетат	0,93 ± 0,15 6,34	0,54 ± 0,10 10,90	0,12 ± 0,051 47,93

Примечание: жирным шрифтом отмечено достоверное отличие полулетальной дозы от контрольной ($ID_{50} = 5,93 \pm 0,29$ мДж/см²), при $p = 0,05$.

Двух- и четырехкратное увеличение концентрации позволяет выявить усиление их фотосенсибилизационных свойств. Минимальный эффект у метанольного экстракта из *Ramalina pollinaria* в концентрации 5 мкг/мл (ФФ = 1,56), максимальный – у метанольного из *Cladonia arbuscula* в концентрации 10 мкг/мл (ФФ = 22,31) (таблица 2).

Выделена группа экстрактов, фотосенсибилизирующее действие которых не зависит от вносимой в питательную среду концентраций: экстракты из *Cladonia arbuscula* и *Xanthoria parietina*. Полученные субстанции способны, независимо от концентрации, полностью подавлять жизнеспособность клеток при их облучении в самых малых дозах ультрафиолетового излучения – экстракты из *Cladonia arbuscula* (усиление эффекта в 254,31 раз). Экстракты из *Xanthoria parietina* обладают менее выраженными, но достаточно сильными фотосенсибилизирующими свойствами, усиливая действие излучения на клетки в 3,5–172,5 раз, при этом наблюдаемый эффект также не зависит от применяемых концентраций (таблица 2).

По результатам множественной регрессии, фотосенсибилизирующие свойства экстрактов почти в равной степени зависят от вида лишайника (29,4 %; $R = 0,294$; при $p = 0,0001$), применяемого растворителя (34,2 %; $R = 0,342$; при $p = 0,0001$) и вносимой концентрации (36,6 %; $R = 0,366$; при $p = 0,0001$). Анализ показателей бета-коэффициентов регрессии позволил составить следующий ряд убывания фотосенсибилизирующих свойств различных экстрактов: хлороформные ($-4,87$ мДж/см² при $p = 0,0001$) > гексановые ($-4,84$ мДж/см² при $p = 0,0001$) > этилацетатные ($-4,34$ мДж/см² при $p = 0,0001$) > ацетоновые ($-4,32$ мДж/см² при $p = 0,0001$) > бензольные ($-4,15$ мДж/см² при $p = 0,0001$) > этанольные ($-2,521$ мДж/см² при $p = 0,0116$) > метанольные ($-2,313$ мДж/см² при $p = 0,0203$). Аналогичный ряд составлен для используемых для экстракции видов лишайников: *Cladonia arbuscula* ($-5,044$ мДж/см² при $p = 0,0001$) > *Xanthoria parietina* ($-4,71$ мДж/см² при $p = 0,0001$) > *Ramalina pollinaria* ($-3,75$ мДж/см² при $p = 0,0002$) > *Hypogymnia physodes* ($-3,35$ мДж/см² при $p = 0,0009$) > *Evernia prunastri* ($-2,70$ мДж/см² при $p = 0,0067$). Увеличение концентрации, в среднем снижает полулетальную дозу для клеток при использовании всех экстрактов на $-2,653$ ($p = 0,0032$), $-3,843$ ($p = 0,0001$), $-5,177$ ($p = 0,0001$) мДж/см² – для 2,5 5 и 10 мкг/мл соответственно (рисунок 2).

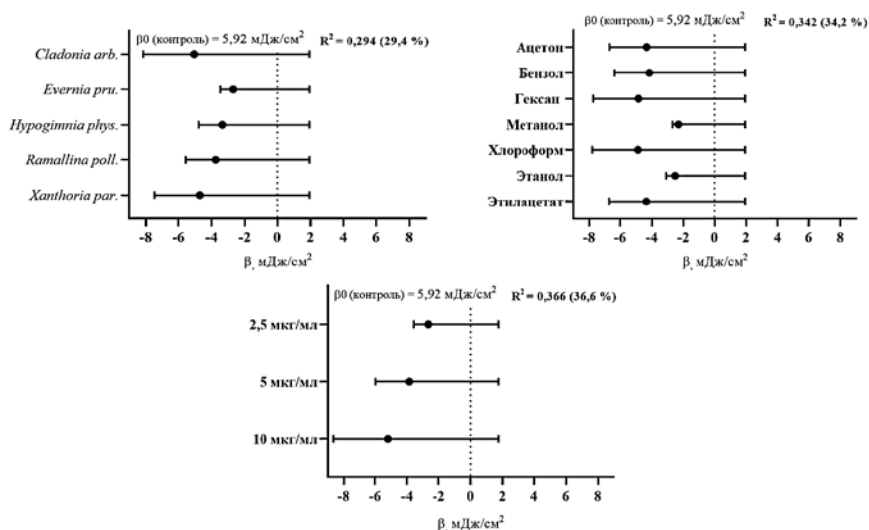


Рисунок 2 – Влияние различных экспериментальных факторов на фотомодификационные свойства экстрактов

Полученные данные говорят о способности принятых к исследованию экстрактов подавлять жизнеспособность опухолевой культуры клеток как за счет собственных цитотоксических свойств, так и посредством усиления повреждающего действия ультрафиолетового излучения. Определены факторы, детерминирующие цитотоксические и фотомодифицирующие свойства экстрактов, что может являться теоретическим обоснованием для получения субстанций с заданными свойствами. Использование малых концентраций экстрактов в оценке их фотомодифицирующих свойств, по всей видимости, позволяет получить некоторые концентрации основных метаболитов, не обладающих собственной токсичностью, но при этом усиливающих повреждающее действие ультрафиолетового излучения. При этом, фотомодифицирующее действие

субстанций почти полностью обуславливается экспериментальными условиями получения и применения экстракта. Цитотоксичность экстрактов детерминируется подобными факторами в меньшей степени, однако их влияние на свойства экстрактов все еще достаточно велико.

Заключение. Выявлены цитотоксические эффекты в отношении опухолевой линии клеток человека MCF-7 у следующих экстрактов из лишайников: ацетоновый, гексановый, хлороформный, этилацетатный из вида *Cladonia arbuscula*; ацетоновый и гексановый из *Evernia prunastri*; ацетоновый и этанольный экстракт из *Hypogymnia physodes*; хлороформный из вида *Ramalina pollinaria*; хлороформный и этилацетатный из *Xanthoria parietina*.

Все принятые к исследованию экстракты продемонстрировали разную фотосенсибилизирующую активность в отношении линии карциномы человека. Наиболее сильную сенсибилизирующую активность проявила группа экстрактов (ацетоновые, этилацетатные, гексановые, бензольные и хлороформные), выделенных из пяти исследуемых видов лишайников, способных уменьшать полулетальную дозу ультрафиолета в 2,83–254,31 раз. Метанольные и этанольные экстракты проявили более слабую активность, усиливая воздействие излучения на клетки до 22,31 раз.

Выявлена обусловленность цитотоксических свойств экстрактов от используемых для их получения экстрагентов на 38 %. Фотосенсибилизирующие свойства экстрактов почти полностью детерминируются экспериментальными факторами: взятым для экстракции видом лишайника на 29,4 %, режимом экстракции на 34,2 %, применяемой концентрацией на 36,6 %. Обобщая результаты множественной регрессии, можно сделать вывод о преобладании фотосенсибилизирующих свойств в экстрактах, полученных с помощью неполярных или полярных апротонных растворителей. А также о повышении фотосенсибилизирующих свойств экстрактов с ростом их концентрации в питательной среде.

Литература

1. Huneck, S. Identification of lichen substances / S. Huneck, I. Yoshimura // Identification of lichen substances. – Springer, 1996. – P. 11–123.
2. UV-protectant metabolites from lichens and their symbiotic partners / K.-H. Nguyen [et al.] // Natural product reports. – 2013. – Vol. 30, № 12. – P. 1490–1508.
3. Herbal extracts, lichens and biomolecules as natural photo-protection alternatives to synthetic UV filters. A systematic review / M. Radice [et al.] // Fitoterapia. – 2016. – Vol. 114. – P. 144–162.
4. Protection against UVB irradiation by natural filters extracted from lichens / F. Rancan [et. al.] // Journal of Photochemistry and Photobiology. – 2002. – Vol. 68 (2-3). – P. 133–139.
5. Ranković, B. Lichen secondary metabolites: bioactive properties and pharmaceutical potential / B. Ranković. – New York ; Cham : Springer International Publishing, 2015. – 202 p.
6. Rojas, J. L. Metabolites with antioxidant and photo-protective properties from *Usnea roccellina* Motyka, a lichen from Colombian Andes / J. L. Rojas, M. Díaz-Santos, N. A. Valencia-Islas // Pharmaceutical and Biosciences Journal. – 2015. – № 3. – P. 18–26.
7. Lichens – Photophysical studies of potential new sunscreens / F. Boehm [и др.] // Journal of Photochemistry and Photobiology. B: Biology. – 2009. – Vol. 95, № 1. – P. 40–45.
8. Evaluation of the sunscreen lichen substances usnic acid and atranorin / M. Varol [et al.] // Biocell. – 2015. – Vol. 39, № 1. – P. 25–31.
9. Храменкова, О. М. Цитотоксическая активность экстрактов из четырех видов лишайников в отношении культур опухолевых клеток / О. М. Храменкова, М. В. Матвеенков // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. – 2018. – № 2. – С. 88–98.
10. Храменкова, О. М. Фотозащитная активность экстрактов из пяти видов лишайников в отношении кератиноцитов человека (HaCAT) / О. М. Храменкова, М. В. Матвеенков // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. – 2018. – № 4. – С. 52–62.
11. Van Meerloo, J. Cell sensitivity assays : the MTT assay / J. Van Meerloo, G. J. L. Kaspers, J. Cloos. // Cancer cell culture / A. Cree Lan. – Totowa, 2011. – Ch. 20. – P. 237–245.
12. Motulsky, H. Fitting models to biological data using linear and nonlinear regression : a practical guide to curve fitting / H. Motulsky, A. Christopoulos. – Oxford University Press, 2004. – 351 p.
13. Mitrović, T. Antioxidant, antimicrobial and antiproliferative activities of five lichen species / T. Mitrović, S. Stamenković, V. Cvetković // International Journal of Molecular Sciences. – 2011. – Vol. 12, № 8. – P. 5428–5448.

УДК 577.121:612.438]:612.392.61-06:612.014.482

Влияние глутамата на энергетический метаболизм тимуса в условиях окислительного стресса, вызванного действием ионизирующего излучения и пероксинитрита

И.А. НИКИТИНА

Глутаминовая кислота оказывает стимулирующий эффект на скорость поглощения кислорода тканями тимуса и тимоцитами крыс разного возраста в контроле и в условиях окислительного стресса, вызванного действием ионизирующего излучения и пероксинитрита. Более эффективно глутаминовая кислота влияет на ткани тимуса в отдаленные сроки (30–60 суток) после действия ионизирующего облучения в дозе 0,5 Гр. Увеличение дозы облучения снижает эффекты глутаминовой кислоты. Влияние глутаминовой кислоты на скорость поглощения кислорода тимоцитами в условиях окислительного стресса более выражено у молодых животных.

Ключевые слова: тимус, тканевое дыхание, тимоциты, глутамат, амитал, инволюция тимуса, кислород, полярографический метод.

Glutamic acid has a stimulating effect on the rate of oxygen uptake by thymus tissues and thymocytes of rats of different ages in control and under oxidative stress caused by acute exposure to ionizing radiation and peroxynitrite. Glutamic acid has a more prominent effect on the respiration of thymus tissues at a late stage (30–60 days) after exposure to ionizing radiation in a dose of 0,5 Gy. Increasing the radiation dose reduces the stimulating effects of glutamic acid. The effect of glutamic acid on the rate of oxygen uptake by thymocytes under conditions of oxidative stress is more pronounced in young animals.

Keywords: thymus, tissue respiration, thymocytes, glutamate, amytal, thymus involution, oxygen, polarographic method.

Введение. Тимус (вилочковая железа) – центральный орган иммунной системы, обеспечивающий процессы формирования Т-клеток, достаточно чувствителен к действию различных повреждающих факторов, таких как стресс, инфекция и другие [1]. Результатом действия таких факторов является нарушение метаболизма тимоцитов, увеличение скорости апоптоза этих клеток и активация возрастных деструктивных процессов всей системы Т-клеточного иммунитета [1]. Более глубокое понимание молекулярных механизмов, опосредующих такие воздействия, позволит совершенствовать методы коррекции дисфункций Т-клеточного звена иммунной системы.

Формирование и поддержание функциональной активности иммунной системы является важной задачей организма, требующей значительных энергетических затрат [2]. Образование АТФ, основного энергетического субстрата клетки, происходит, в первую очередь, путем окислительного фосфорилирования в митохондриях. Помимо синтеза АТФ, митохондрии обеспечивают протекание целого ряда других метаболических процессов, в том числе связанных с продукцией эндогенных активных форм кислорода (АФК). Последние, вероятно, играют двойную роль в метаболизме тимуса: участвуют в процессах формирования тимоцитов, с одной стороны, и могут вызывать окислительные повреждения клеток, в первую очередь, ретикулярных эпителиоцитов – с другой. Нарушение функций эпителиоцитов приводят к атрофии тимуса – процессу, обуславливающему возрастную инволюцию этого органа [3].

Эффекты ионизирующего излучения, опосредуемые АФК и активными формами азота (АФА) и, как результат, окислением целого ряда органических молекул клетки, зависят от окислительно-восстановительного статуса организма [4]. Так, согласно свободнорадикальной теории старения, снижение с возрастом системы антиоксидантной защиты вызывает патологические изменения, обусловленные накоплением большого количества свободных радикалов, что является хорошо известным триггером клеточного старения и может вызывать ускоренную инволюцию тимуса [3].

Разные этапы жизненного цикла Т-клетки характеризуются определенными метаболическими программами, обусловленными различной способностью поглощать и использовать те или иные молекулы субстратов в качестве источников энергии [2], [5]. Дефицит Т-клеточного иммунитета, обусловленного повреждением тимуса и/или его возрастной инволюцией, приводит к развитию целого ряда патологических процессов, коррекция которых возможна, в том числе и

путем модуляции метаболизма клеток этого органа [1]. Регуляция метаболизма Т-клеток осуществляется, в том числе посредством действия различных метаболитов. К последним, помимо цитокинов, факторов роста и гормонов, относятся питательные вещества [6] в том числе аминокислот [7].

Одной из наиболее распространенных аминокислот в организме является глутаминовая кислота [8], [9]. На сегодняшний день проведен ряд исследований, посвященных активному использованию аминокислот, в том числе глутаминовой, в энергетических процессах в клетках печени [10], кишечника [11], нейронов и миоцитов сердца [12]. Исследования последних лет указывают на низкую вероятность токсического действия высоких концентраций глутамата на метаболизм клеток центральной нервной системы. Данное опасение не позволяло окончательно решить вопрос о ее безопасном использовании в качестве пищевой добавки [13]. В научной литературе отмечается положительное влияние глутаминовой кислоты на клеточный иммунитет [8], ее выраженные антиоксидантные свойства в условиях окислительного стресса [8], [14] и способность восстанавливать клеточный гомеостаз [9]. Все это позволяет рассматривать глутаминовую кислоту в качестве важного метаболического субстрата.

Цель исследования состоит в оценке действия глутамата на энергетический метаболизм тимоцитов и тканей тимуса в условиях окислительного стресса, вызванного действием ионизирующего излучения и пероксинитрита.

Материалы и методы. Исследования проведены на белых крысах-самцах, содержащихся в условиях вивария на стандартном рационе. В эксперименте использовали животных 3-, 4- и 8-месячного возраста. При проведении экспериментальных исследований были учтены все требования Директивы 2010/63/EU Европейского Парламента и Совета Европейского Союза по охране животных, используемых в научных целях (2012).

Состояние энергетического обмена определяли по скорости потребления кислорода тканями тимуса и тимоцитами, регистрируемой полярографическим методом [14]. Исследуемые образцы помещали в полярографическую ячейку объем 2 см³ для тканевых и 1 см³ для клеточных препаратов. Определение концентрации кислорода в системах проводилось с использованием закрытого платинового электрода Кларка и установки Record 4 (ИТЭБ РАН, Пушкино, Россия) и выражалось в нмоль O₂/мин на 1 мг белка исследуемой ткани или нмоль O₂ за 1 минуту на 10⁷ клеток. Чувствительность метода позволяет определять концентрацию кислорода до 1 нМ/л. Каждый вариант эксперимента включал 5 животных. Количество повторностей измерений (n) составляло 1–3 на каждое животное.

Ткани тимуса для исследований получали путем механической пермеабилзации в среде Хэнкса в течение первых 30 минут после тимэктомии.

Полярографические исследования тимоцитов предварялись химической пермеабилзацией клеточных мембран 0,005-процентным раствором дигитонина [15].

Окислительный стресс создавался действием общего внешнего ионизирующего излучения, *in vivo*, а также действием пероксинитрита *in vitro*. Острое общее внешнее воздействие γ -излучения создавалось на установке «ИГУР-1» (источник ¹³⁷Cs, мощность экспозиционной дозы 0,92 Гр/мин) с экспозиционными дозами 0,5 и 1 Гр. Состояние клеток тимуса оценивали на 3-и, 10-е, 30-е и 60-е сутки после облучения. Влияние АФК изучалось при использовании ONOO⁻ – наиболее активного метаболита NO[•]. ONOO⁻ синтезируется при взаимодействии подкисленного H₂O₂ с нитритом натрия [16]. Концентрацию ONOO⁻ измеряли спектрометрически на длине волны 302 нм с помощью спектрофотометра СФ-46 (ЛОМО). В исследованиях использовали концентрации ONOO⁻ 30 и 120 мкМ.

Скорость поглощения кислорода тканевыми препаратами оценивали на эндогенных субстратах (V_{энд}) и при добавлении в полярографическую ячейку 10 мМ глутамата натрия (V_{глу}).

Скорость поглощения кислорода клеточными препаратами оценивали на эндогенных субстратах (V_{энд}) и при добавлении в полярографическую ячейку 5 мМ глутамата натрия (V_{глу}). Наряду с этим, оценивали параметры тканевого дыхания при ингибировании первого комплекса дыхательной цепи 5 мМ амитала натрия (V_{ам}) и при действии 50 мкМ физиологического стимулятора системы тканевого дыхания – АДФ (ВАДФ).

Для оценки относительного вклада митохондриального дыхания в суммарное потребление кислорода тимоцитами использовали ингибитор четвертого комплекса дыхательной цепи – азид натрия [17]. Титриметрическим методом одномолярный раствор азидата натрия вносили в полярографическую ячейку с тимоцитами, добиваясь максимального снижения скорости потребления кислорода (V_{аз}) [18].

Полученные данные после проверки на соответствие закону нормального распределения с использованием критерия хи-квадрат Пирсона, представлены медианой (М) и границами верхнего и нижнего квартилей (Q_1 и Q_3 соответственно) в формате М (Q_1 – Q_3). Сравнение разных выборок проводили с помощью критерия Манна-Уитни (для независимых переменных) и критерия Вилкоксона (для зависимых). Различие признавалось статистически значимым при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение. Результаты исследований показывают, что ткани тимуса интактных половозрелых крыс характеризуются относительно высоким уровнем тканевого дыхания, составляющим 6,6 (5,6–8,0) нмоль O_2 /мин $\times$ 1 мг белка и сопоставимым со скоростью поглощения кислорода другими тканями, например, печенью [19]. Высокая скорость потребления кислорода тканями тимуса, отражающая уровень аэробного обмена, косвенно указывает на наличие здесь активно протекающих процессов пролиферации, роста, дифференцировки и созревания клеток иммунной системы.

Введение в среду инкубации тканей тимуса натриевой соли глутаминовой кислоты, субстрата первого комплекса дыхательной цепи, повышает уровень потребления кислорода (критерий Вилкоксона; $p < 0,05$) до 7,8 (7,2–9,1) нмоль O_2 /мин $\times$ 1 мг белка.

Окислительный стресс, смоделированный острым воздействием общего внешнего γ -излучения в дозе 0,5 Гр, приводит к тому, что на 3 сутки после облучения наблюдается резкое уменьшение скорости потребления кислорода в тканях тимуса до 2,7 (2,2–3,4), что составляет около 40 % от данного показателя в контроле (рисунок 1). В дальнейшем уровень потребления кислорода постепенно возрастает и практически достигает контрольных значений к 60-м суткам. Резкое снижение потребления кислорода соответствует, как описано в литературе [20], стадии острой стресс-реакции, обусловленной нарушением структуры и функций различных клеточных макромолекул, что сопровождается радиационной гибелью тимоцитов. Согласно литературным данным [21], подобные воздействия снижают количество тимоцитов на срок вплоть до 20-и суток, а к 60-м суткам популяция тимоцитов частично восстанавливается. Острое воздействие ионизирующего излучения в дозе 1 Гр приводит, как и в случае с облучением в дозе 0,5 Гр, к снижению скорости потребления кислорода тканями тимуса (рисунок 1). Исследования S.Z. Liu et al. [22] указывают на дозозависимое увеличение количества апоптотических тимоцитов вследствие действия ионизирующего излучения в дозе свыше 0,5 Гр. Однако восстановление уровня потребления кислорода тканями тимуса у животных, подвергнутых действию ионизирующего излучения в дозе 1 Гр, происходит быстрее по сравнению с последствиями воздействия 0,5 Гр. Уже к 30 суткам уровень потребления кислорода восстанавливается до контрольных значений. В дальнейшем, к 60-м суткам, скорость поглощения кислорода превышает уровень контроля более чем на 20 %. Уровень потребления кислорода в тканях тимуса, облученных в дозе 0,5 Гр, достигает значений, характерных для контроля, только к 60-м суткам (рисунок 1). Восстановление уровня тканевого дыхания с течением времени во многом обусловлено регенерацией незрелых Т-клеток, с одной стороны, и миграцией их из костного мозга – с другой. Однако более активный рост потребления кислорода в тканях тимуса, облученных в более высокой дозе, может объясняться участием кислорода в усиливающемся синтезе АФК. Как известно, концентрация этих соединений в тканях зависит от дозы облучения [23].

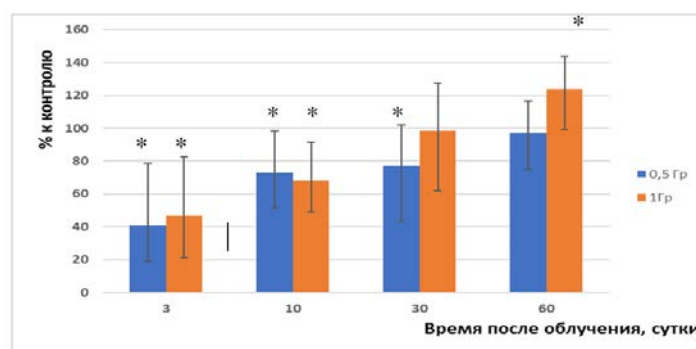


Рисунок 1 – Относительный уровень тканевого дыхания тимуса крыс в разные сроки после воздействия ионизирующего облучения в дозе 0,5 Гр и 1 Гр

Примечание: данные приведены в процентах от соответствующего показателя в контроле; * – различия статистически значимы в сравнении с соответствующим параметром в контроле.

Введение в среду инкубации тканей тимуса, подвергнутых действию ионизирующего облучения, субстрата I комплекса дыхательной цепи – глутамата натрия позволило установить, что на 3-и и 10-е сутки его стимулирующее действие значительно снижается и составляет около 50 % в сравнении с аналогичным показателем в контроле (рисунок 2). В отличие от уровня эндогенного дыхания, восстановление которого происходит только к 60 суткам, скорость поглощения кислорода в присутствии глутамата натрия достигает аналогичных показателей контроля уже к 30-м суткам (рисунок 2). Ткани, облученные в дозе 1 Гр, также демонстрируют снижение скорости тканевого дыхания в присутствии глутамата натрия в сравнении с контролем (рисунок 2).

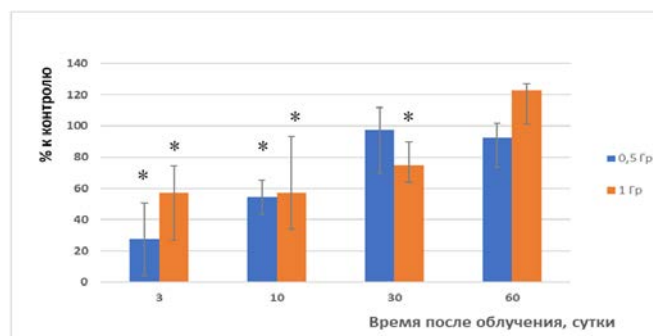


Рисунок 2 – Уровень тканевого дыхания тимуса крыс в присутствии глутамата натрия в разные сроки после воздействия ионизирующего облучения в дозе 0,5 Гр и 1 Гр

Примечание: данные приведены в процентах от соответствующего показателя в контроле; * – различия статистически значимы в сравнении с соответствующим параметром в контроле.

Для более детального анализа энергетического метаболизма тимуса в условиях окислительного стресса и возможного влияния на него глутаминовой кислоты был проанализирован уровень потребления кислорода непосредственно тимоцитами. Окислительный стресс в данном эксперименте моделировали действием пероксинитрита. Для анализа использовали животных двух возрастных групп: ювенильные (3 месяца) и молодые (8 месяцев). Параметры тканевого дыхания тимоцитов оценивались не по общей скорости потребления кислорода этими клетками, а по скорости использования кислорода непосредственно дыхательной цепью митохондрий. Для этого рассчитывалась скорость азидрезистентного дыхания (V_{az}), составляющего примерно 30 % от общего потребления кислорода в тимоцитах животных обеих возрастных групп. Потребляемый в присутствии азида кислород, при условии характерного для тимоцитов низкоактивного микросомального окисления, отражает преимущественно активность перекисных процессов.

Митохондриальное потребление кислорода на эндогенных субстратах тимоцитами 3- и 8-месячных животных составляет 5,8 (4,97–7,11) и 5,7 (4,56–6,65) нмоль O_2 /мин $\times 10^7$ клеток соответственно. Статистически значимого различия между исследуемыми возрастными группами не установлено (Kruskal-Wallis ANOVA; $p > 0,05$).

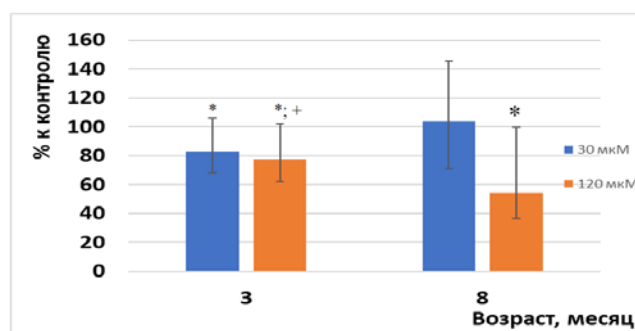


Рисунок 3 – Уровень тканевого дыхания тимоцитов животных разного возраста (нмоль O_2 /мин $\times 10^7$ клеток) после добавления в среду пероксинитрита

Примечание: + – различия статистически значимы в сравнении с соответствующим параметром другой возрастной группы ($p < 0,05$; критерий Манна-Уитни); * – различия статистически значимы в сравнении с соответствующим параметром до обработки пероксинитритом.

При действии пероксинитрита в концентрации 30 и 120 мкМ наблюдается снижение скорости митохондриального поглощения кислорода (рисунок 3). Так, обработка тимоцитов 30 мкМ пероксинитрита значительно уменьшает скорость потребления кислорода у 3-месячных животных ($p < 0,05$, критерий Манна-Уитни), но у 8-месячных – значимых изменений не наблюдается ($p > 0,05$ в сравнении с контролем, критерий Манна-Уитни). Увеличение концентрации пероксинитрита до 120 мкМ приводит к снижению скорости поглощения кислорода как у 3-, так и у 8-месячных животных ($p < 0,05$, критерий Манна-Уитни) и появлению достоверных различий в скорости поглощения кислорода у животных разных возрастных групп. Это обусловлено более значительным (до 46 %) снижением скорости поглощения кислорода тимоцитами крыс старшей возрастной группы (рисунок 3).

В ответ на добавление глутаминовой кислоты скорость потребления кислорода митохондриями тимоцитов животных обеих возрастных групп значительно увеличивается (рисунок 4). При этом для тимоцитов животных 3-месячного возраста $V_{\text{глу}}$ превышает показатели эндогенного дыхания на 35 %, но у 8-месячных животных разница между $V_{\text{глу}}$ и $V_{\text{энд}}$ не столь выражена. В связи с этим проявляются достоверные различия $V_{\text{глу}}$ у двух разновозрастных групп ($p < 0,05$; критерий Манна-Уитни). Добавление пероксинитрита в концентрации 30 мкМ приводит к снижению скорости $V_{\text{глу}}$ в тимоцитах 3-месячных животных и сохранению показателей $V_{\text{глу}}$ в тимоцитах 8-месячных животных в сравнении с соответствующими параметрами контроля. Кроме этого, сохраняются достоверные различия между $V_{\text{глу}}$ у 3- и 8-месячных животных (рисунок 4). Увеличение концентрации пероксинитрита до 120 мкМ приводит к снижению скорости потребления кислорода в тимоцитах животных обеих возрастных групп. При этом более значительное падение скорости поглощения кислорода наблюдается в тимоцитах старшей возрастной группы.

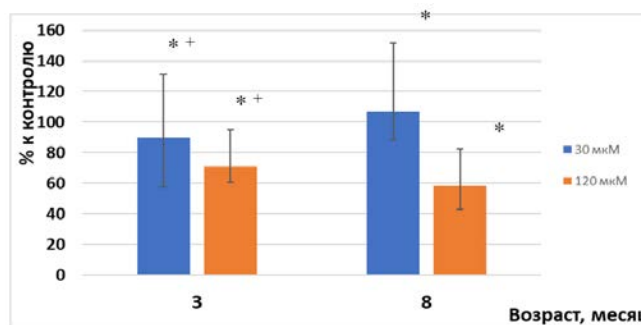


Рисунок 4 – Уровень тканевого дыхания тимоцитов животных разного возраста (нмоль O_2 /мин $\times 10^7$ клеток) после добавление глутаминовой кислоты

Примечание: данные приведены в процентах от соответствующего показателя в контроле; + – различия статистически значимы в сравнении с соответствующим параметром другой возрастной группы ($p < 0,05$; критерий Манна-Уитни); * – различия статистически значимы в сравнении со скоростью дыхания на эндогенных субстратах ($p < 0,05$; критерий Вилкоксона).

Выводы.

1. Ткани тимуса характеризуются относительно высоким уровнем тканевого дыхания, способным повышаться приблизительно на 20 % при увеличении доступности глутаминовой кислоты.
2. Глутаминовая кислота оказывает стимулирующее действие на скорость поглощения кислорода тимоцитами крыс как 3-, так и 8-месячного возраста, но более эффективен данный дыхательный субстрат в отношении тимоцитов более молодых животных.
3. Окислительный стресс, вызванный действием ионизирующего излучения, вызывает резкое падение уровня тканевого дыхания на 3-и сутки после облучения с последующим практически полным восстановлением к 30-м суткам при дозе 1 Гр и к 60-м суткам – при дозе 0,5 Гр. Глутаминовая кислота позволяет быстрее восстановить скорость поглощения кислорода в тканях тимуса до уровня контроля при облучении в дозе 0,5 Гр.
4. Окислительный стресс, вызванный пероксинитритом в концентрации 30 и 120 мкМ, снижает скорость потребления кислорода тимоцитами крыс обеих возрастных групп. При этом у

8-месячных животных это падение более выражено, особенно при более высокой концентрации пероксинитрита. Глутаминовая кислота оказывает более выраженный эффект восстановления аэробного дыхания тимоцитов после действия пероксинитрита у молодых животных.

Литература

1. Kinsella, S. When the damage is done : Injury and repair in thymus function / S. Kinsella, J. A. Dudakov // *Frontiers in Immunology*. – 2020. – Vol. 11. – P. 1745.
2. Fox, C. J. Fuel feeds function : energy metabolism and the T-cell response / C. J. Fox, P. S. Hammerman, C. B. Thompson // *Nature Reviews. Immunology*. – 2005. – Vol. 5, № 11. – P. 844–852.
3. Implications of Oxidative Stress and Cellular Senescence in Age-Related Thymus Involution / A. Barbouti [et al.] // *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. – 2020. – Vol. 2020. – P. 7986071.
4. The influence of redox status on inter-individual variability in the response of human peripheral blood lymphocytes to ionizing radiation / J. Pajic [et al.] // *International Journal of Radiation Biology*. – 2018. – Vol. 94, № 6. – P. 569–575.
5. Michalek, R. The metabolic life and times of a T-cell / R. Michalek, J. Rathmell // *Immunological reviews*. – 2010. – Vol. 236. – P. 190–202.
6. Chi, H. Sin1–mTORC2 signaling drives glycolysis of developing thymocytes / H. Chi // *Journal of Molecular Cell Biology*. – 2018. – Vol. 11, № 2. – P. 91–92.
7. Buck, M. D. T cell metabolism drives immunity / M. D. Buck, D. O’Sullivan, E. L. Pearce // *The Journal of Experimental Medicine*. – 2015. – Vol. 212, № 9. – P. 1345–1360.
8. Krishnamurthy, R. V. Nitrogen isotopes provide clues to amino acid metabolism in human colorectal cancer cells / R. V. Krishnamurthy, Y. R. Suryawanshi, K. Essani // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7, № 1. – P. 2562.
9. Salyha, N. Effect of L-glutamic acid and pyridoxine on immunological and hematological parameters under the action of epinephrine- induced stress in rats / N. Salyha // *Lesya Ukrainka Eastern European National University Scientific Bulletin. Series, Biological Sciences*. – 2019. – № 3. – P. 131–136.
10. Jungas, R. L. Quantitative analysis of amino acid oxidation and related gluconeogenesis in humans / R. L. Jungas, M. L. Halperin, J. T. Brosnan // *Physiological Reviews*. – 1992. – Vol. 72, № 2. – P. 419–448.
11. Burrin, D. G. Emerging aspects of dietary glutamate metabolism in the developing gut / D. G. Burrin, M. J. Janeczko, B. Stoll // *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*. – 2008. – Vol. 17, № 1. – P. 368–371.
12. NCX and EAAT transporters in ischemia : At the crossroad between glutamate metabolism and cell survival / S. Piccirillo [et al.] // *Cell Calcium*. – 2020. – Vol. 86. – P. 102160.
13. The Glutamate Dehydrogenase Pathway and Its Roles in Cell and Tissue Biology in Health and Disease / A. Plaitakis [et al.] // *Biology*. – 2017. – Vol. 6, № 1. – P. E11.
14. Measuring Mitochondrial Function : From Organelle to Organism / M. T. Lewis [et al.] // *Methods in Molecular Biology*. – 2022. – Vol. 2497. – P. 141–172.
15. Polarographic evaluation of mitochondrial enzymes activity in isolated mitochondria and in permeabilized human muscle cells with inherited mitochondrial defects / L. Wenchich [et al.] // *Physiological Research*. – 2003. – Vol. 52, № 6. – P. 781–788.
16. Robinson, K. M. Synthesis of Peroxynitrite from Nitrite and Hydrogen Peroxide / K. M. Robinson, J. S. Beckman // *Methods in Enzymology : Nitric Oxide, Part E*. – Academic Press, 2005. – Vol. 396. – P. 207–214.
17. Mitochondria / edit. L. A. Pon, E. A. Schon. – 2nd ed. – Amsterdam ; Boston, 2007. – 944 p.
18. Brown, G. C. Control of respiration and ATP synthesis in mammalian mitochondria and cells / G. C. Brown // *Biochemical Journal*. – 1992. – Vol. 284, № 1. – P. 1–13.
19. Сергеев, С. М. Тканевое дыхание миокарда, печени и тимуса белых крыс после внешнего облучения в дозе 1 Гр. / С. М. Сергеев [и др.] // *Актуальные проблемы токсикологии и радиобиологии : сб. науч. ст. Росс. науч. конф. с международным участием*. – СПб., 2011. – С. 141.
20. Влияние ионизирующего излучения на дыхание тимоцитов крыс / Т. И. Гудзь [и др.] // *Радиобиология*. – 1990. – Т. 30, № 6. – С. 760–764.
21. Динамика восстановления субпопуляций Т-лимфоцитов после действия различных повреждающих агентов / Е. К. Гринько [и др.] // *Иммунология*. – 2021. – Т. 42, № 4. – С. 346–355.
22. Liu, S. Z. Thymocyte apoptosis in response to low-dose radiation / S. Z. Liu, Y. C. Zhang [et al.] // *Mutat Res*. – 1996. – Vol. 358, № 2. – P. 185–91.
23. Altered Induction of Reactive Oxygen Species by X-rays in Hematopoietic Cells of C57BL/6-Tg (CAG-EGFP) Mice / C. Liu [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2021. – Vol. 22, № 13. – P. 6929.

Влияние длительного отсутствия рубок промежуточного пользования на состояние и устойчивость сосновых насаждений в дальней зоне чернобыльских выпадений

А.М. ПОТАПЕНКО¹, Н.В. МИТИН², А.К. КОЗЛОВ¹, Н.В. ТОЛКАЧЕВА¹

Исследована жизнеспособность и санитарное состояние сосновых насаждений дальней зоны чернобыльских выпадений, пройденных рубками промежуточного пользования. Установлено, что отсутствие в молодых и средневозрастных насаждениях рубок ухода в течение одного десятилетия приводит к усыханию до 10 % объема древостоя, а в течение двух десятилетий – объем сухостоя составляет более 20 % от общего запаса. В приспевающих насаждениях соответственно за аналогичные периоды образуется сухостоя в 2–3 раза меньше, чем в молодняках и средневозрастных насаждениях.

Ключевые слова: сосновые леса, радионуклиды, рубки ухода, санитарное состояние, жизнеспособность.

The viability and sanitary condition of pine stands in the far zone of the Chernobyl fallout was studied. It was found that the absence of thinning in young and middle-aged stands during one decade leads to the drying out of up to 10 % of the volume of the stand, and during two decades, the volume of deadwood is more than 20 % of the total stock. In mature stands, respectively, during the same periods the amount of deadwood is 2–3 times less than in young and middle-aged stands.

Keywords: pine forests; radioactive nuclides; thinning operations, sanitary condition, viability.

Введение. До аварии на ЧАЭС в лесах Республике Беларусь был достигнут высокий уровень лесохозяйственной деятельности. Рубки ухода проводились регулярно в соответствии с установленной периодичностью, в результате чего из насаждений убирались деревья низших категорий санитарного состояния. В итоге сосновые насаждения, в том числе и в 30-километровой зоне ЧАЭС, имели повышенные индексы состояния (от 1,2 до 1,7). В настоящее время состояние загрязненных ¹³⁷Cs сосновых древостоев значительно ухудшилось по сравнению с их доаварийным состоянием. В частности, средний индекс состояния сосновых древостоев увеличился на 43,7 % [1].

Масштабное загрязнение территории Республики Беларусь в результате аварии на ЧАЭС существенно сказалось на ведении лесного хозяйства, рациональном использовании лесов, их устойчивости. Ограничения на проведение рубок в лесах с плотностью загрязнения почвы ¹³⁷Cs более 15 Ки/км² привели к накоплению валежа и сухостоя в хвойных лесах, доля которых составляет в настоящее время около 57 %. Накопление отпада привело к захламленности насаждений, потере ими экологической устойчивости, развитию очагов первичных и вторичных вредителей [2].

Все эти негативные процессы сказываются на противопожарном и санитарном состоянии насаждений. Ограничения в хозяйственной деятельности за послеаварийный период привели к полной деградации лесной дорожной и квартальной сети (кроме дорог общего пользования) вследствие захламления, зарастания. Если густота лесной дорожной сети в чистых лесах с нормальной хозяйственной деятельностью в Беларуси составляет в настоящее время 1,81 км на 100 га, то в загрязненных зонах она фактически на порядок ниже. Результатом является ограничение доступа транспорта и доставка специальных средств в лесные массивы в случае пожаров и стихийных бедствий.

Цель данной работы – определить жизнеспособность и санитарное состояние сосновых насаждений дальней зоны чернобыльских выпадений, пройденных рубками промежуточного пользования спустя 20–25 лет после аварии на ЧАЭС.

Объекты и методы исследования. Влияние рубок ухода, произведенных в сосновых насаждениях в зонах с плотностью загрязнения почвы ¹³⁷Cs 15–40 Ки/км² спустя 20–25 лет после аварии на ЧАЭС, на их санитарное и жизненное состояние изучено на радиологических стационарах «Побужье» (далее – Пб) и «Ветка» (далее – В) [1]. На стационарах изучалось влияние рубок промежуточного пользования.

Объекты заложены по общепринятым в лесоводстве, лесной таксации и геоботанике методикам [3]–[5]. Статистическая обработка полученных данных проводилась с помощью компьютерных программ Excel 2019, Statistica 6.0.

Исследование санитарного состояния сосновых насаждений проводилось в соответствии с Санитарными правилами в лесах Республики Беларусь [6]. Состояние древостоев оценивалось:

– по индексу состояния [7], который рассчитывался для каждой пробной площади по формуле (1):

$$I_n = \frac{\sum I_k \cdot n}{N}, \quad (1)$$

где I_n – индекс состояния насаждения; I_k – балл деревьев для определения категории состояния; n – количество деревьев данной категории состояния; N – количество деревьев на пробной площади;

– по индексу жизненного состояния [8], который определялся по формуле (2):

$$ИЖС = (100n_1 + 70n_2 + 40n_3 + 5n_4) / N, \quad (2)$$

где ИЖС – индекс жизненного состояния; n_1 – количество здоровых, n_2 – ослабленных, n_3 – сильно ослабленных, n_4 – усыхающих; N – количество всех учтенных деревьев.

Средний класс роста и развития деревьев по Крафту для каждого насаждения определялся по формуле (3):

$$K_{ср} = \frac{\sum k \cdot n}{\sum n}, \quad (3)$$

где k – индекс класса роста; n – число деревьев данного класса роста.

Результаты и их обсуждение. Исследование санитарного состояния сосновых насаждений 4 и 5 классов возраста проводилось по двум вариантам опыта: насаждения, пройденные проходными рубками спустя 20–25 лет после аварии на ЧАЭС и насаждения, в которых рубки леса не проводились (контроль). Показатели санитарного состояния в насаждениях, пройденных рубками ухода и без них представлены в таблице.

Из таблицы видно, что на исследуемых пробных площадях наибольшее распространение в древостоях, где были проведены рубки ухода, имеют деревья 2-й (Пб – 51,0 %, В – 46,5 %) и 3-й категорий (Пб – 33,9 %, В – 37,3 %) санитарного состояния. На контроле (Пб-К и В-К), где не проводились рубки ухода, количество деревьев 2-й категории составляет 17,8–21,1 %, 3-й категории – 52,4–60,1 %.

Следует отметить, что доля деревьев 3-й категории на участках контроля оказалась выше в 1,6 раза по сравнению с участком, где были проведены рубки ухода, а деревьев 2-й категории – в 2,4–2,6 раза ниже, соответственно.

Деревья 1-й категории санитарного состояния (здоровые) составляют незначительную долю как на пробных площадях, где проводились рубки ухода, так и на контроле. Доля деревьев 4, 5 и 6-й категорий санитарного состояния на участках контроля также оказалась выше, чем на участках, где были проведены рубки ухода. Следовательно, после проведения рубок ухода санитарное состояние насаждений по сравнению с участками, где рубки ухода не проводились, улучшается.

Таблица – Показатели устойчивости сосны обыкновенной в насаждениях 4 и 5 классов возраста, пройденных проходными рубками и без них

Наименование ПП	Возраст древостоя, лет		Всего деревьев, шт./%	Категория санитарного состояния древостоя						индекс состояния; индекс жизненного состояния, %	Запас, м ³ /га	
	на момент закладки ПП	на 2017 г.		1	2	3	4	5	6		сухостой	валеж
Пб – проходная рубка	66	88	298	17	152	101	5	10	13	2,59	24,0	12,3
			100,0	5,7	51,0	33,9	1,7	3,4	4,3	55,05		
Пб – контроль	64	86	313	4	66	164	18	20	41	3,34	54,9	35,7
			100,0	1,3	21,1	52,4	5,8	6,4	13,1	37,28		
В – проходная рубка	54	62	142	6	66	53	9	6	2	2,64	15,3	25,3
			100,0	4,2	46,5	37,3	6,3	4,2	1,4	52,01		
В – контроль	54	62	163	2	29	98	15	14	5	3,15	38,4	56,8
			100,0	1,2	17,8	60,1	9,2	8,6	3,1	38,19		

При этом жизненное состояние древостоев сосны по средним показателям на объектах в сосняках, пройденных рубками ухода, характеризуется категорией жизненного состояния – «поврежденные», а на участках без них – «сильно поврежденные». При этом средний индекс жизненного состояния (ИЖС) сосны на участках рубок ухода составил 53,5 %, а на контроле – 37,7 % (рисунок 1).

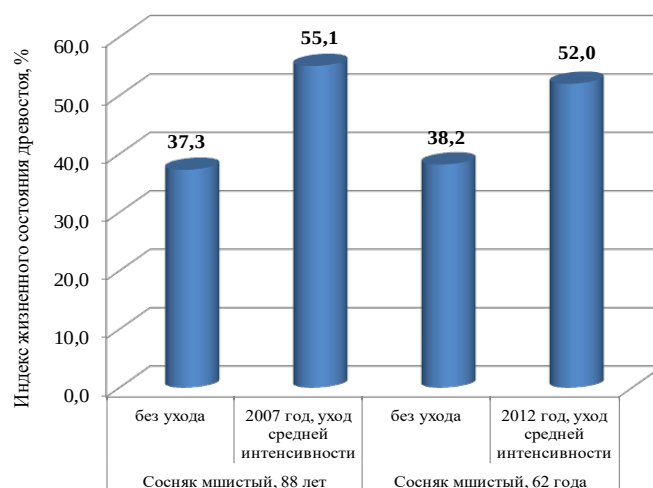


Рисунок 1 – Жизненное состояние сосновых насаждений после проведения рубок ухода в дальней зоне чернобыльских выпадений

Установлено, что в сосновых насаждениях, пройденных проходными рубками, существенных изменений в распределении деревьев по продуктивности насаждений не произошло, в то же время отмечается увеличение в 2,3–2,5 раза запаса сухостоя и валежа на контроле с участками, где велись рубки ухода.

Таким образом, восстановление биологической устойчивости сосновых насаждений в зонах с загрязнением свыше 15 Ки/км^2 может быть осуществлено посредством проведения рубок ухода средней интенсивности.

На основе материалов исследований, полученных в дальней зоне чернобыльских выпадений, изучено наличие связи различных таксационных показателей сосновых насаждений в разных группах возраста с показателями их устойчивости при отсутствии лесоводственных уходов.

Оценка санитарного состояния средневозрастных и приспевающих сосновых древостоев, не пройденных рубками ухода, позволила установить влияние полноты насаждения на их санитарное состояние (рисунок 2).

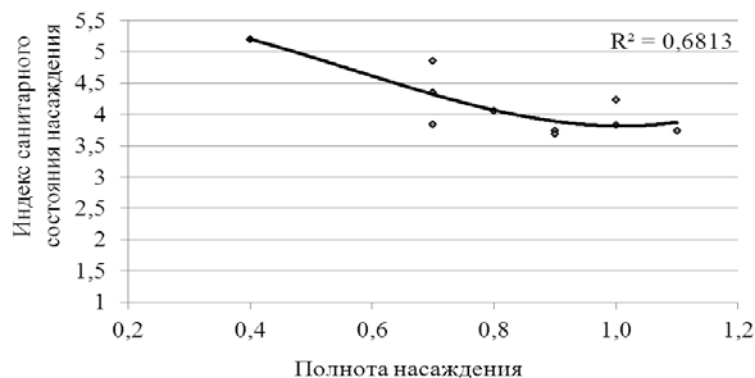


Рисунок 2 – Изменение санитарного состояния в разнополнотных приспевающих сосновых насаждениях дальней зоны чернобыльских выпадений при отсутствии рубок ухода

В приспевающих насаждениях дальней зоны чернобыльских выпадений подтверждается известный факт о зависимости санитарного состояния сосновых насаждений от их полноты ($r^2 = 0,68$). Максимальное накопление сухостоя отмечается в насаждениях с полнотой 0,4. С увеличением полноты насаждения от 0,4 до 1,1 санитарное состояние характеризуется переходом от усыхающего состояния до сильно ослабленного.

Как следует из рисунка 3, в средневозрастных сосновых насаждениях, не пройденных рубками ухода, при полноте от 0,5 до 1,3 индекс санитарного состояния не имеет достоверных различий с полнотой насаждения.

На устойчивость деревьев сосны обыкновенной в сосновых насаждениях дальней зоны чернобыльских выпадений значительное влияние оказывает и накопление в них отпада (рисунок 4).

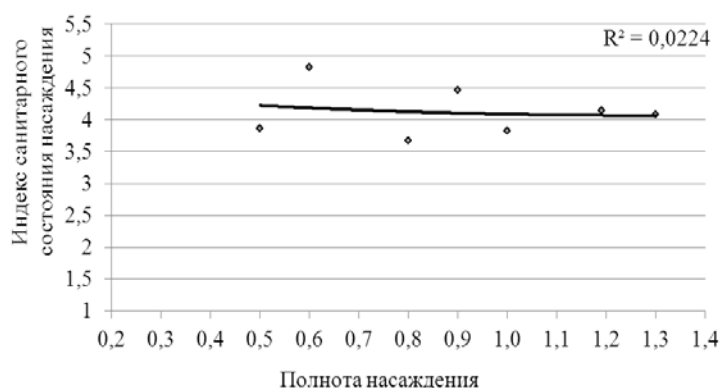


Рисунок 3 – Изменение санитарного состояния в разнополнотных средневозрастных сосновых насаждениях дальней зоны чернобыльских выпадений при отсутствии рубок ухода



Рисунок 4 – Влияние периода отсутствия уходов на отпад в сосновых насаждениях разного класса возраста

Анализ образовавшегося сухостоя на объектах исследований за период от 8 до 22 лет показал, что при отсутствии рубок ухода до 8 лет в молодых древостоях запас отпада составляет лишь 10,9 % от общего запаса насаждения, но при увеличении периода отсутствия уходов он увеличивается. В средневозрастных древостоях при отсутствии рубок ухода в течение 14–20 лет отмечается образование отпада в среднем 28,1 % от общего запаса насаждения. В приспевающих насаждениях при отсутствии уходов в течение 17–20 лет запас отпада составляет 30,3 %, а в спелых – он снижается до 15,6 %, что объясняется снижением межвидового влияния между деревьями при приближении их к возрасту технической спелости.

В средневозрастных и приспевающих насаждениях установлен известный факт о зависимости накопления запасов сухостоя от периода отсутствия рубок ухода (рисунки 5 и 6).

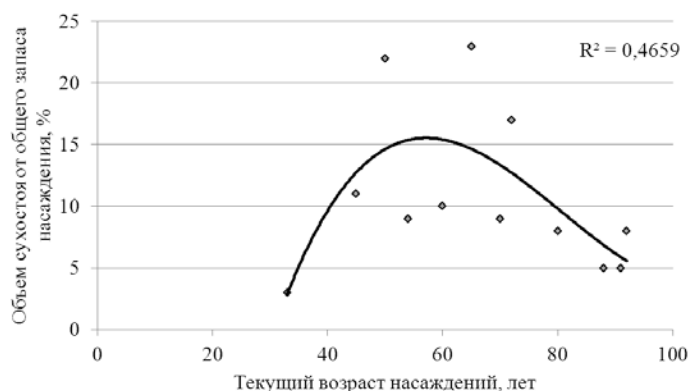


Рисунок 5 – Динамика объемов сухостоя в сосновых насаждениях разного возраста при отсутствии рубок ухода в дальней зоне чернобыльских выпадений

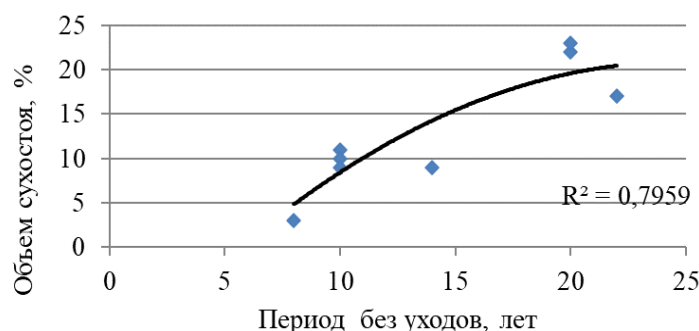


Рисунок 6 – Зависимость накопления запасов сухостоя в загрязненных радионуклидами средневозрастных и припевающих сосновых насаждениях от периода отсутствия рубок ухода

Заключение. На устойчивость деревьев сосны обыкновенной в сосновых насаждениях дальней зоны чернобыльских выпадений в условиях длительного отсутствия рубок промежуточного пользования значительное влияние оказывает накопление в них сухостоя. Установлено, что в молодняках и средневозрастных сосновых насаждениях в течение одного-двух десятилетий отмечается усыхание до 20 % объема древостоя от общего запаса. Наибольший отпад деревьев сосны (30–40 % от общего запаса насаждений) отмечается в средневозрастных и припевающих насаждениях. Отсутствие лесохозяйственной деятельности в них привело к накоплению сухостоя и валежа в 2,3–2,5 раза по сравнению с насаждениями, пройденными рубками ухода.

Литература

1. Исследование хода сукцессионных процессов в высокозагрязненных радионуклидами сосновых лесах в отдаленный послеаварийный период и разработка комплекса мер по стабилизации в них экологической обстановки : отчет о НИР (закл.) / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т леса ; рук. Н. И. Булко. – Гомель, 2018. – 133 с. – № ГР 20160837.
2. Булко, Н. И. Состояние дочернобыльских сосновых лесов в 30-километровой зоне ЧАЭС / Н. И. Булко [и др.] // Известия ГГУ им Ф. Скорины. – 2020. – № 6 (123). – С. 22–27.
3. Нормативные материалы для таксации леса Белорусской ССР / Под общ. рук. В. Ф. Багинского. – М., 1984. – 308 с.
4. Общесоюзные нормативы для таксации лесов : справочник / В. В. Загребев [и др.]. – М. : Колос, 1992. – 495 с.
5. Программа и методика биогеоценотических исследований / Под ред. Н. В. Дылиса. – М. : Наука, 1974. – 403 с.
6. Санитарные правила в лесах Республики Беларусь : утв. постановлением Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь от 19 декабря 2016 г. № 79. – Минск : Минлесхоз, 2016. – 21 с.
7. Карпенко, А. Д. Оценка состояния древостоев, находящихся под воздействием промышленных эмиссий / А. Д. Карпенко // Экология и защита леса : межв. сб. науч. тр. – Л. : ЛТА, 1981. – Вып. 6. – С. 39–43.
8. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение / Под ред. В. А. Алексеева. – Л. : Наука. Ленингр. отделение, 1990. – 200 с.
9. Жилкин, Б. Д. Классификация деревьев по продуктивности (опыт разработки и применения классификации деревьев по продуктивности в однородных одновозрастных древостоях) / Б. Д. Жилкин. – М. : Лесная промышленность, 1965. – 108 с.

¹ГНУ «Институт леса НАН Беларуси»

²Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

К изучению сообществ жужелиц (Coleoptera, Carabidae) некоторых прибрежных экосистем Гомельской области с разной степенью рекреационной нагрузки

А.А. ПРОТЧЕНКО, Н.Г. ГАЛИНОВСКИЙ

В статье представлена оценка состояния сообществ жужелиц ряда прибрежных экосистем рек Сож и Днепр с разной степенью рекреационной нагрузки. Проанализирован видовой состав, выявлены экологические особенности, степень доминирования и параметры биоразнообразия в сообществах жужелиц. Установлено, что сообщества жужелиц четко реагируют на различные степени рекреационного воздействия изменением экологической структуры: появлением видов-супердоминантов, сокращением обилия зоофагов, изменением распределения биотопического предпочтения.

Ключевые слова: жужелицы, рекреационная нагрузка, прибрежные экосистемы, биоразнообразие, гидропреферендум, биопреферендум, пищевая специализация, жизненные формы.

The article presents an assessment of the ground beetle communities in a number of coastal ecosystems of the Sozh and Dnieper rivers with varying degrees of recreational load. The species composition, the ecological features, the degree of dominance and the biodiversity parameters in the ground beetle communities are analyzed. It has been established that ground beetle communities clearly respond to various grades of recreational load by changing the ecological structure: the uprising of superdominant species, a decrease in the abundance of zoophages, and a change in biotopical preference.

Keywords: ground beetle, recreational load, coastal ecosystems, biodiversity, hydropreference, biopreference, nutrition specialization, life forms.

Введение. Жужелицы являются активными элементами почвенной мезофауны, занимая ведущее положение в прибрежных экосистемах как по числу видов, так и по количеству особей. Исследования видового состава жесткокрылых-герпетобионтов береговых сообществ, в частности жужелиц, крайне важны, так как в настоящее время интенсивно идет процесс изменения естественных ландшафтов человеком, вследствие чего многие виды исчезают, уменьшают свою численность, а некоторые виды, наоборот, получают некоторые преимущества для обитания и развития. По изменениям видового состава сообщества можно с определенной долей уверенности судить об изменениях окружающей среды определенных территорий. В связи с этим подробные и комплексные исследования, связанные с оценкой влияния рекреационной нагрузки на сообщества жесткокрылых в современных условиях, актуальны и необходимы.

Цель наших исследований заключается в анализе возникающих изменений в сообществах жужелиц под влиянием рекреационной нагрузки, а также в комплексной оценке сообществ и разнообразии жужелиц прибрежных экосистем.

В нашей стране исследуются, как правило, такие крупные города как Минск, Гомель, Витебск, Гродно. Наиболее изученным в этом отношении является Минск. Исследования фауны и экологии жужелиц Минска активно проводились О.Р. Александровичем. В результате исследований было выявлено 13 новых видов жужелиц для фауны города Минска [1]. Проводилась оценка видового разнообразия и структуры населения прибрежных карабидокомплексов Верхнего Днепра и их изменения под воздействием антропогенных факторов [2]. В работе подчеркивается резкое сокращение видового разнообразия на территории, подвергнутой антропогенной нагрузке.

В Гомеле и Гомельской области в большей мере проводились исследования, связанные с изучением герпетобионтных жесткокрылых береговых сообществ реки Сож [3], [4]. Исследовались также прибрежные сообщества жесткокрылых реки Ипуть, где был отмечен новый вид для фауны Беларуси [5].

Место и методы исследований. Исследования проводились с июня по сентябрь 2021 г. включительно на трех стационарных участках с различной степенью рекреационной нагрузки.

Степень рекреационного воздействия оценивали по трем факторам: проективное покрытие, следы деятельности человека, посещаемость (таблица 1)

Таблица 1 – Степень рекреационного воздействия на прибрежные экосистемы

Фактор рекреационного воздействия	Степень рекреационного воздействия				
	I	II	III	IV	V
Проективное покрытие растительности	100 %	80 %	60 %	40 %	20 % и меньше
Следы деятельности человека	кострищ и мусора нет	1 кострище или мусор	2 кострища и / или бумага	3 кострища, бумага, пластик	более трех кострищ, бумага, пластик в значительных количествах
Посещаемость	нет	крайне редко	редко	часто	постоянно

Стационар «Днепр 1» – участок на берегу реки Днепр в аг. Заспа Речицкого района. Активно посещался людьми, присутствовали следы деятельности человека в виде кострищ и мусора. Проективное покрытие растительности составило – 100 %. Растительность представлена вейником наземным, лапчаткой гусиной, вероникой колосистой, вьюнком полевым, дурнишником обыкновенным, кульбабой щетинистой, осоками, злаковым разнотравьем, ивой козьей. Степень рекреационного воздействия – III балла (таблица 1).

Стационар «Днепр 2» – участок также располагался на берегу реки Днепр в аг. Заспа Речицкого района, однако практически не посещался людьми, не был загрязнен, выступал в качестве контрольного. Проективное покрытие растительности – 100 %. Из растительности преобладали: осоки, злаковое разнотравье, щавель конский, пижма обыкновенная, вероника колосистая, вьюнок полевой, кульбаба щетинистая, ослинник двулетний, вейник наземный, дурнишник обыкновенный, ива козья, малина. Степень рекреационного воздействия – I балл (таблица 1).

Стационар «Сож» – участок, расположенный на территории санатория «Машиностроитель», в километре от д. Ченки Гомельского района. Постоянно посещался отдыхающими, регулярно подвергался скашиванию травы, однако видимых загрязнений (мусор, кострища) на участке не было. Проективное покрытие растительности – 80 %. Из растительности преобладали: щавель малый, щавель конский, пижма обыкновенная, вероника колосистая, вьюнок полевой, одуванчик лекарственный, кульбаба щетинистая, льнянка, девясил иволистный, икотник серо-зеленый, злаковое разнотравье, древостой был представлен сосной обыкновенной, осинкой, грушей. Степень рекреационного воздействия – III балла (за счет прокосов и регулярных посещений рыбаками).

Сбор жесткокрылых проводился при помощи почвенных ловушек, которые представляли собой пластиковые стаканы (0,5 л), на треть заполненные формалином. На каждом участке размещали по 10 ловушек, смена которых осуществлялась раз в месяц.

Первичная база данных была составлена с использованием программы «LibreOffice Calc 7.3». Кластерный анализ, а также показатели разнообразия в исследованных сообществах были рассчитаны с помощью программного пакета «BioDiversity Pro 2.0». Анализ параметров разнообразия проведен с использованием индекса Шеннона, индекса концентрации доминирования (Симпсона), выравнивания по Пielу, а также графического метода описания – рангового распределения обилий, жизненные формы жуžелиц указаны согласно классификации, предложенной И.Х. Шаровой [6].

Результаты исследований. За период исследований было учтено 734 особи жуžелиц, относящихся к 51 виду из 22 родов (таблица 2). Наиболее богаты видами являются роды: *Amara* и *Harpalus* – по 8 видов, а также *Bembidion*, *Calathus*, *Carabus* и *Pterostichus* – по 4 вида. Среди встреченных видов *Carabus clathratus* и *Carabus cancellatus* занесены в Красную книгу Республики Беларусь [7]. Наибольшее количество видов и особей жуžелиц было отмечено на участке «Днепр 1» (41 вид и 310 особей), наименьшее – на стационаре «Сож» (24 вида и 157 особей), который в большей степени посещался отдыхающими. На контрольном участке «Днепр 2» зафиксировано 39 видов и 267 особей жуžелиц.

При анализе структуры доминирования (таблица 2) было отмечено три доминантных вида для всех участков – это *C. erratus*, *H. rufipes* и *M. minutulus*. Это обычные и фоновые виды, предпочитающие песчаные и супесчаные почвы [2], поэтому преобладание данных видов вполне обоснованно. Следует отметить жуžелиц *A. aenea* и *A. communis*, которые являлись абсолютными доминантами на стационаре «Сож» (21,02 % и 14,65 % соответственно), в то время как на участках «Днепр 1» и «Днепр 2» *A. aenea* являлась субдоминантом (3,87 % и 3,75 % соответственно), а *A. communis* – субрецидентом (0,97 %) и субдоминантом (3 %).

Также только на участке «Сож» в качестве доминанта был отмечен *C. micropterus* (5,1 %), на остальных же стационарах обилие данного вида составило менее 1 %. Жужелица *H. rubripes* доминировала на контрольном стационаре (5,99 %), на остальных территориях отмечена как субдоминант с долей менее 5 %. Также следует выделить жужелицу *P. versicolor*, которая доминировала на двух участках реки Днепр («Днепр 1» – 5,48 %, «Днепр 2» – 9,36 %), в то время как на участке «Сож» выявлена только как субрецидент (0,64 %). Есть и общий доминант на стационарах «Сож» и «Днепр 2» – *C. fuscipes* (12,74 % и 5,24 % соответственно). Для участков с высокой рекреационной нагрузкой «Сож» и «Днепр 1» общих доминантов не выявлено.

Таблица 2 – Видовой состав и обилие жужелиц (%) прибрежных экосистем

Вид	Стационарный участок		
	Сож	Днепр 1	Днепр 2
1	2	3	4
<i>Agonum impressum</i> (Panzer, 1797)	0	1,61	0
<i>Amara aenea</i> (De Geer, 1774)	21,02	3,87	3,75
<i>Amara bifrons</i> (Gyllenhal, 1810)	0,64	0	0,37
<i>Amara brunnea</i> (Gyllenhal, 1810)	0	0,97	0
<i>Amara communis</i> (Panzer, 1797)	14,65	0,97	3,00
<i>Amara fulva</i> (Degeer, 1774)	0,64	0,32	0
<i>Amara majuscula</i> (Chaudoir, 1850)	1,91	0	0,37
<i>Amara plebeja</i> (Gyllenhal, 1810)	0,64	0,65	0,37
<i>Amara tibialis</i> (Paykull, 1798)	0,64	0,32	1,12
<i>Anisodactylus binotatus</i> (Fabricius, 1787)	0	0	1,12
<i>Badister unipustulatus</i> (Bonelli, 1813)	0	0,32	0
<i>Bembidion lampros</i> (Herbst, 1784)	3,18	0,65	0
<i>Bembidion properans</i> (Stephens, 1828)	0	2,58	1,87
<i>Bembidion quadrimaculatum</i> (Linnaeus, 1761)	0,64	1,94	1,87
<i>Bembidion velox</i> (Linnaeus, 1761)	0	0	0,37
<i>Calathus erratus</i> (Sahlberg, 1827)	10,83	11,61	18,35
<i>Calathus fuscipes</i> (Goeze, 1777)	12,74	3,23	5,24
<i>Calathus melanocephalus</i> (Linnaeus, 1758)	0	0,65	2,62
<i>Calathus micropterus</i> (Duftschmid, 1812)	5,10	0,32	0,75
<i>Carabus cancellatus</i> (Lapoug, 1902)	0	2,58	2,25
<i>Carabus clathratus</i> (Linnaeus, 1761)	0	1,29	1,12
<i>Carabus granulatus</i> (Linnaeus, 1758)	0	2,26	0,37
<i>Carabus hortensis</i> (Linnaeus, 1758)	0	0	0,37
<i>Chlaenius tristis</i> (Schaller, 1783)	0	0,65	1,12
<i>Clivina fossor</i> (Linnaeus, 1758)	0	0	0,37
<i>Curtonotus aulicus</i> (Panzer, 1797)	0,64	0	0
<i>Dyschiriodes globosus</i> (Herbst, 1784)	0	0	0,37
<i>Dyschirius arenosus</i> (Stephens, 1827)	0	0,65	0,37
<i>Elaphrus riparius</i> (Linnaeus, 1758)	0	0,65	0
<i>Harpalus affinis</i> (Schränk, 1781)	1,27	0,32	0,37
<i>Harpalus anxius</i> (Duftschmid, 1812)	1,91	1,29	4,87
<i>Harpalus distinguendus</i> (Duftschmid, 1812)	0	0	0,75
<i>Harpalus flavescens</i> (Piller et Mitterpacher, 1783)	1,27	0,32	0
<i>Harpalus latus</i> (Linnaeus, 1758)	2,55	0,32	0,37
<i>Harpalus rubripes</i> (Duftschmid, 1812)	3,18	4,52	5,99
<i>Harpalus rufipes</i> (De Geer, 1774)	6,37	32,58	5,99
<i>Harpalus tardus</i> (Panzer, 1797)	0,64	0,65	4,49
<i>Leistus rufescens</i> (Fabricius, 1775)	0	0,32	0,75
<i>Microlestes minutulus</i> (Goeze, 1777)	7,64	5,16	9,36
<i>Notiophilus aquaticus</i> (Linnaeus, 1758)	0	0,32	0
<i>Oodes helopioides</i> (Fabricius, 1792)	0	1,94	0,37
<i>Oxytelus obscurus</i> (Herbst, 1784)	0	0,65	1,87
<i>Platynus assimilis</i> (Paykull, 1790)	0,64	0,65	0
<i>Poecilus cupreus</i> (Linnaeus, 1758)	0	0,32	0
<i>Poecilus versicolor</i> (Sturm, 1824)	0,64	5,48	9,36
<i>Pterostichus melanarius</i> (Illiger, 1798)	0,64	1,61	0,37

Окончание таблицы 2

1	2	3	4
<i>Pterostichus niger</i> (Schaller, 1783)	0	3,23	4,12
<i>Pterostichus nigrita</i> (Paykull, 1790)	0	0	0,75
<i>Pterostichus strenuus</i> (Panzer, 1797)	0	1,29	2,25
<i>Stenolophus mixtus</i> (Herbst, 1784)	0	0,32	0,37
<i>Stenolophus teutonius</i> (Schrank, 1781)	0	0,65	0
Всего экземпляров	157	310	267
Всего видов	24	41	39
Информационное разнообразие, H'	1,1	1,2	1,3
Концентрация доминирования, C	0,11	0,13	0,07
Выравненность по Пielу, e	0,8	0,74	0,83

Видовой состав жуелиц двух сообществ реки Днепр («Днепр 1» и «Днепр 2») имел высокое сходство (коэффициент Жаккара составил 0,6), в то же время видовая общность сообществ контрольного участка «Сож» и участков «Днепр 1» и «Днепр 2» была несколько ниже – 0,48 и 0,43. Это свидетельствует о высоком сходстве сообществ.

В ходе исследований были проанализированы основные показатели биоразнообразия в карабидокомплексах. В целом, для сообществ жуелиц всех исследованных стационаров характерны невысокие показатели индекса Шеннона (1,1–1,3), которые хоть и незначительно, но планомерно повышались по мере снижения рекреационной нагрузки. Для более полной оценки особенностей карабидокомплексов исследованных участков нами был составлен график рангового распределения обилий в исследованных сообществах (рисунок 1).

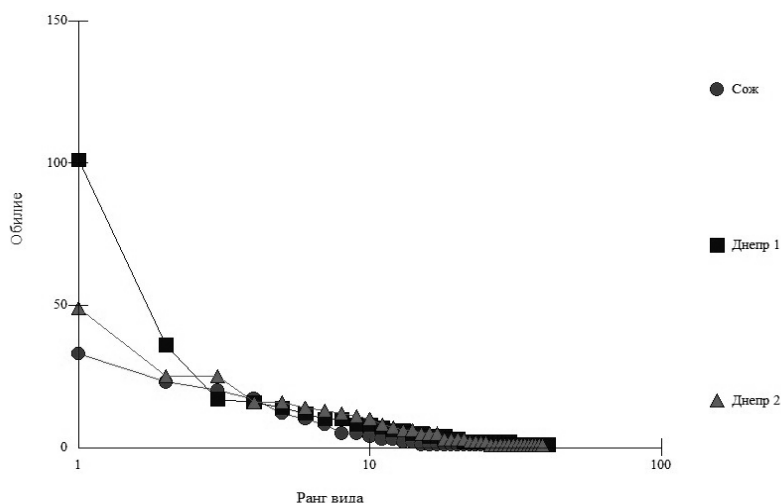


Рисунок 1 – Ранговое распределение обилий в исследованных сообществах жуелиц

Анализ представленных графиков показывает, что в сообществах жуелиц стационара «Днепр 1» наблюдается высокое обилие одного вида, в следствие чего выравненность на данном участке наиболее низкая – 0,74, а концентрация доминирования выше, чем на других стационарах – 0,13. Таким образом, линия ранжирования сообществ жуелиц «Днепр 1» соответствует лог-нормальному распределению, которое наблюдается в естественных ценозах. Это может свидетельствовать о зрелом, разнообразном и стабильном сообществе. В то же время выравненность на остальных участках высокая – 0,8 и 0,83 в сообществах «Сож» и «Днепр 2» соответственно, а концентрация доминирования ниже, чем на участке «Днепр 2» – 0,11 и 0,07 соответственно. Таким образом, распределение видов в карабидокомплексах стационара «Сож» и контрольного участка «Днепр 2», который подвергался наименьшей рекреационной нагрузке, соответствует модели «разломанного стержня» Макарута, что характерно для сообществ с неперекрывающимися нишами и интенсивной межвидовой конкуренцией.

В результате исследований была проанализирована экологическая структура сообществ жуелиц исследованных территорий: биопреферендум, гигропреферендум, трофическая структура и жизненные формы жуелиц.

При анализе биотопической приуроченности жуужелиц было выявлено 5 биопреферендумов: береговой, болотный, лесной, луговой, полевой. Карабидокомплексы всех исследованных территорий были сложены преимущественно полевыми – обилие особей варьировало в пределах от 55,41 % до 66,13 % (*A. aenea*, *B. lampros*, *P. versicolor* др.) и луговыми видами – 14,84 %–36,31 % (*A. communis*, *Pt. melanarius*, *C. melanocephalus* и др.). Это связано с соответствующей растительностью, произрастающей на участках. В меньшей степени были представлены лесные – 8,28 %–10,49 % (*C. micropterus*, *C. hortensis*, *L. rufescens* и др.), береговые – 3,37 %–7,42 % (*C. clathratus*, *C. granutatus*, *A. impressum* и др.) и болотные – 2,58 %–3,37 % (*Pt. nigrita*, *Pt. strenuus*, *St. mixtus* и др.). Следует отметить, что на стационаре «Сож» не было зафиксировано береговых и болотных видов.

В результате исследований было выявлено 5 экологических групп по отношению к влажности: мезофилы, ксерофилы, мезоксерофилы, гигрофилы, мезогигрофилы. Основу всех исследованных сообществ составляли мезофилы – 39,33 %–57,47 % (*A. communis*, *C. fuscipes*, *H. rufipes* и др.) и мезоксерофилы – 24,52 %–44,94 % (*C. erratus*, *M. minutulus*, *H. anxius* и др.). В сообществах жуужелиц берега реки Днепр также преобладали гигрофилы – 7–10 видов при обилии 6,37 %–8,39 % (*B. unipustulatus*, *Ch. tristis*, *L. rufescens* и др.) и мезогигрофилы – 5–6 видов и 4,87 %–5,48 % (*C. granulatus*, *D. arenosus*, *St. teutonius* и др.), последнее место в численном и видовом отношении занимали ксерофилы – 1–2 вида при обилии 3,87 %–4,49 % (*H. distinguendus* и *A. aenea*). В то же время на участке «Сож» гигрофилы и мезогигрофилы были представлены единичными экземплярами, а численность ксерофилов, которые были представлены всего одним видом – *Amara aenea*, была значительно выше – 21,02 %.

Трофическая структура была сложена преимущественно миксофагами (75,66 %–88,54 %). Следует отметить, что с ростом рекреационной нагрузки планомерно увеличивалась численность и видовое богатство миксофагов, в то время как количество видов и особей зоофагов, наоборот, снижалось. Так, на стационаре «Сож» было обнаружено всего 3 вида зоофагов при обилии 11,46 %, в то время как на участках, подвергшихся меньшей рекреационной нагрузке, зафиксировано 16 и 13 видов при доле особей 21,61 % и 23,97 % на стационарах «Днепр 1» и «Днепр 2» соответственно.

В ходе исследований также был рассмотрен спектр жизненных форм жуужелиц. На участке «Сож», который подвергался рекреационной нагрузке в большей степени, наблюдалось преобладание миксофитофагов, в частности, геохортобионтов гарпалоидных (*A. communis*, *A. aenea*, *H. anxius*) как по видовому богатству (13 видов), так и по численности особей (50,96 %). Из зоофагов преобладали стратобионты-скважники подстилочные (*C. erratus*, *C. fuscipes*, *C. micropterus*, *P. assimilis*) – 4 вида и 29,30 % особей. На данном участке не было зафиксировано обитателей поверхности почвы – эпигеобионтов ходящих (жуужелицы рода *Carabus*) и бегающих (*Elaphrus riparius*). Эти виды оказались наименее устойчивы к антропогенному воздействию. На стационаре «Днепр 1» также преобладали геохортобионты гарпалоидные – 10 видов. Однако по численности особей данная группа уступала стратохортобионтам (32,58 %), которые были представлены всего одним видом – *Harpalus rufipes*. Из зоофагов выделялись обитатели подстилки – стратобионты-скважники подстилочные – 7 видов и 18,08 % особей (*C. erratus*, *C. fuscipes*, *Pt. strenuus* и др.), поверхностно-подстилочные – 9 видов и 10,65 % (*A. impressum*, *B. properans* и др.) и стратобионты зарывающиеся подстилочно-почвенные – 4 вида и 10,65 % особей (*P. versicolor*, *Pt. niger*, *Pt. melanarius*, *P. cupreus*). Невысокие показатели как видового богатства, так и численности особей были характерны для крупных видов жуужелиц (эпигеобионты ходящие). Остальные группы были представлены единичными экземплярами. В карабидокомплексах стационара «Днепр 2» также наблюдается преобладание геохортобионтов гарпалоидных в видовом отношении (12 видов). Однако, в целом, на данном участке зоофаги превосходят миксофитофагов. Лидирующую позицию по видовому богатству разделяют между собой стратобионты-скважники подстилочные и поверхностно-подстилочные (по 6 видов), однако последние уступают первым по численности – 7,49 % и 29,96 % соответственно. В меньшей степени представлены стратобионты зарывающиеся подстилочно-почвенные (4 вида при обилии 14,61 %), эпигеобионты ходящие (4 вида и 4,12 % особей) и геобионты роющие (3 вида и 1,12 % особей). Остальные группы были представлены единичными экземплярами.

Заклучение. Карабидокомплексы прибрежных экосистем рек Сож и Днепр представлены 51 видом из 22 родов. В целом, сообщества жуžелиц были представлены луговыми и полевыми мезофильными и мезоксерофильными миксофагами. Следует отметить, что на участке «Сож», который подвергался рекреационной нагрузке в большей мере, отмечены наименьшее видовое богатство и численность жесткокрылых. Однако, на участке «Днепр 1», который также отличался высокой степенью рекреационной нагрузки, отмечено наибольшее количество видов и особей жуžелиц. А на контрольном участке эти показатели несколько ниже. Таким образом, можно заключить, что рекреационная нагрузка не всегда приводит к резкому сокращению видового богатства и численности, что отмечено и в исследованиях прошлых лет [5], [8]. Выявлено, что сообщества жуžелиц четко реагируют на различные степени рекреации изменением экологической структуры: появлением видов-супердоминантов, сокращением обилия зоофагов, изменением биотопического распределения. При анализе параметров биоразнообразия было установлено, что сообщество жуžелиц стационара «Днепр 1» в условиях высокой рекреационной нагрузки является наиболее стабильным, зрелым и разнообразным. В то же время карабидокомплексы участка «Сож» на территории санатория с высокой посещаемостью отдыхающих, наряду с участком с наименьшей степенью рекреации – «Днепр 2» находились на стадии с низким насыщением экологических ниш, что подтверждается высокими показателями выравненности и соответствующей моделью распределения обилий (линии ранжирования соответствуют модели «разломанного стержня»).

Литература

1. Александровіч, А. Р. Склад і насельніцтва жужалёў (Coleoptera, Carabidae) г. Мінска / А. Р. Александровіч // Весці БДПУ. – 1997. – № 3. – С. 75–80.
2. Тихончук, Г. Н. Состояние прибрежных карабидокомплексов верхнего Днепра как показатель влияния антропогенных факторов на окружающую среду : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.09 / Г. Н. Тихончук ; БГПУ им. М. Танка. – Минск, 1999. – 20 с.
3. Галиновский, Н.Г. Жуžелицы (Coleoptera, Carabidae) береговых урбоценозов реки Сож (на примере г. Гомеля) / Н.Г. Галиновский // Экологический вестник. – 2009. – № 1. – С. 116–124.
4. Галиновский, Н. Г. Жесткокрылые (Ectognatha, Coleoptera) прибрежных урбоценозов р. Сож / Н. Г. Галиновский // Известия ГГУ. – 2010. – № 3. – С. 166–172.
5. Кабышева, А. А. Эколого-фаунистический обзор колеоптерокомплексов берегов рек Ипуть и Сож с различной степенью рекреационной нагрузки / А. А. Кабышева, Н. Г. Галиновский // Проблемы рационального использования природных ресурсов и устойчивое развитие Полесья : сб. докл. Междунар. науч. конф., Минск, 14–17 сент. 2016 г. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.] ; редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2016. – Т. 2. – С. 400–405.
6. Шарова, И. Х. Жизненные формы жуžелиц (Coleoptera, Carabidae) / И. Х. Шарова. – М. : Наука, 1981. – 360 с.
7. Красная книга Республики Беларусь. Животные : редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды диких животных / М-во природ. рес. и охраны окр. среды Респ. Беларусь, НАН Беларуси ; гл. редкол.: И. М. Качановский (предс.) [и др.]. – 4-е изд. – Минск : Беларуская Энцыклапедыя, 2015. – 317 с.
8. Кабышева, А. А. Оценка состояния комплексов жесткокрылых прибрежных экосистем рек Ипуть и Сож / А. А. Кабышева, Н. Г. Галиновский // Известия ГГУ. – 2018. – № 3, ч. 1. – С. 35–41.

УДК 574.1(582.29)

Новые сведения о лишайниках и близкородственных грибах на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника

Л.М. Турчин

Приводятся сведения о новых находках для флоры Полесского государственного радиационно-экологического заповедника 29 видов лишайников и 3 близкородственных грибов. Для Гомельской области впервые приводятся 5 видов лишайников: *Aquacidia trachona*, *Bilimbia sabuletorum*, *Lecania erysibe*, *Lecidella flavosorediata*, *Reichlingia leopoldii* и один лишенофильный гриб – *Corticifraga peltigerae*. Представлены данные о местонахождениях и местообитаниях лишайников. К настоящему времени для территории заповедника известно 119 таксонов, в том числе 114 лишайников, 3 лишенофильных и 2 нелихенизированных сапротрофных гриба.

Ключевые слова: лишайник, биологическое разнообразие, новый вид, заповедник, бывший населенный пункт.

There is information about the findings for Polesye State Radiation and Ecological Reserve flora of 29 species of lichens and 3 species of closely related fungi. For the Gomel region, 5 species of lichens are presented for the first time: *Aquacidia trachona*, *Bilimbia sabuletorum*, *Lecania erysibe*, *Lecidella flavosorediata*, *Reichlingia leopoldii* and one lichenicolous fungi – *Corticifraga peltigerae*. The data on the locations and habitats of lichens are presented. Today, 119 taxa are known for the territory of the reserve, including 114 lichens, 3 lichenicolous and 2 non-lichenized saprotrophic fungi.

Keywords: lichen, biodiversity, new species, reserve, former human settlement.

Введение. В результате аварии на Чернобыльской атомной электростанции на территории наиболее пострадавших Брагинского, Наровлянского и Хойникского административных районов (между 51°20' и 51°50' северной широты и 29°30' и 30°30' восточной долготы) в 1988 г. создан Полесский государственный радиационно-экологический заповедник (заповедник). Площадь его земель в настоящее время составляет 216 877 га [1]. Цель создания заповедника – осуществление комплекса мероприятий по предотвращению выноса радионуклидов за пределы его территории, ведение радиационного мониторинга, проведение радиобиологических исследований, изучение животного и растительного мира, естественного течения природных процессов в экосистемах и ландшафтах. Заповедник является крупнейшей природоохранной, но не особо охраняемой территорией в Беларуси [2].

Территория заповедника характеризуется неустойчивым увлажнением и большой изменчивостью распределения осадков во времени. Климат имеет переходные черты между лесной и лесостепной зонами, приближаясь к лесостепному. Периодически, особенно в последнее десятилетие, наблюдаются атмосферные и почвенные засухи. Среднегодовое количество осадков 609 мм. Средняя годовая температура воздуха составляет +7,8°C [3]. Почвенный покров представлен преимущественно дерново-подзолистыми, дерновыми и торфяно-болотными почвами [4].

В ботанико-географическом отношении Беларуси территория заповедника относится к Припятско-Мозырскому (северо-западная часть), Гомельско-Приднепровскому (крайняя северная) и Южно-Полесскому (центральная и южная) районам Полесско-Приднепровского округа подзоны широколиственных лесов [5]. В заповеднике преимущественно лесной тип растительности, покрытая лесом площадь составляет 64,4%. В формационной структуре доминируют сосновые (39,3 %) и березовые (30,9 %) леса. Относительно высокое участие черноольховых (10,6 %) и дубовых (5,6 %) лесов. Небольшими площадями представлены леса с преобладанием древовидных ив, клена, осины, ясеня и граба [1].

Довольно плотно заселенная территория до аварии на Чернобыльской атомной электростанции в 1986 г. почти одномоментно была отселена и выведена из хозяйственного оборота. С территории заповедника выселено 92 деревни [1]. Здесь на протяжении более тридцати лет природные комплексы практически не испытывают антропогенных нагрузок и происходит их естественное восстановление. Особый интерес в лишенологическом плане представляют атропогенные субстраты: шифер, бетон и другие строительные материалы забро-

шенных зданий домов, ферм бывших населенных пунктов (б.н.п.). В работе [6] автор приводит подробный ретроспективный анализ исследований лишенофлоры Гомельской области. Однако в ней не дается конкретных сведений о лишенобиоте заповедника. Видовой состав лишайников заповедника изучен крайне слабо. В 2011 г. начаты исследования по инвентаризации флоры лишайников на его территории. Первые сводки о лишайниках представлены в научных работах [7], [8], [9]. Настоящая публикация дополняет сведения по биологическому разнообразию лишенофлоры заповедника. Таким образом, исследования лишайников данной территории являются актуальными и заслуживают особого внимания.

Материалы и методы исследований. Данная публикация является результатом исследований лишенофлоры, проведенных в период 2017–2018 гг. на территории Хойникского, Наровлянского и Брагинского участков заповедника. Сбор материала осуществлялся в различных биотопах. Подробно обследовались стволы деревьев разных пород, субстраты антропогенного происхождения: материал неорганической природы (бетонные и металлические сооружения) и органической (деревянные конструкции). Эпифитные лишайники были собраны со стволов форофитов от корневых лап до высоты 2 м. Полевые исследования проводились маршрутным методом [10]. Гербарные образцы в количестве 82 шт., собранные за данный период, хранятся в гербарной коллекции заповедника. Камеральная обработка полевого материала проведена в лаборатории микологии ИЭБ с использованием световой микроскопии: бинокля Olympus SZ 6 и микроскопа Olympus BX 51. Исследования состава лишайниковых веществ проведены методом тонкослойной хроматографии в системе растворителей С [11]. В статье приводится выявленный состав вторичных лишайниковых кислот для отдельных видов лишайников. Индикаторные виды лишайников и нелихенизированных сапротрофных грибов старовозрастных лесов выделены по работе J. Motiejūnaitė с соавторами [12]. Виды в списке расположены в алфавитном порядке. Номенклатура таксонов приводится по сводке [13].

Результаты исследований и их обсуждение. В результате инвентаризации гербарного материала впервые для территории заповедника приводится 29 видов лишайников, 2 лишенофильных гриба (*Athelia arachnoidea*, *Corticifraga peltigerae*) и один нелихенизированный сапротрофный гриб (*Chaenothecopsis pusilla*). Далее приводится список видов в алфавитном порядке. После названия таксона указан район (р-н), лесничество (л-во), квартал (кв.), выдел (выд.), субстрат, на котором он был собран, тип леса, дата сбора образцов, ФИО коллектора и кто определил вид. Фамилии коллекторов сокращены и имеют следующее сокращение: Л.Т. – Л.М. Турчин, И.Ш. – И.В. Шаркевич., Д.Г. – Д.К. Гарбарук, С.Ш. – С.В. Шумак, определил виды А.Я. – А.П. Яцына. Виды, отмеченные «*», являются нелихенизированными сапротрофными видами и «!» – лишенофильными грибами, традиционно включаемые в лишенологические отчеты, «!!» – вид-индикатор старовозрастных малонарушенных лесных сообществ [12], «+» – новые для Гомельской области.

1. *Amandinea punctata* (Hoffm.) Coppins & Scheid

Изученные образцы: Хойникский р-н, Бабчинское л-во, кв. 9, выд. 6, на коре *Quercus robur* L., черноольшаник папоротниковый, 26.12.2017 И.Ш., Д.Г., 2018 А.Я.; Воротецкое л-во кв. 11 на коре *Acer platanoides* L., 04.01.2018 И.Ш., 2018 А.Я.

2. +*Aquacidia trachona* (Ach.) Aptroot

Изученные образцы: Брагинский р-н, Богушевское л-во, кв. 9, выд. 9, б.н.п. Вязок, на киприче заброшенного дома и на цементном кольце заброшенного колодца, 12.03.2020 Л.Т., Д.Г., 02.04.2022 А.Я.

3. !*Athelia arachnoidea* (Berk.) Jülich

Изученные образцы: Брагинский р-н, Богушевское л-во, кв. 47, выд. 4, б.н.п. Богуши, на стволе *A. platanoides* L. и талломе *Xanthoria parietina* (L.) Th.Fr. 27.12.2017 Л.Т., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

4. +*Bilimbia sabuletorum* (Schreb.) Arnold

Изученный образец: Наровлянский р-н, Припятское л-во, кв. 87, выд. 25, на мхе, произрастающем на бетонных конструкциях заброшенной фермы, 10.01.2018 Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

5. *Buellia griseovirens* (Turner & Borrer ex Sm.) Almb.

Изученный образец: Брагинский р-н, Богушевское л-во, кв. 47, выд. 4, б.н.п. Богуши, на гниющей древесине дубового столба забора, бывшая усадьба, 27.12.2017 Л.Т., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

6. *Calicium glaucellum* Ach.

Изученный образец: Хойникский р-н, Оревичское л-во, кв. 50, выд. 61, на стволе сухостойного старовозрастного *Quercus robur* L., дубрава прируслово-пойменная, 28.12.2017 Л.Т., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

7. *Calogaya decipiens* (Arnold) Arup, Frödén, Söchting

Изученный образец: Хойникский р-н, Оревичское л-во, кв. 71, выд. 53, на бетонном фундаменте бывшей насосной станции на берегу р. Припять, 28.12.2017 Л.Т., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

8. *Cetraria sepincola* (Ehrh.) Ach.

Изученный образец: Хойникский р-н, Оревичское л-во, кв. 71, выд. 53, на старом гниющем деревянном заборе насосной станции на берегу р. Припять, 28.12.2017 Л.Т., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

9. *Chaenotheca chrysocephala* (Turner ex Ach.) Th. Fr.

Изученный образец: Хойникский р-н, Новопокровское л-во, кв. 86, выд. 28, на коре *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., дубрава снытевая, 26.12.2017 И.Ш., 05.04.2018 А.Я.

10. *!!C. stemonea* (Ach.) Müll. Arg.

Изученный образец: Хойникский р-н, Бабчинское л-во, кв. 9, выд. 4, на коре *Populus tremula* L., дубрава кисличная, 26.12.2017 Л.Т., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

11. *C. trichialis* (Ach.) Th. Fr.

Изученные образцы: Хойникский р-н, Оревичское л-во, кв. 50, выд. 61, на стволе сухостойного старовозрастного ствола *Q. robur* L., дубрава прируслово-пойменная, 28.12.2017 Л.Т., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.; Брагинский р-н, Богушевское л-во, кв. 52, выд. 2 б.н.п. Козелужцы, на коре старовозрастного ствола *Tilia cordata* Mill., 27.12.2017 Л.Т., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

12. *C. xyloxena* Nádv.

Изученный образец: Хойникский р-н, Оревичское л-во, кв. 50, выд. 61, на древесине сухостойного старовозрастного ствола *Q. robur* L., дубрава прируслово-пойменная, 28.12.2017 Л.Т., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

13. **Chaenothecopsis pusilla* (Ach.) A. F. W. Schmidt

Изученный образец: Хойникский р-н, Оревичское л-во, кв. 50, выд. 61, на древесине сухостойного старовозрастного ствола *Q. robur* L., дубрава прируслово-пойменная, 28.12.2017 Л.Т., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

14. *Cladonia botrytes* (K.G. Hagen) Willd.

Изученный образец: Хойникский р-н, Оревичское л-во, кв. 71, выд. 53, на старом гниющем деревянном заборе насосной станции на берегу р. Припять, 28.12.2017 И.Ш., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

15. *Cladonia carneola* (Fr.) Fr.

Изученные образцы: Хойникский р-н, Бабчинское л-во кв. 9, выд. 11, на пне старовозрастного *Q. robur* L., черноольшаник папоротниковый, 26.12.2017 Л.Т., Д.Г.; Оревичское л-во кв. 71, выд. 53, на старом гниющем деревянном заборе насосной станции на берегу р. Припять, 28.12.2017, И.Ш., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

Лишайниковые кислоты: усниновая, барбатова и изоусниновая кислоты, зеорин.

16. *+*Corticifraga peltigerae* (Nyl.) D.Hawksw. & R.Sant.

Изученный образец: Хойникский р-н, Воротецкое л-во, кв. 29, выд. 10, на бетонной плите заброшенного здания свиного комплекса на таллеме лишайника *Peltigera* sp. 28.12.2017 С.Ш., 05.04.2018 А.Я.

17. *Diploschistes scruposus* (Schreb.) Norman

Изученный образец: Наровлянский р-н, Припятское л-во, кв. 87, выд. 25, на мхе, произрастающем на бетонных конструкциях заброшенной фермы, 10.01.2018 Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

18. *Hypogymnia tubulosa* (Schaer.) Nav.

Изученный образец: Хойникский р-н, Оревичское л-во, кв. 71, выд. 53, на металлической трубе насосной станции на берегу р. Припять, 28.12.2017 Л.Т., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

19. *+Lecania erysibe* (Ach.) Mudd

Изученный образец: Брагинский р-н, Богушевское л-во, кв. 52, выд. 2, б.н.п. Козелужцы, на цементном кольце заброшенного колодца, 27.12.2017 Л.Т., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

20. *Lecanora pulicaris* (Pers.) Ach.

Изученные образцы: Брагинский р-н, Богушевское л-во, кв. 47, выд. 4, б.н.п. Богуши, на стволе *Caragana arborescens* Lam. и на стволе *T. cordata* Mill., 27.12.2017 Л.Т., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.; Хойникский р-н, Оревичское л-во, кв. 71, выд. 53, на старом гниющем дере-

вянном заборе насосной станции на берегу р. Припять, 28.12.2017 Л.Т., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.; Бабчинское л-во, кв. 9, выд. 11, на коре *Carpinus betulus* L., черноольшаник папоротниковый, 26.12.2017 И.Ш., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

21. *L. varia* (Hoffm.) Ach.

Изученный образец: Хойникский р-н, Оревичское л-во, кв. 71, выд. 53, на старом гниющем деревянном заборе насосной станции на берегу р. Припять, 28.12.2017 Л.Т., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

22. +*Lecidella flavosorediata* (Vězda) Hertel & Leuckert

Изученный образец: Брагинский р-н, Богушевское л-во, кв. 9, выд. 9, б.н.п. Вязок, на стволе старовозрастного *Ulmus* sp. 12.03.2020 Л.Т., Д.Г., 07.04.2022 А.Я.

Лишайниковая кислота: артотелин.

23. *Lepraria finkii* (B. de Lesd.) R.C. Harris

Изученный образец: Хойникский р-н, Бабчинское л-во, кв. 9, выд. 7, на корневых лапах *A. glutinosa* (L.) Gaertn., черноольшаник снытевый, 26.12.2017 Л.Т., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

Лишайниковые кислоты: атранорин, зеорин, стиктовая и коннорстиктовая кислоты.

24. *Micarea denigrata* (Fr.) Hedl.

Изученный образец: Хойникский р-н, Оревичское л-во, кв. 71, выд. 53, на старом гниющем деревянном заборе насосной станции на берегу р. Припять, 28.12.2017 Л.Т., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

25. *Myriolecis crenulata* (Wallr.) Sliwa, Zhao Xin, Lumbsch

Изученный образец: Брагинский р-н, Богушевское л-во, кв. 47, выд. 4, б.н.п. Богуши, на металлическом покрашенном отливе окна заброшенного дома, 27.12.2017 Л.Т., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

26. *Pertusaria leioplaca* DC.

Изученный образец: Хойникский р-н, Бабчинское л-во, кв. 9, выд. 4, на коре *P. Tremula* L., дубрава кисличная, 26.12.2017 И.Ш., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

27. *Phaeophyscia nigricans* (Flörke) Moberg

Изученный образец: Наровлянский р-н, Припятское л-во, кв. 87, выд. 25, на керамическом кирпиче заброшенной фермы, 10.01.2018 Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

28. *Physcia caesia* (Hoffm.) Fűrnr.

Изученный образец: Хойникский р-н, Воротецкое л-во, кв. 29, выд. 10, на металлическом циклоне заброшенного свиного комплекса, 28.12.2017 Л.Т., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

29. *P. tribacia* (Ach.) Nyl.

Изученный образец: Брагинский р-н, Богушевское л-во, кв. 47, выд. 4, б.н.п. Богуши, на деревянной обрешетке крыши заброшенной фермы, 27.12.2017 Л.Т., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

30. *Physconia detera* (Nyl.) Poelt.

Изученный образец: Брагинский р-н, Богушевское л-во кв. 47, выд. 4, б.н.п. Богуши, на старовозрастном стволе *T. cordata* Mill., 27.12.2017 Л.Т., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

31. +*Reichlingia leopoldii* Diederich et Scheid.

Изученный образец: Брагинский р-н, Богушевское л-во, кв. 52, выд. 2, б.н.п. Козелужцы, на коре старовозрастной *T. cordata* Mill., 27.12.2017 Л.Т., Д.Г., 05.04.2018 А.Я.

32. *Rusavskia elegans* (Link.) S.Y. Kondr. & Kärnefelt

Изученный образец: Хойникский р-н, Тульговичское л-во, кв. 37, выд. 17, на бетонной плите около мелиоративного канала, 14.03.2017 Л.Т., 05.04.2018 А.Я.

Впервые для Гомельской области приводятся 5 новых видов лишайников: *Aquacidia trachona* (Ach.) Aptroot, *Bilimbia sabuletorum* (Schreb.) Arnold., *Lecania erysibe* (Ach.) Mudd., *Lecidella flavosorediata* (Vězda) Hertel & Leuckert, *Reichlingia leopoldii* Diederich et Scheid. и один лишенофильный гриб – *Corticifraga peltigerae* (Nyl.) D.Hawksw. & R.Sant. [14]. Лишайник *Aquacidia trachona* для Беларуси указывался только по литературным данным [9]. Лишайники *Bilimbia sabuletorum* и *Lecania erysibe* относятся к слабоизученным видам на территории республики. В других регионах страны ранее отмечались на известьсодержащих субстратах, цементной кладке, бетонных конструкциях и т. д. [14]. Эпифитный лишайник *Reichlingia leopoldii* на территории республики встречается спорадически и использует в качестве субстрата кору старых лиственных деревьев (данные коллекции MSK-L). Таллом лишайника *Lecidella flavosorediata* содержит лишайниковую кислоту – артотелин. Лишенофильный гриб *Corticifraga peltigerae* ранее был известен только в Витебской области [9]. К индикаторным видам старовозрастных лесов республики относится лишайник *Chaenotheca stemonea*. Та-

кие виды лишайников, как *Calogaya decipiens*, *Phaeophyscia nigricans*, *Physcia tribacia* и *Rusavskia elegans* относятся к токситолерантным и нитрофильным видам; на территории республики отмечены часто и встречаются преимущественно в населенных пунктах страны [9].

Заключение. В результате проведенных исследований выявлено 29 новых видов лишайников и 3 близкородственных грибов для территории заповедника. Такие виды, как *Aquacidia trachona*, *Bilimbia sabuletorum*, *Lecania erysibe*, *Lecidella flavosorediata*, *Reichlingia leopoldii* и один лишайнофильный гриб – *Corticifraga peltigerae* впервые указываются для Гомельской области. Таким образом, дополнен видовой состав лишайников и близкородственных грибов заповедника, который насчитывает 119 таксонов, в том числе 114 видов лишайников, 3 лишайнофильных и 2 нелихенизированных сапротрофных грибов из двух отделов *Ascomycota* и *Basidiomycota*, относящихся к 6 классам, 14 порядкам, 26 семействам и 58 родам. Полученные результаты исследования дополняют и расширяют уже известные сведения о лишайниках заповедника. Тем не менее, лишайнофлора заповедника остается недостаточно полно и крайне неравномерно изученной. Указанные находки свидетельствуют о необходимости более детального изучения биологического разнообразия лишайников охраняемой территории.

Литература

1. Лесоустроительный проект Государственного природоохранного научно-исследовательского учреждения «Полесский государственный радиационно-экологический заповедник» Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь на 2021–2030 гг. – Минск : Белгослес, 2020. – 292 с.
2. Биологическое разнообразие Полесского радиационно-экологического заповедника : сосудистые растения / Д. В. Дубовик [и др.] ; под ред. В. И. Парфенова. – Минск : Беларуская навука, 2021. – 234 с.
3. Марченко, Ю. Д. Погодно-климатические условия в ближней зоне Чернобыльской АЭС / Ю. Д. Марченко // Экосистемы и радиация : аспекты существования и развития : сб. науч. тр. / Полесский государственный радиационно-экологический заповедник ; под общ.ред. Ю. И. Бондаря. – Минск, 2013. – С. 32–45.
4. Почвы Полесского государственного радиационно-экологического заповедника = Soilsof Polesye State Radiation-ecological Reserve / В. В. Лапа [и др.] ; под ред. В. В. Лапа, Н. Н. Цибулько. – Минск : ИВЦ Минфина, 2019. – 97 с.
5. Гельтман, В. С. Географический и типологический анализ лесной растительности Белоруссии / В. С. Гельтман. – Минск : Наука и техника, 1982. – 326 с.
6. Цуриков, А. Г. Лишайники Юго-востока Беларуси (опыт лишайномониторинга) / А. Г. Цуриков. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2013. – 276 с.
7. Маленок, Л. В. Первый аннотированный список лишайникообразующих грибов Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / Л. В. Маленок, Л. М. Турчин // Современное состояние, тенденции развития, рациональное использование и сохранение биологического разнообразия растительного мира : материалы Междунар. науч. конф., Минск–Нарочь, 23–26 сентября 2014 г. / Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича [и др.]. – Минск, 2014. – С. 92–96.
8. Турчин, Л. М. Новые и редкие виды лишайников Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / Л. М. Турчин // Проблемы оценки, мониторинга и сохранения биоразнообразия : сб. материалов Респ. науч.-практ. экол. конф., Брест, 23 ноября 2017 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина. – Брест, 2017. – С. 137–141.
9. Флора Беларуси. Лишайники : в 4 т. / А. П. Яцына [и др.] ; под общ. ред. В. И. Парфенова. – Минск : Беларуская навука, 2019. – Т. 1. – 341 с.
10. Степанчикова, И. С. Сбор, определение и хранение лишайнологических коллекций / И. С. Степанчикова, М. П. Гагарина // Флора лишайников России : биология, экология, разнообразие, распространение и методы изучения лишайников ; под ред. Л. В. Андреева, Д. Е. Гимельбранта. – М.–СПб. : КМК, 2014. – С. 204–219.
11. Orange, A. Microchemical methods for the identification of lichens / A. Orange, P. W. James, F. J. White. – London, 2001. – 101 p.
12. Motiejūnaitė, J. Lichens – indicators of old-growth forests in biocentres of Lithuania and NE Poland / J. Motiejūnaitė, K. Czyżewska, S. Cieślinski // Botanica Lithuanica. – 2004. – Vol. 10 (1). – P. 59–74.
13. Santesson's Checklist of Fennoscandian Lichen-Forming and Lichenicolous Fungi / M. Westberg [et al.]. – Uppsala University : Museum of Evolution, 2021. – 938 p.
14. Tsurukau, A. A. Provisional checklist of the lichens of Belarus / A. A. Tsurukau // Opuscula Philolichenum. – 2018. – Vol. 17. – P. 374–479.

Фотозащитные свойства экстрактов из плодовых тел макромицетов

О.М. ХРАМЧЕНКОВА

Оценивали химический выход и фотозащитные свойства ацетоновых, бензольных, метанольных и этанольных экстрактов из плодовых тел культивируемых макромицетов *Hericium erinaceus*, *Lentinula edodes*, *Ganoderma lucidum* и *Pleurotus ostreatus* и дикорастущих *Inonotus obliquus*, *Fomes fomentarius*, *Trichaptum biforme* и *Ganoderma applanatum*. Большинство видов экстрактов из плодовых тел грибов слабо поглощают ультрафиолет в диапазоне длин волн 290 ÷ 400 нм. Методом скрининга *in vitro* установлено, что ацетоновые экстракты из *F. fomentarius* и *G. applanatum*, метанольный из *G. applanatum*, а также этанольные экстракты из *F. fomentarius*, *I. obliquus* и *G. applanatum* являются фотозащитными: SPF = 17,3 ÷ 37,4; $\lambda_{\text{крит}}$ = 371 ÷ 381 нм; УФ-А/УФ-Б = 1,24 ÷ 1,33.

Ключевые слова: макромицеты, ацетоновые, бензольные, метанольные и этанольные экстракты, спектры поглощения, солнцезащитный фактор (SPF), критическая длина волны ($\lambda_{\text{крит}}$), соотношение УФ-А/УФ-Б.

The yield and photoprotective properties of acetone, benzene, methanol, and ethanol extracts from the fruit bodies of cultivated macromycetes *Hericium erinaceus*, *Lentinula edodes*, *Ganoderma lucidum*, and *Pleurotus ostreatus*, and wild-growing *Inonotus obliquus*, *Fomes fomentarius*, *Trichaptum biforme*, and *Ganoderma applanatum*, were evaluated. Most types of extracts from the fruiting bodies of mushrooms weakly absorb ultraviolet in the wavelength range of 290 ÷ 400 nm. It was established by *in vitro* screening that acetone extracts from *F. fomentarius* and *G. applanatum*, methanol extract from *G. applanatum*, as well as ethanol extracts from *F. fomentarius*, *I. obliquus* and *G. applanatum* are photoprotective: SPF = 17,3 ÷ 37,4; λ_{crit} = 371 ÷ 381 nm; UV-A/UV-B = 1,24 ÷ 1,33.

Keywords: macromycetes, acetone, benzene, methanol and ethanol extracts, absorption spectra, sun protection factor (SPF), critical wavelength (λ_{crit}), UV-A/UV-B ratio.

Введение. Использование экстрактов из различных биологических объектов в области защиты кожи от солнца является трендом современной косметической промышленности. В связи с установленными негативными свойствами синтетических фотозащитных средств физической и химической природы возрос спрос потребителей на продукцию, содержащую компоненты натурального происхождения. Поиск фотозащитных субстанций ведется среди растений, животных, грибов и водорослей, так как различные содержащиеся в них соединения (фенолы, флавоноиды, антрахиноны, дубильные вещества и другие) способны поглощать ультрафиолетовое излучение и/или минимизировать его вредность [1].

При поглощении ультрафиолета молекулами реализуется фотозащитный или фототоксический (фотосенсибилизационный) механизм [2] – рисунок 1 (по [1] с изменениями и дополнениями). Электроны переходят из основного синглетного состояния S_0 на орбитали возбужденных состояний S_1 или S_2 , а также триплетного состояния (Т) при обращении спина. Передача энергии от возбужденного триплетного электрона молекулы фотосенсибилизатора на атом кислорода приводит к образованию возбужденного синглетного кислорода, который способен участвовать в окислении белков и мембранных липидов или в индукции повреждений ДНК [1], [2].

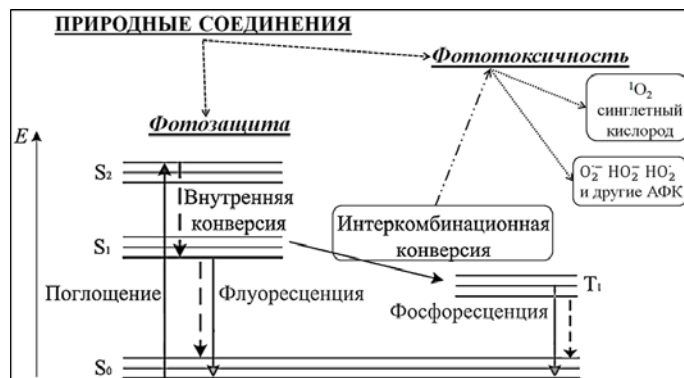


Рисунок 1 – Механизмы проявления фотохимических свойств природных соединений.
Диаграмма Яблонского

В присутствии кислорода возможно также образование свободных радикалов (в частности, активных форм кислорода – АФК) – интермедиатов окислительного повреждения ДНК и других соединений – прежде всего мембранных липидов и белков. В результате развиваются фотоаллергии, фотостарение, накопление генетических изменений и, далее, опухоли кожи.

В качестве перспективных фотозащитных соединений обычно рассматривают вещества вторичного метаболизма, справедливо полагая, что данные вещества продуцируются клетками для расширения адаптивных возможностей организма, в том числе – по отношению к ультрафиолету. Состав и некоторые свойства вторичных метаболитов высших грибов описаны в [3]. Можно лишь предполагать, которые из них обладают фотозащитными свойствами. Одна из немногих экспериментальная статья [4] посвящена фотозащитным свойствам этилацетатных, этанольных и водных экстрактов из культивируемого мицелия кордицепса китайского (*Ophiocordyceps sinensis*). Выбор экстрактов, а не отдельных, содержащихся в них соединений, в качестве объекта исследования биологической активности базируется на том соображении, что экстракт является смесью веществ, чьи свойства не равны сумме свойств компонентов. Последнее может быть связано с присутствием в экстракте минорных и/или пока неизвестных соединений, возможностью эффектов синергизма или антагонизма, наличием или отсутствием средства определенных клеточных структур к компонентам экстракта.

Наконец, в отношении скрининга биологической активности экстрактов из макромицетов следует сказать следующее. Данный процесс как никакой другой далек от завершения в силу колоссального количества видов высших грибов, обитающих в дикой природе, а также все возрастающего количества видов и штаммов культивируемых макромицетов. Кроме того, сухая биомасса грибов содержит вещества, растворимые как в воде, так и в органических растворителях. Очевидно, что состав экстрактов, получаемых при экстрагировании водой, ацетоном, бензолом, метанолом и другими растворителями, существенно отличается, что еще больше расширяет область скрининга.

Настоящее исследование посвящено скринингу фотозащитных свойств ацетоновых, бензольных, метанольных и этанольных экстрактов из восьми видов грибов, четыре из которых являются популярными объектами культивирования, другие – распространенными обитателями лесов Беларуси. К культивируемым видам относятся: Трутовик лакированный (*Ganoderma lucidum* (Curtis) P.Karst.), гриб Рейши; Ежовик гребенчатый (*Hericium erinaceus* (Bull.) Pers.), «обезьянья голова»; Лентинула съедобная (*Lentinula edodes* (Berk.) Pegler), шиитакэ; Вешенка обыкновенная (*Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P.Kumm.); дикорастущими являются: Трутовик настоящий (*Fomes fomentarius* (L.) Fr.); Трутовик плоский (*Ganoderma applanatum* (Pers.) Pat.); Трутовик скошенный (*Inonotus obliquus* (Fr.) Pilát) чага; Трихептум двоякий (*Trichaptum biforme* (Fr.) Ryvarden).

Методы исследований. Сухую биомассу плодовых тел грибов измельчали, экстрагировали ацетоном, бензолом, метанолом и этанолом по Сокслету, растворители удаляли путем ротационного испарения, сухие экстракты использовали для изучения фотозащитных свойств.

Фотозащитные свойства экстрактов определяли по показателям: солнцезащитного фактора (SPF), критической длины волны ($\lambda_{\text{крит}}$) и величины соотношения УФ-А/УФ-Б в соответствии с методиками, описанными в [5].

Анализ данных производили с помощью программного продукта MicrosoftExcel.

Результаты и их обсуждение. Прямое экстрагирование плодовых тел макромицетов органическими растворителями различной полярности зачастую позволяет получить значимые количества экстрактов при использовании спиртов в качестве экстрагентов – таблица 1.

Таблица 1 – Химический выход экстрактов из плодовых тел макромицетов

В процентах от воздушно-сухой массы

Виды грибов	Используемый экстрагент			
	ацетон	бензол	метанол	этанол
Культивируемые макромицеты				
<i>G. lucidum</i>	0,8 ± 0,07	2,5 ± 0,32	9,6 ± 1,01	12,8 ± 0,57
<i>H. erinaceus</i>	10,7 ± 0,69	4,5 ± 0,36	21,4 ± 2,43	18,7 ± 1,09
<i>L. edodes</i>	1,8 ± 0,15	1,9 ± 0,18	12,4 ± 0,97	19,6 ± 1,43
<i>P. ostreatus</i>	1,1 ± 0,09	0,8 ± 0,04	8,8 ± 1,26	7,3 ± 0,97

Окончание таблицы 1

Дикорастущие макромицеты				
<i>F. fomentarius</i>	0,6 ± 0,08	0,5 ± 0,02	2,8 ± 0,54	2,6 ± 0,17
<i>G. applanatum</i>	1,6 ± 0,12	0,7 ± 0,05	5,3 ± 0,87	5,1 ± 0,34
<i>I. obliquus</i>	1,2 ± 0,11	0,3 ± 0,01	1,8 ± 0,21	15,9 ± 1,29
<i>T. biforme</i>	1,7 ± 0,19	1,1 ± 0,04	4,1 ± 0,23	2,3 ± 0,23

Обращает на себя внимание тот факт, что выход экстрактов из плодовых тел культивируемых макромицетов зачастую выше, чем из дикорастущих.

Растворенные в этаноле экстракты плодовых тел грибов показали различную активность в поглощении ультрафиолета – рисунок 2. Слабее всех поглощали ультрафиолет в диапазоне 290 ÷ 400 нм экстракты из *T. biforme*. К числу экстрактов, слабо поглощавших УФ-Б и УФ-А следует отнести: бензольные из *L. edodes*, *P. ostreatus*, *F. fomentarius* и *G. applanatum*; метанольные из *P. ostreatus*; этанольные из *G. lucidum*, *H. erinaceus* и *P. ostreatus*. К группе экстрактов, хорошо поглощавших УФ-Б и слабо УФ-А можно отнести ацетоновые экстракты *G. applanatum*, *H. erinaceus* и *I. obliquus*, бензольные из *H. erinaceus*, а также метанольные из *G. lucidum*, *I. obliquus* и *H. erinaceus*. Наконец, многообещающими, хорошо поглощающими и УФ-Б, и УФ-А были ацетоновые, метанольные и этанольные экстракты из *F. fomentarius* и *G. applanatum*, а также бензольные и этанольные экстракты из *I. obliquus*.

По величине SPF уровень фотозащиты считается низким при SPF = 2–6; средним – при SPF = 8–12; высоким – при SPF = 15–25; очень высоким – при SPF = 30–50; сверхвысоким – при SPF > 50; а при $\lambda_{\text{крит}} > 370$ нм и SPF > превышающей 15,0 экстракт признается фотозащитным [6]. По величине УФ-А/УФ-Б солнцезащитные средства делятся на слабые (0 ÷ 0,2); средние (0,2 ÷ 0,4); хорошие (0,4 ÷ 0,6); превосходные (0,6 ÷ 0,8) и максимальные (0,8 ≥) [6], [7].

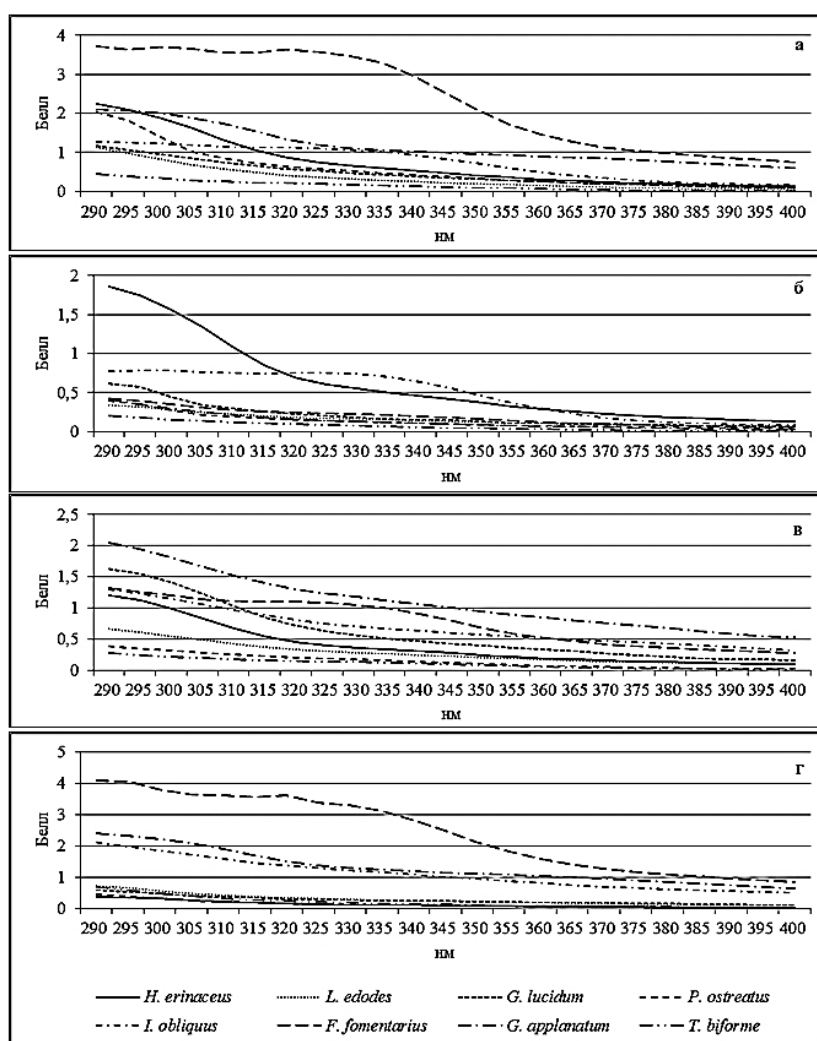


Рисунок 2 – Спектры поглощения спиртовых растворов экстрактов из плодовых тел макромицетов

Среди проанализированных нами 32 видов экстрактов из плодовых тел культивируемых и дикорастущих макромицетов два (бензольный и метанольный из *T. biforme*) фотозащитными свойствами не обладают; еще 13 имеют низкий уровень фотозащиты – таблица 2.

Таблица 2 – Фотозащитные свойства экстрактов из плодовых тел макромицетов

Виды грибов	Виды экстрактов	SPF, абс. ед.	Критическая длина волны, нм	УФ-А/УФ-Б, абс. ед.
Культивируемые макромицеты				
<i>Ganoderma lucidum</i>	ацетоновый	8,6 ± 0,74	372 ± 4,4	0,94 ± 0,09
	бензольный	3,8 ± 0,25	371 ± 6,9	0,77 ± 0,08
	метанольный	12,3 ± 0,97	376 ± 3,4	0,93 ± 0,06
	этанольный	4,2 ± 0,21	380 ± 5,8	1,23 ± 0,10
<i>Hericium erinaceus</i>	ацетоновый	16,3 ± 1,15	360 ± 3,7	0,61 ± 0,04
	бензольный	13,3 ± 0,92	364 ± 5,2	0,63 ± 0,07
	метанольный	8,5 ± 0,34	367 ± 5,7	0,69 ± 0,06
	этанольный	2,8 ± 0,09	365 ± 6,9	0,68 ± 0,09
<i>Lentinula edodes</i>	ацетоновый	7,1 ± 0,54	361 ± 4,1	0,64 ± 0,05
	бензольный	2,5 ± 0,18	377 ± 5,7	1,08 ± 0,07
	метанольный	4,9 ± 0,37	372 ± 4,6	0,85 ± 0,09
	этанольный	5,1 ± 0,62	375 ± 6,4	0,99 ± 0,12
<i>Pleurotus ostreatus</i>	ацетоновый	11,2 ± 0,99	361 ± 8,2	0,63 ± 0,03
	бензольный	2,4 ± 0,26	369 ± 4,5	0,81 ± 0,06
	метанольный	2,9 ± 0,17	365 ± 9,1	0,83 ± 0,09
	этанольный	2,5 ± 0,32	367 ± 7,2	0,74 ± 0,05
Дикорастущие макромицеты				
<i>Fomes fomentarius</i>	ацетоновый	36,4 ± 2,98	371 ± 3,2	1,32 ± 0,12
	бензольный	3,2 ± 0,33	370 ± 4,7	1,05 ± 0,09
	метанольный	11,6 ± 1,25	374 ± 5,9	1,41 ± 0,11
	этанольный	37,3 ± 4,47	375 ± 4,1	1,33 ± 0,10
<i>Ganoderma applanatum</i>	ацетоновый	18,7 ± 2,65	381 ± 8,3	1,24 ± 0,12
	бензольный	2,6 ± 0,16	365 ± 7,5	0,74 ± 0,05
	метанольный	18,1 ± 1,79	379 ± 4,1	1,28 ± 0,09
	этанольный	21,7 ± 2,55	380 ± 6,6	1,27 ± 0,13
<i>Inonotus obliquus</i>	ацетоновый	11,9 ± 1,09	368 ± 5,4	1,08 ± 0,08
	бензольный	7,7 ± 0,89	359 ± 8,1	1,21 ± 0,09
	метанольный	10,7 ± 0,85	380 ± 8,6	1,27 ± 0,08
	этанольный	17,3 ± 1,32	378 ± 6,2	1,25 ± 0,11
<i>Trichaptum biforme</i>	ацетоновый	2,9 ± 0,17	354 ± 3,1	0,68 ± 0,03
	бензольный	1,4 ± 0,11	366 ± 4,5	0,86 ± 0,09
	метанольный	2,0 ± 0,19	368 ± 3,5	0,98 ± 0,07
	этанольный	5,7 ± 0,63	361 ± 7,1	0,65 ± 0,04

Еще десять видов экстрактов из грибов имеют SPF < 15,0, то есть обладают средним уровнем фотозащиты, и не могут быть названы фотозащитными по данному показателю. Тем не менее, ацетоновый, бензольный и метанольный экстракты из чаги (*I. obliquus*), метанольный из трутовика настоящего (*F. fomentarius*) и метанольный из ежевика гребенчатого (*H. erinaceus*) перспективны как добавки к другим фотозащитным субстанциям с более высокими SPF, но низкими $\lambda_{\text{крит}}$ и УФ-А/УФ-Б.

Установлено, ацетоновые экстракты из *F. fomentarius* и *G. applanatum*, метанольный из *G. applanatum*, а также этанольные экстракты из *F. fomentarius*, *I. obliquus* и *G. applanatum* являются фотозащитными. Все три упомянутых вида трутовиков являются дикорастущими макромицетами, возможности культивирования которых и разные виды биологической активности экстрактов из них в настоящее время активно изучаются [8]–[10].

Заключение. Оценивали химический выход и фотозащитные свойства ацетоновых, бензольных, метанольных и этанольных экстрактов из плодовых тел культивируемых макромицетов *Hericium erinaceus*, *Lentinula edodes*, *Ganoderma lucidum* и *Pleurotus ostreatus*, и дикорастущих *Inonotus obliquus*, *Fomes fomentarius*, *Trichaptum biforme* и *Ganoderma*

applanatum. Показано, что наиболее этанол и метанол являются более эффективными экстрагентами, чем ацетон и бензол. Выход экстрактов из плодовых тел культивируемых макромицетов выше, чем из дикорастущих. Большинство видов экстрактов из плодовых тел грибов слабо поглощают ультрафиолет в диапазоне длин волн $290 \div 400$ нм. Методом скрининга *in vitro* установлено, что ацетоновые экстракты из *F. fomentarius* и *G. applanatum*, метанольный из *G. applanatum*, а также этанольные экстракты из *F. fomentarius*, *I. obliquus* и *G. applanatum* являются фотозащитными: $SPF = 17,3 \div 37,4$; $\lambda_{\text{крит}} = 371 \div 381$ нм; УФ-А/УФ-Б = $1,24 \div 1,33$. Ацетоновый, бензольный и метанольный экстракты из чаги (*I. obliquus*), метанольный из трутовика настоящего (*F. fomentarius*), а также метанольный из ежевика гребенчатого (*H. erinaceus*) следует признать перспективными добавками к другим фотозащитным субстанциям с более высокими SPF, но низкими $\lambda_{\text{крит}}$ и УФ-А/УФ-Б.

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

Литература

1. Natural components in sunscreens : Topical formulations with sun protection factor (SPF) / H. He [et al.] // Biomedicine & Pharmacotherapy. – 2021. – Vol. 134. – P. 111161–111161.
2. Chemical photoallergy : photobiochemical mechanisms, classification, and risk assessments / S. Onoue [et al.] // Journal of dermatological science. – 2017. – Vol. 85 (1). – P. 4–11.
3. Chen, H. P. Secondary metabolites from higher fungi / H. P. Chen, J. K. Liu // Progress in the chemistry of organic natural products. – 2017. – Vol. 106. – P. 1–201.
4. Cosmetic and skincare benefits of cultivated mycelia from the Chinese caterpillar mushroom, *Ophiocordyceps sinensis* (Ascomycetes) / W. Y. Cheng [et al.] // International Journal of Medicinal Mushrooms. – 2018. – Vol. 20 (7). – P. 623–636.
5. Храменкова, О. М. Фотозащитные свойства экстрактов из пяти видов лишайников / О. М. Храменкова // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2018. – № 6 (111). – С. 81–86.
6. Rojas, J. L. Metabolites with antioxidant and photo-protective properties from *Usnea roccellina* Motyka, a lichen from Colombian Andes / J. L. Rojas¹, M. Díaz-Santos, N. A. Valencia-Islas // UK Journal of Pharmaceutical and Biosciences. – 2015. – Vol. 3 (4). – P. 18–26.
7. Springsteen, A. In vitro measurement of sun protection factor of sunscreens by diffuse transmittance / A. Springsteen, R. Yurek, M. Frazier, K. F. Carr // Analytica Chimica Acta. – 1999. – Vol. 380 (2-3). – P. 155–164.
8. Antioxidant activity and chemical composition of extracts from fruiting bodies of xylotrophic fungi growing on birch / A. A. Ermoshin [et al.] // Journal of Siberian Federal University. Biology. – 2021. – Vol. 14 (3). – P. 339–353.
9. Antioxidant Activity and Some Biochemical Properties of *Ganoderma applanatum* (Pers.) Pat. from Iran / S. Mohammadifar [et al.] // Advanced Research in Microbial Metabolites and Technology. – 2019. – Vol. 2 (2). – P. 137–145.
10. Chemical characterization and biological activity of Chaga (*Inonotus obliquus*), a medicinal «mushroom» / J. Glamočljia [et al.] // Journal of ethnopharmacology. – 2015. – Vol. 162. – P. 323–332.

УДК 574.42:630*182.47:630*228.8(630*176.321.5

Современный живой напочвенный покров в черноольшаниках Полесского государственного радиационно-экологического заповедника

С.В. ШУМАК, А.В. УГЛЯНЕЦ

Современный живой напочвенный покров в наиболее распространенных типах черноольховых лесов Полесского государственного радиационно-экологического заповедника включает 73 вида травянистых растений. Приводится его видовой состав, обилие, встречаемость отдельных видов. Дается анализ экологической структуры травяного покрова. Установлена тенденция увеличения в его составе доли мезофитов и сокращения гигрофитов, выявлены обуславливающие ее факторы.

Ключевые слова: черноольшаник, тип леса, живой напочвенный покров, видовой состав.

The modern living ground cover in the most common types of black alder forests of the Polesye State Radiation and Ecological Reserve includes 73 species of herbaceous plants. Its species composition, abundance and occurrence of individual species are given. The analysis of the ecological structure of the herbaceous cover is provided. The tendency of an increase in the proportion of mesophytes and a reduction of hygrophytes in its composition has been established, the factors that caused it have been identified.

Keywords: black alder forests, forest type, living ground cover, species composition.

Введение. Живой напочвенный покров (ЖНП) является одним из важнейших компонентов лесного биогеоценоза, поэтому исследованию его состава, структуры и видового разнообразия уделяется большое внимание [1], [2]. Определение характеристик данного элемента фитоценозов имеет важное значение при оценке экологического состояния лесных экосистем и их биоразнообразия [3]. Уникальным объектом для изучения флористического богатства являются черноольховые насаждения. Они имеют высокое экологическое значение как водоохраные участки и уникальные места обитания растений, а также представляют значительный интерес как хранители видового разнообразия [4].

В Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике (заповедник), расположенном в границах зоны отчуждения Чернобыльской АЭС, черноольховые леса по данным лесоустройства на 2020 г. занимают 14783,1 га или 10,6 % лесопокрытой площади. В их типологической структуре доминируют черноольшаники: папоротниковый (34,2 % от площади формации), осоковый (16,9 %) и снытевый (15,2 %). Произрастают они на гидроморфных (черноольшаники папоротниковый и осоковый) и полугидроморфных (черноольшаник снытевый) почвах [5].

Более 80 % площади черноольховых лесов находится в заповедной зоне, которые с 1986 г. не подвергаются антропогенному воздействию. Влияние на их формирование и структуру, включая ЖНП, до аварии на ЧАЭС оказывали широкомасштабные гидротехнические мелиорации сопредельных земель [6], после аварии – искусственное подтопление и заболачивание территорий, возрастные сукцессии, вредители и болезни леса [5], [7], а также изменение климата, сопровождавшееся снижением увлажнения территории, ростом повторяемости и глубины засушливых явлений [8], [9]. Это привело к непродолжительным весенним затоплениям поверхности почвы или их отсутствию, к понижению уровней грунтовых вод в черноольшаниках. Все это повлияло на состав и структуру ЖНП в них.

Цель исследований – дать современную характеристику ЖНП в высоковозрастных насаждениях преобладающих черноольховых типов леса заповедника.

Объекты и методика исследований. Объект исследований – ЖНП в наиболее распространенных типах черноольховых лесов заповедника. В соответствии с источником [10] в высоковозрастных насаждениях ольхи черной были заложены 23 временные пробные площади (ВПП) размером 50 × 50 м, в том числе в черноольшанике папоротниковом – 9, снытевом и осоковом – по 7. Древостои ольхи черной 51–80 летнего возраста по составу чистые или с небольшой примесью березы, дуба и других пород, полнотой 0,78–1,28, по запасам стволовой древесины близкие к нормальным насаждениям. Их лесоводственно-таксационная характеристика приведена в работе [11].

Наиболее часто в насаждениях данного типа леса встречаются *Dryopteris carthusiana* (Vill.) H. P. Fuchs. (на 100 % ВПП), *Geranium robertianum* L., *Urtica dioica* L., *Maianthemum bifolium* (L.) F. W. Schmidt. (по 85,7 %), *Carex canescens* L. (71,4 %), *Poa trivialis* L., *Iris pseudacorus* L., *Asarum europaeum* L., *Polygonatum multiflorum* (L.) All., *Convallaria majalis* L., *Moehringia trinervia* (L.) Clairv., *Juncus effusus* L., *Chelidonium majus* L. (по 57,1 %). Крайне редкие встречи зафиксированы у 16 (32,6 % от общего количества в типе леса) видов ЖНП.

Таблица 1 – Обилие* видов ЖНП в черноольшаниках

[illegible]

7	<i>Athyrium filix-femina</i>
---	------------------------------

7	<i>Athyrium filix-femina</i> (L.) Roth	-	-	-	-	-	-	-	4	-	5	5	-	4	4	4	5	-	-	1	-	-	1	-
8	<i>Bidens tripartitus</i> L.	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	<i>B. frondosus</i> L.	-	r	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-
10	<i>Calamagrostis canescens</i> (Web. ex F. H. Wigg.) Roth	-	-	-	-	-	-	-	2	2	-	1	2	2	-	2	2	-	1	+	-	1	1	+
11	<i>Carex acuta</i> L.	-	-	-	1	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	<i>C. acutiformis</i> Ehrh.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	4	-	5	-	4
13	<i>C. palustris</i> L.	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2	-	-	-	2	1	-	1	1	1	1	1	1	-
14	<i>C. canescens</i> L.	2	1	1	-	-	1	1	4	4	4	3	3	3	-	-	3	5	5	5	5	4	5	5
15	<i>C. elongata</i> L.	-	-	-	-	-	-	-	2	2	1	2	1	-	2	1	-	5	4	5	5	4	5	4
16	<i>C. pseudocyperus</i> L.	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2	-	2	-	-	-	-	4	4	-	-	-	-	-
17	<i>C. pallescens</i> L.	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	<i>C. nigra</i> (L.) Reichard	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	4	5	5	5	5	5
19	<i>C. vesicaria</i> L.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	3	4	4	4	-	-
20	<i>Chelidonium majus</i> L.	1	-	-	1	1	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	r	-	-	-	-	-	-	-
21	<i>Comarum palustre</i> L.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1	2	2	-	-	-
22	<i>Convallaria majalis</i> L.	1	-	-	+	1	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
23	<i>Cruciata verna</i> (Scop.) Gutermann et Ehrend. (<i>C. glabra</i> (L.) Ehrend.)	-	-	r	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	<i>Dentaria bulbifera</i> L.	-	-	-	r	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	<i>Dryopteris carthusiana</i> (Vill.) H. P. Fuchs.	2	2	1	2	1	2	1	4	4	5	4	5	5	3	3	4	-	3	-	2	3	-	3
26	<i>Equisetum sylvaticum</i> L.	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	<i>Filipendula ulmaria</i> (L.) Maxim. (<i>Filipendula denudata</i> (J. et C. Presl) Fritsch)	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	3	-	-	-	1	-	-	-
28	<i>Fragaria vesca</i> L.	+	-	-	-	r	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	<i>Galium aparine</i> L.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	<i>G. odoratum</i> (L.) Scop.	1	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	<i>G. palustre</i> L.	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	3	3	-
32	<i>Galeopsis bifida</i> Boenn.	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	<i>G. ladanum</i> L.	-	1	-	-	-	1	-	-	+	-	-	-	-	-	r	-	-	1	1	+	-	1	r
34	<i>Galeobdolon luteum</i> Huds.	3	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	<i>Geranium robertianum</i> L.	2	2	2	1	2	-	2	2	2	-	1	2	-	2	1	-	2	2	2	2	2	-	1
36	<i>Geum rivale</i> L.	-	3	2	3	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	1	-	-	2	-	1	-	-	-
37	<i>G. urbanum</i> L.	+	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	<i>Glechoma hederacea</i> L.	-	-	-	-	-	r	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
39	<i>Iris pseudacorus</i> L.	1	+	-	+	1	-	-	2	2	-	-	2	-	1	1	-	-	1	+	+	+	-	-
40	<i>Impatiens noli-tangere</i> L.	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
41	<i>I. glandulifera</i> Royle.	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	r	-	-	-	-
42	<i>J. effusus</i> L.	1	-	-	-	1	+	1	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
43	<i>Lathyrus niger</i> (L.) Bernh.	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	<i>L. vernus</i> (L.) Bernh. (<i>Orobis vernus</i> L.)	1	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45	<i>Luzula pilosa</i> (L.) Willd.	-	-	1	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
46	<i>Lycopus europaeus</i> L.	-	-	-	-	-	-	-	-	3	3	-	3	-	-	-	-	-	-	2	2	2	-	1
47	<i>Lythrum salicaria</i> L.	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
48	<i>Lysimachia nummularia</i> L.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	+	-	-	-	-	-	-	1	-	-
49	<i>L. vulgaris</i> L.	2	-	1	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2	2	-	-	-
50	<i>Maianthemum bifolium</i> (L.) F. W. Schmidt.	2	1	1	1	+	1	-	-	-	1	2	1	-	-	-	2	-	-	-	-	-	r	-
51	<i>Menyanthes trifoliata</i> L.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-
52	<i>Moehringia trinervia</i> (L.) Clairv.	-	1	1	-	1	1	-	-	-	1	+	1	-	+	r	-	-	1	-	+	-	-	1
53	<i>Mycelis muralis</i> (L.) Dumort.	-	-	r	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54	<i>Oxalis acetosella</i> L.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	<i>Paris quadrifolia</i> L.	-	-	1	2	2	-	-	1	-	-	-	-	-	-	+	r	-	-	-	-	-	-	-
56	<i>Persicaria hydropiper</i> (L.) Delarb. (<i>Polygonum hydropiper</i> L.)	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
57	<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2	1	-	-	2	2	-	-	-	-	-	2	2	1
58	<i>Poa trivialis</i> L.	1	1	2	-	3	-	-	-	2	-	2	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59	<i>Polygonatum multiflorum</i> (L.) All.	1	-	1	1	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-
60	<i>Pteridium latiusculum</i> (Desv.) Hieron. ex R. E. Fries (<i>P. aquilinum</i> auct. non (L.) Kuhn)	1	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	<i>Pyrola rotundifolia</i> L.	-	-	-	-	r	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

[illegible]

Для черноольшаника снытевого характерно значительное преобладание мезотрофных растений (67,3 % от общего числа видов) при значительно меньшей доле эвтрофов (30,6 %) и единичном присутствии олиготрофов (2,1 %). Среди гигроморф доминируют мезофиты 67,4 % (таблица 2).

Экологические группы растений	Черноольшанник сытневый			Черноольшанник папоротниковый			Черноольшанник осоковый		
	Беларусь по [18]	Полесье по [19]	заповедник	Беларусь по [18]	Полесье по [19]	заповедник	Беларусь по [18]	Полесье по [19]	заповедник
По трофности почв									
Олиготрофы	—	—	2,1	—	—	—	—	—	—
Мезотрофы	51,3	63,7	67,3	37,5	55,6	56,1	44,5	60,0	51,4
Мезозвтрофы	10,3	—	—	6,3	—	—	24,3	—	2,7
Эвтрофы	38,4	36,3	30,6	56,2	44,4	43,9	31,2	40,0	45,9
По увлажнению									
Мезоксерофиты	—	—	—	—	—	—	2,4	—	—
Мезофиты	41,0	38,9	67,4	22,9	38,9	36,5	17,1	30,0	32,4
Мезогигрофиты	23,1	27,8	12,2	22,9	22,2	14,7	17,1	15,0	18,9
Гипромезофиты	10,3	11,1	10,2	10,4	11,1	14,7	26,8	15,0	13,5
Гигрофиты	25,6	22,2	10,2	43,8	27,8	34,1	36,6	40,0	35,2

В черноольшанике осоковом 100 % встречаемостью выделяются *Carex nigra* (L.) Reichard, *C. canescens* L. и *Urtica dioica* L. Очень часты встречи *Geranium robertianum* L., *Caltha palustris* L. (по 85,7 %), *Carex vesicaria* L., *Calamagrostis canescens* (Web. ex F. H. Wigg.)

Roth., *Symphytum officinale* L. (по 71,4 %). Существенно реже обнаруживаются *Carex acutiformis* Ehrh., *Dryopteris carthusiana* (Vill.) H. P. Fuchs., *Iris pseudacorus* L. и *Lycopus europaeus* L. (по 57,1 %). Весьма редко регистрировались 12 (32,4 %) видов ЖНП.

Для этого типа леса свойственно доминирование мезотрофных растений (54,1 %) при содоминировании эвтрофов (45,9 %). Из гигроморфных групп преобладают гигрофиты 35,2 %, и мезофиты (32,4 %), ниже доля мезогигрофитов – 18,9 % и гигромезофитов – 13,5 %.

Фоновые виды ЖНП черноольховых лесов заповедника (таблица 1) Белорусского Полесья [19] и Беларуси [18] в общем совпадают. Но в заповеднике в сравнении с регионом в их число дополнительно входят *Stellaria holostea* L. и *Asarum europaeum* L. – в черноольшанике снытевом, *Lycopus europaeus* L. и *Carex canescens* L. – в папоротниковом, *Urtica dioica* L. и *C. acutiformis* Ehrh. – в осоковом.

Относительные распределения видового состава ЖНП по экологическим группам растений в черноольшаниках заповедника, Полесья [19] и Беларуси [18], по приведенным в этих работах данным, свидетельствуют об определенных различиях их структуре (таблица 2). При одинаковом (эвтрофно-мезотрофном) трофоморфном статусе ЖНП сравниваемых территорий и типов леса, структуры и распределению растений по группам, требовательности к плодородию почвы черноольховых лесов заповедника весьма близка к региональной. При этом в черноольшаниках заповедника отмечается повышенный удельный вес мезотрофных растений, и даже фиксируется появление олиготрофов.

Гигроморфная структура ЖНП в черноольшанике снытевом в регионе и в целом по Беларуси близкая. В заповеднике наблюдается абсолютное доминирование мезофитов при пониженной доле мезогигрофитов и гигрофитов. Черноольшаники папоротниковые в более теплообеспеченном и засушливом Полесье в сравнении с Беларусью выделяются повышенным удельным весом в составе ЖНП мезофитов и пониженным гигрофитов. В заповеднике удельный вес мезофитов близок к региональному при высокой доле гигрофитов. В осоковом типе леса, учитывая неполный перечень видов анализируемой флоры ЖНП Полесья [19], ее распределения в заповеднике и регионе можно считать сходными. В сравнении с Беларусью в ее составе больше мезофитов и меньше гигромезофитов.

На данное время в экологической структуре ЖНП в черноольшаников заповедника в сравнении с региональной (разница между исследованиями составляет более 40 лет) констатируется сокращение удельного веса гигрофитов и рост доли мезофитов. Полагаем, что наблюдаемая тенденция изменения гигроморфного состава травяного покрова в сторону его ксерофитизации обусловлены локальными нарушениями гидрологического режима и региональными изменениями климата.

Установлено малое сходство флоры ЖНП в черноольшаниках заповедника и Беларуси: Коэффициенты Жаккара в снытевом, папоротниковом и осоковом типах леса составляют 0,22, 0,37 и 0,36, индексы Чекановского-Сьеренсена – 0,36, 0,54 и 0,53 соответственно. Также низки индексы Симпсона (степени включения флоры ЖНП заповедника в список по стране) – 18,2 % в черноольшанике снытевом, 27,0 % в папоротниковом и 26,9 % в осоковом.

Закключение. Современный видовой состав травянистых растений ЖНП в высоковозрастных насаждениях ольхи черной в заповеднике относительно беден и несколько специфичен. В его составе выявлено 73 вида сосудистых растений (49 видов в черноольшанике снытевом, 41 – в папоротниковом, 37 – в осоковом), относящихся к 36 семействам отделов *Magnoliophyta* – 69 видов (94,5 %), *Polypodiophyta* – 3 вида (4,1 %) и *Equisetophyta* – 1 вид (1,4 %). Доминантными семействами являются *Cyperaceae*, представленное 8 видами (11,0 %), *Lamiaceae* – 6 видами (8,2 %), *Rosaceae* – 5 видов (6,8 %), *Rubiaceae*, *Ranunculaceae* – по 4 вида (по 5,5 %), *Asteraceae*, *Primulaceae*, *Caryophyllaceae*, *Convallariaceae*, *Fabaceae*, *Poaceae* – по 3 вида (по 4,1 %). Остальные 26 семейств представлены 1–2 видами растений.

По встречаемости (в порядке ее уменьшения) в насаждениях лидируют *Dryopteris carthusiana* (Vill.) H. P. Fuchs., *Geranium robertianum* L., *Urtica dioica* L. – в снытевом типе леса, *Dryopteris carthusiana* (Vill.) H. P. Fuchs., *Athyrium filix-femina* (L.) Roth., *Carex elongata* L. – в папоротниковом, *Carex nigra* (L.) Reichard, *C. canescens* L. и *Urtica dioica* L. – в осоковом.

Общее проективное покрытие почвы ЖНП находится в пределах 80–100 %. На фоне его ксерофитизации наблюдаются некоторые отличия экологической структуры и фоновых видов черноольшаников заповедника от флоры ЖНП Белорусского Полесья и страны. Современный экологический статус ЖНП заповедника определяется как мезотрофно-эвтрофный, мезофитный (черноольшаник снытевый), эвтрофно-мезотрофный, гигрофитно-мезофитный (папоротниковый), эвтрофно-мезотрофный, мезофитно-гигрофитный (осоковый).

Изменения ЖНП заповедника и современное его состояние обусловлены широкомасштабными гидроосушительными работами 1950–1980 гг., изменениями погодно-климатических условий и, возможно, отсутствием антропогенного воздействия.

Литература

1. Понятовская, В. М. Учет обилия и особенности размещения видов в естественных растительных сообществах / В. М. Понятовская // Полевая геоботаника. – М. – Л., 1964. – Т. 3. – С. 209–299.
2. Беляева, Е. О. Структурные изменения в живом напочвенном покрове на объектах комплексного ухода за лесом (на примере Ленинградской области) : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук : 06.03.02 / Е. О. Беляева. – СПб., 2012. – 21 с.
3. Колесниченко, М. В. Лесомелиорация с основами лесоводства : [Для агр. спец.] / М. В. Колесниченко – М. : Изд-во «Колос», 1981. – 335 с.
4. Голушева, А. Н. Материалы к ценофлоре черноольшаников реки Майна (Низкое Заволжье) / А. Н. Голушева, Н. С. Раков, С. А. Сенатор, С. В. Саксонов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 5 – С. 87–94.
5. Гарбарук Д. К. Структура черноольховых лесов Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / Д. К. Гарбарук, А. В. Углынец // Особо охраняемые природные территории Беларуси. Исследования : сб. науч. ст. Березинского биосферного заповедника. – 2017. – Вып. 12. – С. 32–49.
6. Проблемы мелиорации и освоения земель / А. В. Алексанкин [и др.] // Проблемы Полесья. – 1972. – № 1. – С. 8–37.
7. Груммо, Д. Г. Динамика лесной растительности в районе аварии на Чернобыльской АЭС / Д. Г. Груммо, М. М. Сак // НАН Беларуси, Ин-т леса. – Гомель, 2013. – Вып. 73 : Проблемы лесоведения и лесоводства. – С. 416–432.
8. Логинов, В. Ф. Изменение климата Беларуси : причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – 2-е изд. – Минск : Энциклопедикс, 2020. – 264 с.
9. Бровка, Ю. А. Изменение гидротермического коэффициента и повторяемости экстремальных условий увлажнения на территории Беларуси в период потепления климата / Ю. А. Бровка, И. В. Буюков // Природопользование. – 2020. – № 2. – С. 5–18.
10. Справочник таксатора / В. С. Мирошников [и др.] ; под общ. ред. В. С. Мирошникова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск : Ураджай, 1980. – 360 с.
11. Углынец, А. В. Продуктивность высоковозрастных древостоев ольхи черной в заповедной зоне Полесского заповедника / А. В. Углынец, Д. К. Гарбарук, С. В. Шумак // Сб. науч. тр. ; НАН Беларуси, Ин-т леса. – Гомель, 2021. – Вып. 81 : Проблемы лесоведения и лесоводства. – С. 83–90.
12. Определитель высших растений Беларуси / под ред. В. И. Парфенова. – Минск, 1999. – 472 с.
13. Флора Беларуси. Сосудистые растения : в 6 т. / Р. Ю. Блажевич [и др.]. – Минск : Беларуская навука. – Т. 3. *Liliopsida (Agavaceae, Alliaceae, Amaryllidaceae, Asparagaceae, Asphodelaceae, Cannaceae, Colchicaceae, Convallariaceae, Cyperaceae, Dioscoreaceae, Iridaceae, Ixioliriacae, Hemerocallidaceae, Hostaceae, Hyacinthaceae, Juncaceae, Liliaceae, Melanthiaceae, Ophiopogonaceae, Orchidaceae, Pontederiaceae, Tofieldiaceae, Trilliaceae)* / Д. В. Дубовик [и др.] ; под общ. ред. В. И. Парфенова ; НАН Беларуси, Ин-т эксперимент. ботаники им. В. Ф. Купревича. – 2017. – 573 с.
14. Воронов, А. Г. Геоботаника. Учебное пособие для ун-тов и пед. ин-тов / А. Г. Воронов. – Изд. 2-е, испр. и доп. – М. : Высшая школа, 1973. – 384 с.
15. Браун, Д. Методы исследования и учета растительности / Д. Браун ; перевод с англ. под общ. ред. и с предисловием д.б.н. Т. А. Работнова. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1957. – 316 с.
16. Учебная полевая геоботаническая практика : метод. рекомен. для студ. геогр. ф-та спец. 1-31 02 01 «География (по направлениям)», 1-31 02 02 «Гидрометеорология», 1-31 02 03 «Космо-аэрокартография», 1-33 01 02 «Геоэкология» : в 2 ч. ; сост.: Я. К. Еловичева, Н. М. Писарчук, А. В. Соколова. – Минск, 2015. – Ч. 2 – 266 с.
17. Козловская, Н. В. Хорология флоры Белоруссии / Н. В. Козловская, В. И. Парфенов. – Минск : Наука и техника, 1972. – 312 с.
18. Юркевич, И. Д. Типы и ассоциации черноольховых лесов / И. Д. Юркевич, В. С. Гельтман, Н. Ф. Ловчий. – Минск : Наука и техника, 1968. – 376 с.
19. Юркевич, И. Д. Леса Белорусского Полесья (геоботанические исследования) / И. Д. Юркевич, Н. Ф. Ловчий, В. С. Гельтман. – Минск : Наука и техника, 1977. – 288 с.
20. Углынец, А. В. Загрязнение ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr доминантных видов живого напочвенного покрова в черноольшаниках зоны отчуждения Чернобыльской АЭС / А. В. Углынец, Д. К. Гарбарук // Известия Гомельского гос. у-та им. Ф. Скорины. – 2020. – № 6 (123). – С. 85–91.
21. Бойко, А. В. Биоэкологические особенности лесных фитоценозов Припятского заповедника / А. В. Бойко, И. В. Лознухо. – Минск : Наука и техника, 1982. – 134 с.

Информатика

УДК 004.415.2.031.43

Разработка и использование голосового помощника на примере программного приложения «Омикрон»

А.В. ДОЛЖЕНОК, Н.Б. ОСИПЕНКО

Статья посвящена описанию особенностей разработки голосового помощника и принципов его работы в виде программного прототипа «Омикрон» на языке программирования Python с использованием его библиотек и модулей. Команды «Омикрона» работают как при помощи Интернета, так и без него, в некоторых командах задействовано использование баз данных NoSQL и MSSQL Server. Разработанный программный продукт «Омикрон» позволяет выполнить ряд голосовых команд пользователя и управлять игрой. Приведены результаты верификации работы приложения.

Ключевые слова: голосовой помощник, распознавание речи, искусственный интеллект.

The article is devoted to the description of the development features of the voice assistant and the principles of its operation in the form of the Omicron software prototype in the Python programming language using its libraries and modules. Omicron commands work both with and without the Internet, some commands use NoSQL and MSSQL Server databases. The developed software product “Omicron” allows you to execute a number of user voice commands and control the game. The results of verification of the application operation are given.

Keywords: voice assistant, speech recognition, artificial intelligence.

Введение. Голосовые помощники – это боты, которые работают при помощи распознавания голоса и обработки естественного языка, чтобы отвечать на вопросы, вести разговоры, осуществлять запуск простых задач. С появлением такой опции выполнять многие запросы стало намного удобнее. Голосовые помощники построены на искусственном интеллекте и технологиях машинного обучения. Одна из первых попыток реализации голосового ввода в поисковых системах была реализована в 2002 г. Google, а первой полноценной интерактивной помощницей, поддерживающей осмысленный диалог с пользователем, стала система Siri, введенная в 2007 г. Далее появились Cortana (Microsoft), Alexa (Amazon) и AliGenie (Alibaba). В 2017–2019 гг. появились русскоязычные приложения: Алиса (Яндекс), Олег (банк «Тинькофф») и Маруся (Mail.Ru Group), не уступающие своим зарубежным «коллегам», особенно в распознавании русскоязычной речи.

Голосовые помощники, представленные на IT рынке, постоянно расширяют свои возможности, приобретают новые функции. При этом у каждого из них есть свои преимущества и недостатки [1]. Актуальным направлением развития помощников является их активная интеграция в «умный» дом: свои ассистенты присутствуют у видеокамер безопасности, термостатов и даже бытовой техники в рамках «интернета вещей». Голосовые помощники берут на себя рутинные задачи и сокращают расходы компании на их выполнение. Замена голосовыми ботами сотрудников контактных центров позволяет экономить ресурсы предприятий и компаний.

В настоящей статье предлагается описание прототипа голосового помощника «Омикрон», спроектированного в среде IBM Rational Rose на основе нотации языка UML и разработанного на языке программирования Python. Сегодня использование голосового помощника является одним из перспективных направлений IT рынка. Его используют не только крупные IT компании, а также различные колл-центры, банки. Использование голосового помощника в колл-центре в виде голосового бота уменьшает время ожидания обращающихся граждан, так как данный бот запрограммирован на ответы, вопросами для которых являются часто задаваемые обращения. Внедрение голосового помощника в телевизоры, компьютеры и телефоны способствует упрощению работы с данными устройствами.

Проектирование приложения. Диаграмма вариантов использования программного приложения голосового помощника «Омикрон» представлена на рисунке 1. На ней показана совокупность выполняемых системой действий, которые имеют значение для пользователя, и отвечают на вопрос «Что должна выполнять система?», не отвечая на вопрос «Как она должна выполнять это?». Команды «Омикрона» работают как при помощи Интернета, так и без него, в некоторых командах задействовано использование базы данных MS SQL Server для хранения истории пользователя и MongoDB – для дополнительных сведений, которые были запрошены у голосового помощника.

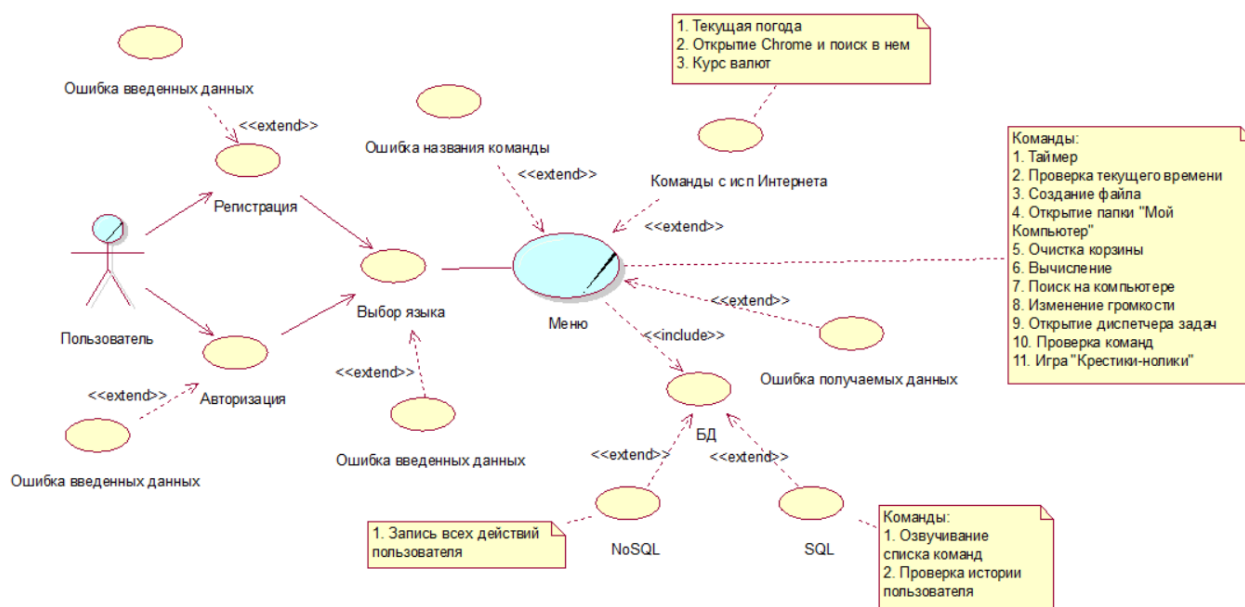


Рисунок 1 – Диаграмма вариантов использования прототипа голосового помощника «Омикрон»

На данный момент разработанный программный продукт «Омикрон» позволяет выполнить голосовые команды пользователя: включение таймера, озвучивание текущего времени и погоды, создание файла, открытие папки «Мой компьютер», очищение корзины, открытие и поиск в браузере Chrome, вычисление простых математических действий, поиск файлов, изменение языка раскладки и громкости, озвучивание курса валют, открытие диспетчера задач, описание всех команд, которые он умеет делать, просмотр истории и играть в «Крестики-Нолики». Для удобства использования голосового помощника в будущем для отслеживания истории обращений к приложению «Омикрон» была разработана авторизация пользователя с выбором языка, которая осуществляется при помощи графической библиотеки Tkinter.

Особенности реализации игрового приложения. При реализации программы на языке программирования Python создается новый проект в PyCharm, куда подключаются модули, библиотеки и пакеты (через import) os, time, pyttsx3, speech_recognition, docx, pyautogui, webbrowser, requests, pyodbc. Модуль os позволяет работать с основными задачами операционной системы, будь то платформа Windows или Linux. Модуль time предлагает множество способов представления времени в коде, таких как объекты, числа и строки; а также позволяет выполнять функции, отличные от представления времени, такие как ожидание во время выполнения кода и измерение производительности кода. Библиотека Pyttsx3 используется для преобразования текста в речь Python. В отличие от альтернативных библиотек он работает в автономном режиме и совместим с Python 2 и Python 3. Приложение вызывает «pyttsx3.init()», чтобы получить ссылку на Pyttsx3. Модуль speech_recognition – это система распознавания речи, в основном переводит произнесенные слова в текст. Преимущество использования системы распознавания речи в том, что она преодолевает грамотность. Модель распознавания речи может использоваться разной по грамотности аудиторией, сосредоточившись на устных аргументах. Библиотека docx – это библиотека для создания и обновления файлов Microsoft Word (.docx). Модуль PyAutoGUI предоставляет скриптам Python кон-

троль над мышью и клавиатурой для автоматизации взаимодействия с другими приложениями. Модуль `winshell` – это легкая оболочка для функций оболочки Windows. Библиотека `requests` – это простая HTTP-библиотека. Пакет `pyodbc` позволяет подключиться к базе данных SQL с помощью Python. Модуль `random` позволяет использовать метод «`random.randint(a, b)`», который возвращает случайное целое число из промежутка $[a, b]$.

На основе упомянутых модулей, библиотек и пакетов Python созданы две основные функции прототипа голосового помощника:

1) функция с параметром (строка, которая должна озвучиваться), преобразующая текст в речь, используя специальную библиотеку преобразования;

2) функция без параметра для преобразования речи в текст.

На их основе можно свободно создавать любые функции для команд, которые будет использовать голосовой помощник.

Реляционная база данных MS SQL Server используется в прототипе голосового помощника «Омикрон» для записи однотипных и структурированных данных (для хранения истории пользователя), а нереляционная база данных Mongo DB – для хранения различных по типу и количеству получаемых данных (для хранения дополнительных сведений, которые были запрошены у голосового помощника).

С целью апробации возможности реализации игрового компонента в голосовом помощнике была выбрана известная детская игра «Крестики-нолики», она осуществлена с помощью языка программирования Python, благодаря которому был внедрен простой способ реализации искусственного интеллекта. На примере игры «Крестики-Нолики» показан принцип использования искусственного интеллекта при принятии решений голосовым помощником, который самостоятельно продумывает и осуществляет ходы.

Реализация ходов игрока в игре «Крестики-нолики». Игра «Крестики-нолики» запускается как одна из команд голосового помощника при помощи ключевого слова «игра» / «game», после чего голосовой помощник ожидает команду. После того, как пользователь скажет ключевые слова, в консоли запускается приветствие и рисуется помеченное цифрами из интервала $[1, 9]$ поле размером 3×3 . Голосовой помощник спрашивает у пользователя, на какой квадратик он хочет поставить свой X. Пользователь должен ответить цифру из диапазона от 1 до 9. Если же пользователь назовет другое число, прототип голосового помощника «Омикрон» сообщит ему об этом.

Данная игра предусматривает одного игрока. В роли второго игрока выступает компьютер. Ходы компьютера и пользователя сопровождаются голосом.

При создании поля формируется вектор `board[10]` с первоначальным значением в виде пустой строки. Функция `insertLetter()` принимает два параметра: `letter` и `pos`. Значение `pos` определяется с помощью вектора `board[10]`. «Омикрон» вставит символ «X» в заданную игроком позицию, которая будет храниться в `board[10]`. Функция `spaceIsFree(pos)` сообщит нам, свободно ли данное пространство (отсутствуют ли в некотором элементе игрового пространства «X» или «O»). У нее есть один параметр `pos`, который будет цифрой от 1 до 9. Функция `printBoard(board)` принимает поле в качестве параметра и выводит его. Функция `isWinner()` сообщит нам, выиграл ли данный символ на текущем поле. У функции два параметра: `bo` (`board`) и `le` (`letter`). Символ должен быть «X» или «O». Мы просто проверим каждую возможную выигрышную линию на доске и посмотрим, заполнена ли она данным символом. Функция `main()` вызывается, чтобы начать игру. Функция `isBoardFull()` принимает `board`, как параметр, и просто возвращает `True`, если поле заполнено, и `False`, если это не так. Функция `playerMove()` запрашивает у пользователя число, на какое место ставить «X», и проверяет его. Если число правильное, мы добавляем «X» в игровое поле, иначе – голосовой помощник будет ожидать, пока пользователь не скажет верное число.

Реализация ходов компьютера в игре «Крестики-нолики». Поведение компьютера описывает функция `compMove()` с использованием искусственного интеллекта. Она изучает все поле и определяет, какой ход лучше сделать на основании правил, по которым формируется алгоритм ходов компьютера: если есть выигрышный ход, то берется он; если у пользователя есть выигрышный следующий ход, то компьютер занимает позицию, чтобы пользова-

тель не победил; компьютер занимает позицию в уголках, если свободно больше одного; компьютер занимает центральную позицию; компьютер занимает боковую позицию, если доступно больше одной; если ход невозможен, игра заканчивается с результатом ничья. Функция `selectRandom(li)` определит случайным образом, куда следует сделать ход, учитывая список возможных позиций. Функция `tic_tac_toe_eng()` запускает весь процесс игры и от пользователя зависит, начнется эта игра или нет.

Результаты апробации. Приложение прошло верификацию на тестовых данных. Верификация прототипа голосового помощника «Омикрон» с помощью метода «matplotlib.pyplot» модуля `matplotlib` показала, что при правильном произношении команды он работает точно, иначе просит повторить команду. На рисунке 2 приведен анализ работы команды голосового помощника «Открыть Chrome» этим методом. Для того чтобы открыть Chrome, необходимо сказать «Омикрону»: «Открой Хром», на данный запрос «Омикрон» ответит: «Я в процессе открытия браузера». После чего откроется браузер и «Омикрон» спросит: «Что ты хочешь найти?». Получив ответ от пользователя, «Омикрон» найдет ответ на интересующий пользователя вопрос. На графике видно, что прототип голосового помощника «Омикрон» имел некоторые сложности при выполнении запроса на английском языке, что с большой вероятностью зависит от акцента пользователя; при использовании русского языка прототип распознает речь без ошибок.

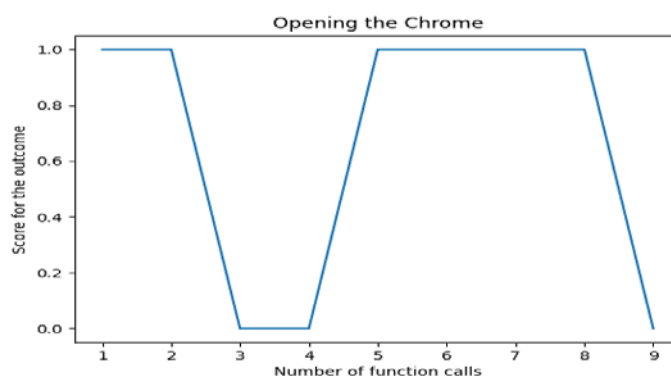


Рисунок 2 – Результат выполнения работы команды «Открыть Chrome»

Была проведена апробация игры «Крестики-нолики» с компьютером, который формирует ответные ходы на основе разработанного алгоритма. На рисунке 3 приведено семь ходов: четыре хода пользователя, обозначенных символом «X», и три хода компьютера, помеченных символом «O». В заключительной позиции игры выводится текст о том, кто одержал победу.

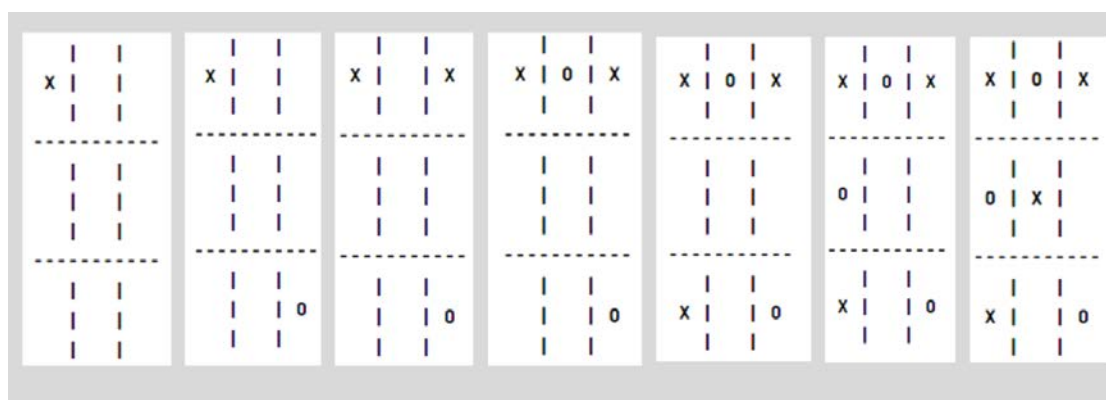


Рисунок 3 – Игра «Крестики-Нолики» с «Омикрон»

Заключение. В работе рассмотрена задача построения прототипа голосового помощника, который помогает пользователю управлять компьютером при помощи речи, отвечать на некоторые его вопросы, управлять игрой с использованием искусственного интеллекта.

Реализация игрового компонента показывает принцип работы голосового помощника, самостоятельно продумывающего и осуществляющего ходы. Разработанный готовый рабочий прототип доступен в сети Интернет по адресу https://github.com/ADolzhenok/Voice_assistant.

Интерактивные ассистенты служат не только для получения информации и общения. Они становятся всё более популярным инструментом для коммуникации с потребителями в бизнесе. Многие компании внедряют роботов в свои каналы взаимодействия с клиентами, например, в телефонную линию и чаты. Дальнейшее развитие экосистем умных девайсов приведет к появлению большого прибыльного рынка голосовых приложений, что даст толчок развитию новых бизнес-направлений для стартапов, команд программистов, интернет-компаний. Так, сеть ресторанов сможет выпустить приложение по созданию рецептов на основе базы данных миллионов ранее приготовленных блюд, которое будет руководить действиями повара-любителя прямо во время готовки. А продавцу кофе приложение посоветует, как правильно приготовить напиток.

Сегодня наметился устойчивый тренд на увеличение количества сегментов, в которых используются голосовые технологии, идея о полном отказе от общения с оператором утопична; живое общение в некоторых областях останется незаменимым, автоматизировать получится типовые запросы, а более сложные будут передаваться на обработку сотрудникам. Всё указывает на то, что в ближайшее время мы станем более тесно общаться с голосовыми помощниками в самых разных сферах. Их словарные запасы будут расти, а вместе с тем и распознаваемость запросов. Наиболее перспективным представляется использование голосовых помощников в различных рекомендательных системах, например, в медицинской диагностике или при выполнении простых медицинских операций. Внедрение голосового ассистента может значительно повысить эффективность, в частности, таких авторских рекомендательных систем, как подбор профессии [2], выбор фильма для просмотра [3]. Концепция таких систем описана в [4]. Не вызывает сомнений, что возможности голосового помощника постепенно распространятся с решения простых пользовательских требований, на решение более сложных и технически затратных задач, для реализации которых потребуются длительное обучение искусственного интеллекта.

Таким образом, продемонстрированные в статье возможности использования искусственного интеллекта позволят мотивировать начинающих разработчиков к более глубокому овладению инструментом машинного обучения с целью разработки приложений в наиболее актуальных областях жизнедеятельности общества.

Литература

1. Больше денег – больше слов : как голосовые помощники завоевывают рынок [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://rocketdata.ru/blog/voice-search-market#popup:cornerform>. – Дата доступа : 10.03.2022.
2. Осипенко, А. Н. Web-приложение для выбора сферы деятельности / А. Н. Осипенко, Н. Б. Осипенко, Ю. А. Слепенко // Проблемы физики, математики и техники. – 2018. – № 3 (36). – С. 87–94.
3. Мироненко, В. М. Автоматизация подбора персонифицированных предложений на примере задачи поиска фильма / Н. Б. Осипенко, В. М. Мироненко // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2020. – № 6 (123). – С. 105–110.
4. Осипенко, Н. Б. Концепция рекомендательной системы «Подбор решений, отвечающих предназначению человека» / Н. Б. Осипенко, А. Н. Осипенко // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2019. – № 6 (117). – С. 108–112.

Распознавание медицинских изображений в задачах компьютерной диагностики

Р.В. КОЗАРЬ, А.А. НАВРОЦКИЙ, А.Б. ГУРИНОВИЧ

В данной работе предлагается модификация алгоритма Виолы-Джонса для распознавания изображений, полученных методом оптической эндоскопии, который повышает точность распознавания. В данной работе представлены результаты проведенных тестов, которые доказывают эффективность и применимость данной методики.

Ключевые слова: эндоскопические снимки, Парето, распознавание, алгоритм Виолы-Джонса.

This paper proposes a modification of the Viola-Jones algorithm for recognizing images obtained by optical endoscopy, which improves the recognition accuracy. This paper presents the results of the conducted tests, which prove the effectiveness and applicability of this technique.

Keywords: endoscopic images, Pareto, recognition, Viola-Jones algorithm.

Введение. В наши дни существует огромное количество методов, подходов, алгоритмов для распознавания изображений, а также объектов на них. Один из них – это метод Виолы-Джонса. Важно отметить, что почти все существующие подобные методы основаны на одном принципе: калькуляция свертки с определенным паттерном.

В момент распознавания изображения с медицинского эндоскопа выше описанный подход ведет к тому, что существенно возрастают вычислительные объемы во время увеличения размеров самой области распознаваемого изображения. Для данного случая – это медицинское изображение. Поэтому в системах медицинской компьютерной диагностики применение подобного подхода малоэффективно.

Стоит отметить, что алгоритм Виолы-Джонса – это один из самых распространенных алгоритмов распознавания снимков, а также различных объектов на распознаваемых изображениях. Основа данного алгоритма – это так называемое сканирующее окно. Однако есть нюанс: использование данного «окна» может резко привести к увеличению нагрузки на алгоритм и как следствие – на физическое оборудование. Также использование данного окна приводит к увеличению самого снимка. Итог: негативные последствия по качеству распознавания и временном периоде, за который это распознавание осуществляется.

В текущей работе предлагается альтернативный способ решения проблемы, описанной выше. В работе были проанализированы результаты опытов, различных тестов и экспериментов, собранных учеными. Было рассмотрено около 50–55 источников: а именно кандидатские и докторские диссертации и их авторефераты, тезисы, статьи, а также книги, материалы научных конференций.

Описание метода распознавания изображений Виолы-Джонса. Метод, о котором уже упомянуто выше, основан на следующих положениях:

- все распознаваемые изображения приводятся в интегральное представление;
- при распознавании используются признаки (каскады) Хаара;
- в работе алгоритма присутствует и используется так называемый бустинг;
- все признаки передаются на вход классификатору, который, в свою очередь, возвращает либо положительный, либо отрицательный результат (истина или ложь);
- в работе алгоритма присутствуют и также используются каскады признаков.

Под классификацией мы понимаем моделирование, основная цель которого – разделение классов данных на различные множества [1, с. 40].

Также необходимо привести изображения в интегральный вид для того, чтобы можно было использовать так называемые каскады (признаки) Хаара.

Эти признаки нужны для нахождения необходимого объекта [2, с. 21]. Также применяется бустинг: это метаалгоритм машинного обучения, необходимый для уменьшения погрешности оценки. Он нужен для выбора наиболее подходящих признаков, которые более присущи стартовому, изначальному объекту на данной части изображения (в нашем случае – изображения, полученного с эндоскопической камеры).

Несколько признаков объединяются в каскады, которые нужны для того, чтобы как можно быстрее отклонить те сканирующие окна, в которых не найдена необходимая часть изображения, которая должна быть распознана. Также отметим, что те части (области) изображения, которые прошли через весь каскад, могут быть классифицированы только тогда, когда все прецеденты были классифицированы корректно и правильно [3, с. 21].

Анализ существующих подходов и решений. В наши дни существует несколько модификаций данного алгоритма, но, к сожалению, для медицинских изображений такие модификации отсутствуют. Их отсутствие объясняется тем, что изображения подобного рода весьма нестандартные. Причин тому может быть множество (например, невысокое разрешение или малый контраст). Также, для того, чтобы использовать те самые решения в области медицинской диагностики, необходимы значительные инженерные усилия. Поэтому оптимизация сводится к тому, чтобы наиболее оптимально реализовать алгоритм на заданной платформе, так как при случайных последующих выборах мы будем наблюдать изменения во всех параметрах оценки распознавания [4, с. 119].

В трудах других авторов можно найти решения на основе реализации из библиотеки *OpenCV*. *OpenCV* (*Open Source Computer Vision Library*) – это библиотека машинного зрения с открытым исходным кодом, библиотека методов компьютерного зрения, а также обработки изображений, численных алгоритмов общего назначения с открытым кодом. В этой библиотеке находится более двух тысяч методов, среди которых как классические, так и современные алгоритмы для машинного зрения и машинного обучения. Тем не менее сама реализация изменений практически не претерпевает. Для того, чтобы сравнить результаты распознавания обычно применяют так называемые статистические критерии [5, с. 375].

Имеются также подходы к решению данной проблемы, они основаны на виртуальном (визуальном поиске). Эта методика поиска используется для того, чтобы как можно быстрее распознать объект на изображении.

Модификация алгоритма была сравнена с алгоритмом + детектором Виолы-Джонса, который описан в библиотеке *OpenCV*. В итоге имеем следующее: выигрыш в ускорении в среднем 2,5 раза. Однако точность распознавания пострадала и стала немного ниже. Но для эндоскопических снимков такой подход абсолютно неприемлемый: специфика области вносит свои коррективы, поэтому распознавание должно работать абсолютно точно.

Модификация алгоритма Виолы-Джонса для эндоскопических снимков. В оригинальном алгоритме Виолы-Джонса окно сканирования двигается с шагом Δ . Размеры шага по осям ox и oy обозначим следующим образом (1):

$$\Delta x, \Delta y. \quad (1)$$

Если размеры шагов Δ равны (2), то по-прежнему применим обозначение Δ .

$$\Delta x = \Delta y. \quad (2)$$

Шаг сканирования – крайне важный показатель. Он влияет и на четкость, и на точность, и на качество, и даже на пропускную способность [6, с. 48]. Однако в однородных областях будет наблюдаться следующая зависимость: если увеличивается Δ – вероятность ложного срабатывания уменьшится. Также можно ускорить метод за счет увеличения Δ в тех областях снимков, которые не содержат искомый объект.

В разработанных реализациях Δ выбирают в промежутке $\{1; 2\}$.

Введем новое понятие – ступень выхода: индекс классификатора в каскаде, при попадании на который мы исключаем сканирующее окно. В ходе анализа работы алгоритма была выявлена следующая взаимосвязь: распознаваемая область и ступень выхода обратно пропорциональны. Рисунок 1 это иллюстрирует. Он показывает обратно пропорциональную зависимость яркости пикселя и ступени выхода.

Этот подход дает право увеличить Δ и при минимальной ступени выхода, и при приближении к объекту распознавания. Этим мы позволяем избегать лишних затрат физического оборудования и вычислительных мощностей на нормализацию окна поиска [7, с. 5]. Это необходимо для минимизации влияния иных внешних факторов (лишнее освещение и т. д.).

Для того, чтобы все наглядно оценить, были проанализированы изменения Δ при распознавании. Рисунок 2 иллюстрирует изображение постоянного шага $\Delta x = 2$. Из выше представленных иллюстраций прослеживается следующее: неадаптированный детектор Δ не может поместить окно в локальный максимум. А модифицированный шаг Δ – может.

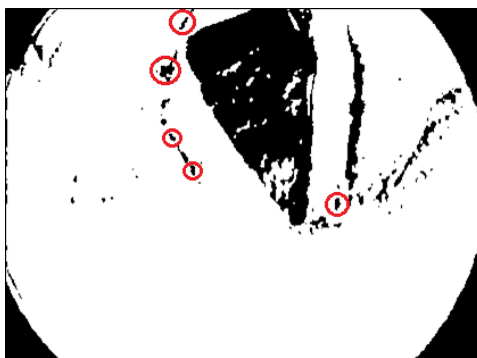


Рисунок 1 – Сканирующее окно на равномерных участках отвергается ранее (при условии, что отсутствует искомый паттерн). При приближении к необходимой области ступень выхода начинает возрастать



Рисунок 2 – Детальное изображение постоянного шага $\Delta x = 2$ при распознавании изображения

Рисунок 3 иллюстрирует детально рассмотренные постоянный шаг $\Delta x = 3$.

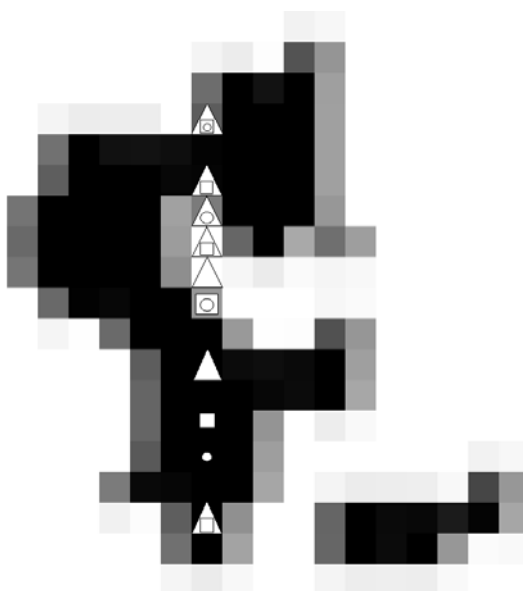


Рисунок 3 – Детальное изображение постоянного шага $\Delta x = 3$ при распознавании изображения

На представленных изображениях рассматриваются самые разные варианты шага Δ . Блоки серого цвета – пиксели от 207 до 216 (в увеличенном масштабе) по оси ox и от 147 до 125 по оси oy . Пиксель черного цвета (также увеличен масштаб) в позиции (212, 120) это правая нижняя часть снимка, представленного на рисунке 1.

Анализ проведенных исследований, результаты. В ходе данной работы для сравнения и анализа были реализованы следующие подходы:

- статический: Δx и Δy неизменны, равны 1, 2 или 3 соответственно;
- *OpenCV* вариант 1: $\Delta x = 2$ для всего распознаваемого эндоскопического снимка. При не обнаружении нужной области Δx уменьшается на 1, а Δy остается равной 1;
- *OpenCV* вариант 2: $\Delta x = 1$, если соотношение всех размеров оригинального снимка и уменьшенного более, чем на 2, иначе $\Delta x = 2$.

Необходимо отметить также, что при проведении экспериментов использовались так называемые масштабирующие коэффициенты (*scaling factor*) s и пороги слияния (*merging threshold*) γ , которые удовлетворяют следующим условиям (3).

$$\begin{aligned} s &\in \{1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5\} \\ \gamma &\in \{1, 2, 3, 4, 5\} \end{aligned} \quad (3)$$

Для сравнения результатов были взяты и использованы метрики, описанные следующими выражениями (4).

$$\begin{aligned} recall &= \frac{TP}{TP + EN} \\ precision &= \frac{TP}{TP + EP} \end{aligned} \quad (4)$$

где TP – количество корректно определенных объектов, EN – количество пропущенных объектов, FP – количество некорректных (ложных) срабатываний.

Все полученные результаты первого тестирования сравним по Парето и проиллюстрируем их на рисунке 4.

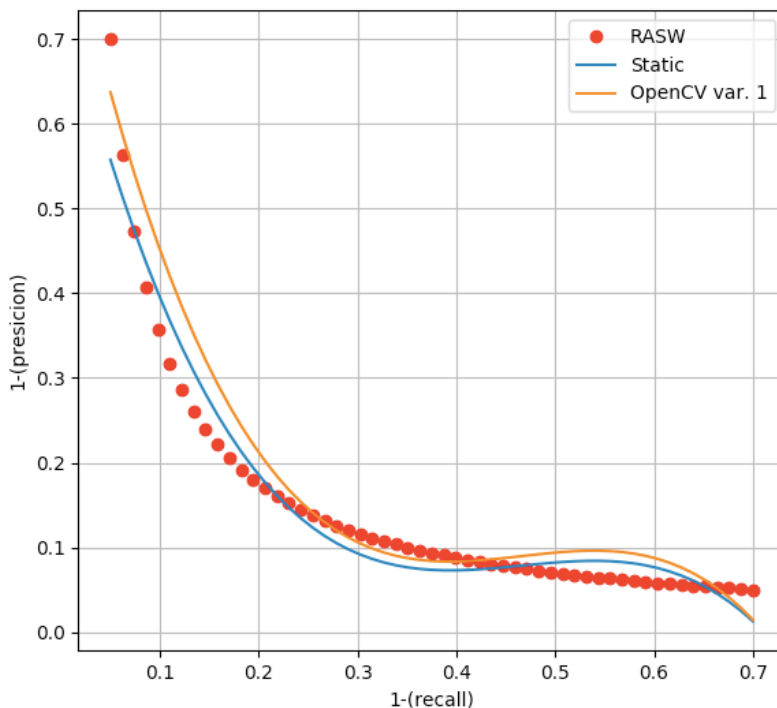


Рисунок 4 – Результаты первого тестирования: метрики – отзыв распознавания и точность распознавания

Для анализа введем следующую метрику $F1$, которая, по сути, означает средневзвешенное значение отзыва и точности распознавания. Формула метрики представлена ниже (5):

$$F1 = 2 \times \frac{precision \times recall}{precision + recall} \quad (5)$$

Результаты по данной метрике также сравнены по Парето и проиллюстрированы на рисунке 5.

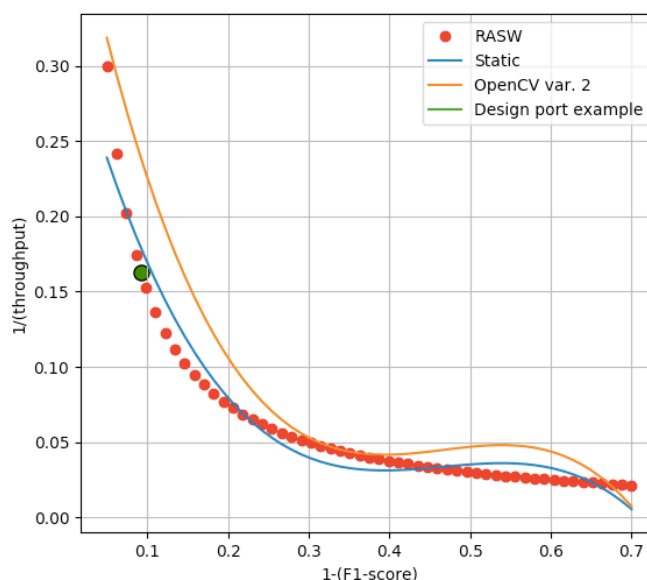


Рисунок 5 – Результаты второго тестирования: метрика $F1$

Выводы. В данной статье был разработан и предложен новый подход для адаптированного сканирующего окна с целью улучшения процесса распознавания объекта при использовании метода Виолы-Джонса, а также результаты его использования и сравнения с существующими методиками распознавания изображений.

Также были представлены результаты для реализации нового детектора распознавания эндоскопических снимков, который можно использовать в любом методе распознавания. Главный критерий – это наличие окна сканирования и каскадного классификатора (для использования признаков Хаара).

Если сравнить модифицированный алгоритм с существующими решениями, методами и подходами – то он дает гораздо более лучшие итоговые показатели (по метрикам $F1$ -score (комбинации *recall*, *precision*)).

И это чрезвычайно важно при распознавании эндоскопических снимков, так как при использовании данной модификации были приняты во внимание критически важные параметры поступающих на вход изображений, такие как неоднородность, с целью большего снижения объема вычислительных нагрузок без потери качества распознавания.

Литература

1. Паттерсон, Дж. Глубокое обучение с точки зрения практика / Дж. Паттерсон, А. Гибсон. – М. : ДМК Пресс, 2018. – 418 с.
2. Brousseau, B. An energy-efficient, fast FPGA hardware architecture for OpenCV compatible object detection / B. Brousseau, J. Rose. – Toronto : Toronto FPT Univ. Press, 2012. – P. 20–21.
3. Гудфеллоу, Я. Глубокое обучение / Я. Гудфеллоу, И. Бенджио, А. Курвилль. – М. : «ДМК Пресс», 2018. – 652 с.
4. Шапиро, Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Д. Стокман. – М. : Изд. Дом «Лаборатория знаний», 2015. – 763 с.
5. Местецкий, Л. М. Математические методы распознавания образов / Л. М. Местецкий. – М. : МГУ, ВМиК, 2002–2004. – С. 20–24.
6. Hiromoto, M. Partially parallel architecture for Adaboost based detection with haar-like features / M. Hiromoto, H. Sugano, R. Miyamoto // IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol. – 2009. – Т. 19. – P. 41–52.
7. Lampert, C. Beyond sliding windows : object localization by efficient subwindow search / C. Lampert, M. Blaschko, T. Hofmann. – Anchorage : Anchorage CVPR Press, 2008. – P. 1–8.

Моделирование динамики процесса воспроизводства популяции

А.П. Кончиц¹, Е.И. Сукач²

Рассматривается процесс воспроизводства популяции, выделяются параметры, влияющие на динамику возобновления популяции. Описывается класс линейных имитационных моделей, обеспечивающих получение интегральной характеристики динамики воспроизводства популяции в сложившейся среде её обитания. Предлагается билинейная модель, обоснованием точности которой служит аппарат вероятностно-алгебраического моделирования, что позволяет проследить динамику изменения половозрастной структуры исследуемой популяции и также уточнить численное значение скорости ее размножения с учётом изменяющейся структуры.

Ключевые слова: модели биологических процессов, вероятностно-алгебраическое моделирование, половозрастная структура популяции, параметры воспроизводства, повозрастные коэффициенты рождаемости, повозрастные коэффициенты смертности, репродуктивная ценность, репродуктивная алгебра.

The process of population reproduction is considered, the parameters affecting the dynamics of population renewal are identified. A class of linear simulation models is described, providing an integral characteristic of the dynamics of population reproduction in the slain habitat. A bilinear model is proposed, the justification of the accuracy of which is the apparatus of probabilistic-algebraic modeling, which makes it possible to trace the dynamics of the change in the age-sex structure of the studied population and also to clarify the numerical value of its reproduction rate taking into account the changing structure.

Keywords: models of biological processes, probabilistic-algebraic modeling, sex-age structure of population, reproduction parameters, age-related birth rates, age-related mortality rates, reproductive value, reproductive algebra.

Введение. Процесс воспроизводства популяции, как процесс самосохранения биологических объектов в ходе непрерывного их изменения, зависит от характеристик самой популяции (её половозрастной структуры и параметров воспроизводства) и внешних воздействий среды обитания. Он реализуется путем постоянного возобновления структуры и численности популяции в процессе смены поколений биологических объектов через рождения и смерти. Различия в распределении биологических объектов по полу и возрасту обуславливают диспропорции в протекании процессов рождаемости и смертности. Параметрами, определяющими структуру и численность популяции, являются количественные значения показателей рождаемости и смертности. Рождение относительно большего или меньшего числа потомства в отдельные годы находит свое отражение в повышенной или, наоборот, уменьшенной численности популяции в соответствующих возрастах. А смертность влияет на соотношение особей различных полов и, как следствие, на численное соотношение мужских и женских возрастных групп. Таким образом, очевидно и обратное влияние действующих процессов воспроизводства на структуру и численность популяции.

С другой стороны, характеристики половозрастной структуры и параметры воспроизводства популяции определяются с учетом внешних воздействий и сложившихся условий жизни, что косвенно влияет на их величину. Например, стимулирование рождаемости приводит к увеличению общего коэффициента рождаемости, что отражается на структурном составе особей женского пола популяции в будущем и влияет на увеличение общего коэффициента рождаемости, но уже за счет изменения структурного состава популяции.

Всё это свидетельствует о том, что комплексное и всестороннее представление о динамике процессов воспроизводства популяции можно получить только с учётом результирующего влияния ряда взаимозависимых факторов. Это затрудняет выделение роли каждого из них на исследуемый процесс и определяет выбор единственного метода, метода моделирования, позволяющего системно решать широкий класс задач, связанных с планированием и управлением процессом возобновления популяции.

Накопленный авторами опыт моделирования сложных систем [1] позволил разработать схему формализации процесса воспроизводства популяции и разработать имитационные модели, позволяющие решить типовые задачи моделирования и обосновать выбор решения при управлении динамикой воспроизводства популяции.

Линейные модели воспроизводства популяции. Работа линейной модели воспроизводства популяции (IM_L) основана на формализации воспроизводства путём использования матрицы Лесли L [2], которая имеет вид:

$$L = \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & r_4 & \dots & r_{n-1} & r_n \\ d_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & d_2 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_3 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_4 & \dots & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & d_{n-1} & d_n \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где r_i – повозрастные коэффициенты рождаемости i -ых групп популяции (число родившихся особей на 1000 особей данной возрастной группы); d_i – повозрастные коэффициенты смертности i -ых групп популяции (число смертей на 1000 особей данной возрастной группы).

Имитационное моделирование реализуется последовательным итерационным процессом умножения матрицы Лесли на вектор структуры популяции, то есть:

$$P_{i+1} = L \cdot P_i, \quad (2)$$

где P_i – вектор, описывающий половозрастную структуру популяции на i -ом шаге моделирования, P_{i+1} – вектор, отражающий численный состав популяции прогнозируемого года. Таким образом, на очередном шаге моделирования формируется вектор, определяющий половозрастную структуру популяции через выбранный интервал времени. Расчеты могут производиться как для однолетних возрастных интервалов, так и для различных возрастных групп (5-летних или 10-летних). Техника расчетов сохраняется, но величина шага моделирования определяет требования, предъявляемые к входным параметрам моделирования.

Описанная модель IM_L позволяет получить данные об асимптотическом распределении численности исследуемой популяции и скорости её размножения (коэффициенте Фишера) [3]. Предполагается, что миграционные процессы отсутствуют, поскольку они искусственно влияют на рост популяции.

Формирование вектора асимптотического распределения численности популяции (P_s) достигается итерационным алгоритмом моделирования за достаточно большое число шагов при неизменных коэффициентах смертности и коэффициентах рождаемости матрицы Лесли. Критерием достаточности итераций является бесконечно малое изменение (в заданных пределах точности) ведущего собственного числа λ матрицы Лесли, которое вычисляется по формуле:

$$\lambda = \frac{\|P_{i+1}\|}{\|P_i\|} = \frac{\sum_{j=1}^n P_{j(i+1)}}{\sum_{j=1}^n P_{ji}} \quad (3)$$

Полученное таким образом собственное число матрицы Лесли λ определяет скорость размножения исследуемой популяции, когда ее возрастная структура стабилизировалась. Сформированный асимптотический вектор P_s является собственным вектором матрицы Лесли.

Таким образом, при смене множества поколений, в условиях неизменности коэффициентов матрицы Лесли, значения вектора возрастного состава исследуемой популяции стабилизируются. Для асимптотического моделирования справедлива формула:

$$\lambda \cdot P_s = L \cdot P_s. \quad (4)$$

С целью определения репродуктивной ценности групп особей женского пола была построена сопряжённая линейная имитационная модель IM_LR. В этом случае, моделирование также реализуется по формуле (2), но для сопряжённой (транспонированной) матрицы Лесли LR следующего вида:

$$LR = \begin{pmatrix} r_1 & d_{f1} & 0 & \dots & 0 \\ r_2 & 0 & d_{f2} & \dots & 0 \\ r_3 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & d_{f(n-1)} \\ r_n & 0 & 0 & \dots & d_{fn} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Сопряженная матрица LR имеет тот же характеристический полином и то же собственное число, что и матрица Лесли. Но поскольку матрица L не является симметричной, то элементы собственного вектора P_s сопряжённой матрицы LR изменяются и отражают репродуктивную ценность каждой возрастной группы исследуемой популяции.

С целью проведения моделирования воспроизводства популяции в целом была реализована имитационная модель (IM_LB), основанная на использовании блочной матрицы Лесли LB, которая имеет вид:

$$LB = \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & \dots & r_n & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ d_{f1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_{f2} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & d_{fn} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & d_{m1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & d_{m2} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & d_{mn} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где r_i – повозрастные коэффициенты рождаемости особей i -ых групп женского пола; d_{fi} , d_{mi} – повозрастные коэффициенты смертности особей i -ых групп, соответственно, женского и мужского пола исследуемой популяции.

Процесс моделирования реализуется по формуле (2), с учётом того, что вектор структуры популяции отражает число женских и мужских особей соответствующего возраста в общем составе популяции и имеет вид $P_i = (p_{f1i}, p_{f2i}, \dots, p_{fni}, p_{m1i}, p_{m2i}, \dots, p_{mni})$. При этом на каждом шаге моделирования корректируется вектор половозрастной структуры P_{i+1} с учётом вероятности появления потомка определённого пола.

Для модели IM_LB также была построена сопряжённая модель IM_LBR, позволяющая оценить репродуктивную ценность каждой возрастной группы исследуемой популяции. Очевидно, что «репродуктивная ценность» мужской части популяции при моделировании будет равной 0.

Поскольку матрицы описанных имитационных моделей включают только коэффициенты смертности и коэффициенты рождаемости для определённых возрастных групп, то они представляют собой интегральную характеристику динамики воспроизводства популяции в сложившихся условиях жизни с учетом воздействия факторов внешней среды. Их использование в процессе моделирования обеспечивает независимость показателей воспроизводства популяции от половозрастной структуры популяции и позволяет сравнить между собой условия репродуктивного развития различных популяций биологических объектов.

Описанные модели использовались для получения прогнозных показателей воспроизводства популяций на ближайшую перспективу. Как уже отмечалось, прогнозы, построенные при неизменных значениях коэффициентов рождаемости и смертности, соответствующих различным базовым годам, значительно отличаются. Поэтому при построении прогнозов с использованием описанных моделей на каждом шаге моделирования реализуется обновление коэффициентов матриц. Для моделирования использовались статистические данные доступных баз данных. Извлечение и структурирование данных были реализованы с использованием API, что позволило автоматизировать получение данных с удалённых серверов WHO (World Health Organization) и CDC (Center for Disease Control and Prevention) в форматах CSV, JSON или XML [4].

Билинейная модель воспроизводства населения. Недостатком линейных моделей воспроизводства популяции является отсутствие учёта возрастной структуры особей мужского пола при определении повозрастных коэффициентов рождаемости. С целью повышения точности получаемых показателей воспроизводства популяции была разработана билинейная модель (IM_BI), учитывающая структуру исследуемой популяции. Моделирование реализуется в соответствии с формулой (2), использующей модифицированную блочную матрицу Лесли LB_BI:

$$LB_BI = \begin{pmatrix} r'_1 & r'_2 & r'_3 & \dots & r'_n & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ d_{f1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_{f2} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & d_{fn} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ r'_{n+1} & r'_{n+2} & r'_{n+3} & \dots & r'_{2n} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & d_{m1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & d_{m2} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & d_{mn} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

В этой матрице учитывается динамически изменяющаяся половозрастная структура популяции, что отражается при вычислении элементов вектора модифицированных повозрастных коэффициентов рождаемости $R' = (r'_1, r'_2, r'_3, \dots, r'_{2n})$:

$$r'_j = \frac{1}{2 \sum_{i=1}^{2n} p_i} \cdot \sum_{i=1}^{2n} r_{ij} \cdot p_i, \quad (8)$$

где r_{ij} – элементы симметричной матрицы репродуктивности R размерности $2n \times 2n$, а p_i – элементы вектора $P = (p_1, p_2, \dots, p_n, p_{(n+1)}, p_{(n+2)}, \dots, p_{(2n)})$, определяющего половозрастную структуру популяции, включающую n возрастных женских групп особей (первые n элементов) и n возрастных мужских групп особей (остальные n элементов). Матрица R имеет вид:

$$R = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nn} \\ r_{11} & r_{21} & \dots & r_{n1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ r_{12} & r_{22} & \dots & r_{n2} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{1n} & r_{2n} & \dots & r_{nn} & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Её элементы задают количество потомков, рождённых особями из i -ых женских групп, отцами которых являются особи из мужских j -ых возрастных групп. Построчное суммирование элементов матрицы R определяет число потомков, рождённых каждой женской возрастной группой (первые n строк) и число потомков, отцами которых являются особи, предполагаемых мужских возрастных групп (остальные n строк), а именно:

$$r_i = \sum_{j=n+1}^{2n} r_{ij}, \text{ где } i = \overline{1, n}, \text{ а } r_i = \sum_{j=1}^n r_{ij}, \text{ где } i = \overline{n, 2n}. \quad (10)$$

Очевидно, что

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=n+1}^{2n} r_{ij} = \sum_{i=n}^{2n} \sum_{j=1}^n r_{ij} = N, \quad (11)$$

где N – общее число потомков, рождённых особями из i -ых женских групп, отцами которых являются особи из j -ых мужских групп.

Таким образом, число рождённых потомков на каждой итерации формируется с учётом структуры и численности мужской части популяции (при формировании коэффициентов $r_1, r_2, \dots, r_n$) и структуры женской части популяции (при формировании коэффициентов $r_{n+1}, r_{n+2}, \dots, r_{2n}$), что соответствует реальному процессу воспроизводства. В виду того, что на каждой итерации матрица репродуктивности дважды умножается вектор половозрастной структуры популяции, предложенная модель является билинейной.

Обоснованием математической достоверности получаемых результатов моделирования с использованием билинейной модели может служить аппарат вероятностно-алгебраического моделирования [1]. Вероятностно-алгебраическое моделирование позволяет вычислить значения вероятностей вектора состояний исследуемой системы, на основе вероятностей векторов состояний элементов системы с использованием структурных коэффициентов алгебры, определяющих взаимосвязи между этими элементами. В соответствии с указанным аппаратом вектор половозрастной структуры популяции на очередной итерации формируется с учётом структурного состава популяции предыдущей итерации:

$$P_{i+1} = P_i * P_i \text{ или } P_{i+1}^k = \sum_{j=1}^{2n} \sum_{i=1}^{2n} a_{ijk} p_i p_j, \quad (12)$$

где операция $*$ задаётся структурными коэффициентами алгебры $A^* a_{ijk}$.

Коэффициенты алгебры A^* являются неотрицательными числами и определяются с учётом элементов матрицы репродуктивности R и значений векторов половозрастных коэф-

фициентов смертности исследуемой популяции. Назовём такую алгебру репродуктивной, а билинейную модель воспроизводства популяции с использованием формулы (12) репродуктивной вероятностно-алгебраической моделью. В этом случае модифицированная блочная матрица Лесли $LB_BI = A \cdot P_i$ является представлением репродуктивной алгебры A^* .

Вероятностно-алгебраическое моделирование с использованием билинейной модели IM_BI позволяет проследить динамику изменения половозрастной структуры популяции и также уточнить численное значение скорости ее размножения с учётом изменяющейся структуры. Реализация вычислений для сопряженной матрицы LB_RBI позволяет оценить репродуктивную ценность как женской, так и мужской части популяции. А проведение моделирования для различных вариантов половозрастной структуры популяции позволяет выявить различия в её эволюционном развитии с учетом более точного представления процесса воспроизводства.

Заключение. Следует отметить, что описанные линейные модели являются частными случаями билинейной модели. Переход от билинейной модели IM_BI к линейным моделям IM_LB возможен в результате использования специального вида матриц R . Рассмотрение матрицы R с совпадающими элементами внутри первых n строк будет соответствовать случаю равновероятного распределения рождённых потомков по возрастным группам особей мужского пола, то есть независимости моделирования от возрастной структуры мужской части популяции. Использование матрицы R с совпадающими элементами остальных n строк будет соответствовать случаю равновероятного распределения рождённых потомков по возрастным группам особей женского пола. Наконец, возможно рассмотрение случая равновероятного рождения потомков, независимо от возрастных групп особей женского и мужского пола, при равенстве всех элементов матрицы R .

В ряде случаев оправдано одновременное использование различных моделей воспроизводства популяции с целью проверки правильности их работы и получения прогнозных показателей с учётом имеющихся исходных данных и задач исследования. Выбор модели определяется целями моделирования и условиями работоспособности модели, обеспечивающими адекватное описание реальных процессов. В обоих случаях учитываются особенности объекта моделирования и оцениваются возможности существующих моделей.

Условия адекватного описания процесса воспроизводства определяются, во-первых, выбором временного периода, за который анализируется динамика воспроизводства. Он должен быть достаточно продолжительным для того, чтобы выявить основные тенденции, которые на малом временном отрезке могут искажаться случайными годовыми колебаниями. Кроме того, необходимо учитывать периоды резких колебаний процесса воспроизводства, обусловленных изменениями в среде обитания, иначе, взяв за точку отсчета годы резких подъемов или спадов показателей, можно получить искаженное представление о тенденциях изменения основных показателей исследуемой популяции.

Литература

1. Сукач, Е. И. Вероятностно-алгебраическое моделирование сложных систем графовой структуры / Е. И. Сукач ; М-во образования РБ, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель, 2012. – 224 с.
2. Ризниченко, Г. Ю. Математические модели биологических продукционных процессов / Г. Ю. Ризниченко, А. Б. Рубин. – М. : Изд. МГУ, 1988. – 135 с.
3. Fisher, R. A. The genetical theory of natural selection / R. A. Fisher – Dover : Sec. edition, 1958. – 310 p.
4. Сукач, Е. И. Об опыте получения, хранения и анализа Big Data с удаленных сайтов / Е. И. Сукач, В. Ю. Бурикин, А. А. Кончиц // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2022. – № 3 (132). – С. 93–96.

¹Институт леса НАН Беларуси

²Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

УДК 512.542

О пересечении A -допустимых не p -нильпотентных θ -подгрупп

Р.В. Бородич, М.В. Селькин

В работе рассматривается строение подгруппы, равной пересечению ядер не p -нильпотентных максимальных A -допустимых θ -подгрупп группы G . Установлены определённые свойства соответствующей обобщенной подгруппы Фраттини.

Ключевые слова: конечная группа, p -нильпотентная подгруппа, подгрупповой функтор, группа операторов.

The structure of a subgroup equal to the intersection of the kernels of non- p -nilpotent maximal A -admissible θ -subgroups of group G is studied. The defining properties of the generalized Frattini subgroup are established.

Keywords: finite group, p -nilpotent subgroup, subgroup functor, group of operators.

Все рассматриваемые в данной работе группы предполагаются конечными. Одно из классических направлений в исследовании конечных групп связано с задачей о свойствах пересечений заданных максимальных подгрупп и исследовании влияния этих свойств на подгрупповое и нормальное строение группы. Важную роль в теории конечных групп занимает подгруппа Фраттини, введенная впервые в работе [1]. Теорема Фраттини получила развитие во многих направлениях (см. монографии [2] и [3]). Одно из направлений теории пересечений связано с исследованием пересечений максимальных подгрупп, не принадлежащих заданному классу групп. Эта задача рассматривалась в работах М.В. Селькина [3], Л.И. Шидова [4], В.В. Шлыка [5], А. Гилотти и У. Тиберио [6], А.Н. Скибы [7] и многих других авторов. К данному направлению в операторном случае относится и настоящая работа, которая является продолжением исследований, отраженных в работах [8], [9].

С используемыми в работе определениями и обозначениями можно ознакомиться в работе [8].

Через $\Phi_{\theta}^p(G, A)$ обозначим подгруппу, равную пересечению ядер не p -нильпотентных абнормальных максимальных подгрупп группы G , некоторые свойства которой в безоператорном и безфункторном случае рассматривались в работе [5].

Для пересечения всех максимальных θ -подгрупп группы G будем использовать обозначение $\Phi_{\theta}(G, A)$ [8].

В случае отсутствия в группе G указанных подгрупп будем полагать, что соответствующие пересечения совпадают с самой группой G .

Лемма 1. Пусть группа G имеет группу операторов A , θ – абнормально полный подгрупповой функтор и $N \triangleleft G$, тогда $\Phi_{\theta}^p(G, A)N / N \subseteq \Phi_{\theta}^p(G / N, A)$.

Доказательство. Если M / N – A -допустимая θ -подгруппа из G / N , не принадлежащая формации p -нильпотентных групп, тогда M – максимальная A -допустимая θ -подгруппа группы G , не принадлежащая формации p -нильпотентных групп. Следовательно, $\Phi_{\theta}^p(G, A)N / N \subseteq \Phi_{\theta}^p(G / N, A)$. Лемма доказана.

Лемма 2. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, θ – абнормально полный подгрупповой функтор и $G = O_p(\Phi_{\theta}^p(G, A))M$, где M – p -нильпотентная максимальная A -допустимая θ -подгруппа. Тогда

- 1) $T = O_p(\Phi_\theta^p(G, A)) \cap M$ – нормальная A -допустимая подгруппа группы G ;
- 2) $\Phi_\theta^p(G/T, A) = \Phi_\theta^p(G, A)/T$;
- 3) если $B/O_{p'}(G) = \Phi_\theta^p(G/O_{p'}(G), A)$, то $B \supseteq \Phi_\theta^p(G, A)$.

Доказательство.

1) Очевидно $T \triangleleft M$ и $N_G(T) \supseteq M$. Так как M – максимальная A -допустимая θ -подгруппа группы G , то $N_G(T) = M$ или $N_G(T) = G$. Учитывая, что $N_{O_p(\Phi_\theta^p(G, A))}(T) \supset T$ получаем $N_G(T) = G$.

2) Согласно лемме 1 $\Phi_\theta^p(G, A)/T \subseteq \Phi_\theta^p(G/T)$. Докажем обратное включение. Покажем, что если A – не p -нильпотентная максимальная A -допустимая θ -подгруппа группы G , то A/T также не p -нильпотентная A -допустимая максимальная θ -подгруппа.

Подгрупповой функтор замкнут относительно гомоморфизмов. Предположим, что F/T является p -нильпотентной A -допустимой θ -подгруппой. Тогда существует p' -холлова A -допустимая подгруппа R в F такая, что $RT/T \triangleleft F/T$. Если H – p' -холлова A -допустимая подгруппа из M , то можно считать, что $R \subseteq H$. Так как $H \triangleleft M$, то H централизует T и R централизует T . Учитывая, что R характеристическая подгруппа в RT , $RT \triangleleft F$, следовательно $R \triangleleft F$ и F – p -нильпотентна. Противоречие.

3) Пусть $x \in \Phi_\theta^p(G, A)$, то x содержится в каждой не p -нильпотентной максимальной A -допустимой θ -подгруппе. Допустим x содержится в каждой максимальной A -допустимой θ -подгруппе K такой, что $K \supseteq O_{p'}(G)$ и $K/O_{p'}(G)$ не p -нильпотентна. Отсюда следует, что $xO_{p'}(G) \in \Phi_\theta^p(G/O_{p'}(G)) = B/O_{p'}(G)$ и $x \in B$.

Теорема 1. Если группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, θ – аб-нормально полный подгрупповой функтор и $\Phi_\theta(G, A) \subset \Phi_\theta^p(G, A)$, то выполняются следующие утверждения:

- 1) $G = \Phi_\theta^p(G, A)M$, где M – p -нильпотентная максимальная A -допустимая θ -подгруппа группы G ;
- 2) если G разрешима, то $G = QM$, где Q – нормальная A -допустимая q -подгруппа группы G , q – простое число и M – p -нильпотентная максимальная A -допустимая θ -подгруппа группы G .

Доказательство. Так как $\Phi_\theta(G, A) \subset \Phi_\theta^p(G, A)$, то найдётся p -нильпотентная максимальная A -допустимая θ -подгруппа M такая, что $\Phi_\theta^p(G, A) \not\subseteq M$. Следовательно, $G = M\Phi_\theta^p(G, A)$.

Докажем второе утверждение. Пусть G – разрешимая группа. Рассмотрим $G/\Phi_\theta(G, A)$. Так как $\Phi_\theta^p(G, A)/\Phi_\theta(G, A)$ разрешима, то в $\Phi_\theta^p(G, A)/\Phi_\theta(G, A)$ найдётся неединичная характеристическая q -подгруппа $Q/\Phi_\theta(G, A)$ для некоторого простого $q \in \pi(\Phi_\theta^p(G, A)/\Phi_\theta(G, A))$. Если предположить, что $Q/\Phi_\theta(G, A)$ содержится во всех p -нильпотентных максимальных A -допустимых θ -подгруппах, то $Q/\Phi_\theta(G, A) \subseteq \Phi_\theta(G)/\Phi_\theta(G, A)$. Получили противоречие. Значит, найдётся p -нильпотентная максимальная A -допустимая θ -подгруппа $M/\Phi_\theta(G, A)$ такая, что $M/\Phi_\theta(G, A) \cdot Q/\Phi_\theta(G, A) = G/\Phi_\theta(G, A)$. Отсюда получаем, что $G = MQ$. Если предположить, что M не принадлежит формации p -нильпотентных групп, то $M \supseteq Q$ и $G = M$, значит, M – p -нильпотентна. Далее $Q = Q_1\Phi_\theta(G, A)$, где Q_1 – силовская A -допустимая q -подгруппа в Q .

По лемме Фраттини $G = QN_G(Q_1) = Q_1\Phi_\theta(G, A)N_G(Q_1) = \Phi_\theta(G, A)N_G(Q_1)$. Предположим, что $N_G(Q_1) \neq G$, тогда $N_G(Q_1)$ содержится в некоторой максимальной A -допустимой θ -подгруппе

K группы G . Тогда $G = \Phi_\theta(G, A)K = K$. Получили противоречие. Следовательно, Q_1 – нормальная A -допустимая q -подгруппа группы G . Лемма доказана.

Теорема 2. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, θ – абнормально полный подгрупповой функтор и $O_{p'}(G) = 1$, $O_p(M) = 1$, $G = O_p(\Phi_\theta^p(G, A))M$, где $O_p(\Phi_\theta^p(G, A)) \cap M = 1$ и M – p -нильпотентная абнормальная максимальная подгруппа. Тогда $\Phi_\theta^p(G, A)$ имеет нормальную силовскую p -подгруппу или G является бипримарной группой.

Доказательство. Пусть P – A -допустимая силовская p -подгруппа подгруппы $\Phi_\theta^p(G, A)$. По лемме Х.I.5 из [10] $O_{p'}(N_G(P)) \subseteq O_{p'}(G) = 1$. По лемме Фраттини $G = \Phi_\theta^p(G, A)N_G(P)$. Учитывая, что $O_p(\Phi_\theta^p(G, A)) \subseteq \Phi_\theta^p(G, A)$ и $G/O_p(\Phi_\theta^p(G, A))$ p -нильпотентна имеем, что $N_G(P) = G$ или $N_G(P)$ – A -допустимая p -нильпотентная подгруппа. Пусть $N_G(P)$ – A -допустимая p -нильпотентная подгруппа. Так как $O_{p'}(N_G(P)) = 1$, то $N_G(P)$ – p -подгруппа группы G . Пусть S – A -допустимая силовская p -подгруппа группы G такая, что $P = \Phi_\theta^p(G, A) \cap S \triangleleft S$. Тогда $N_G(P) = S$ и $G = \Phi_\theta^p(G, A)S$. Отсюда следует, что A -допустимая p' -холлова подгруппа H из M также является A -допустимой p' -холловой подгруппой группы G , подгруппы $\Phi_\theta^p(G, A)$, а значит $\Phi_\theta^p(G, A) = HP$. Докажем, что S является максимальной A -допустимой подгруппой группы G . Допустим, что $R \supset S$, где R – максимальная A -допустимая подгруппа группы G . Если предположить, что R не p -нильпотентна, то из $R \supseteq \Phi_\theta^p(G, A)S = G$ получаем противоречие. Итак, R является p -нильпотентной A -допустимой подгруппой, $R = R_{p'}S$, где $R_{p'}$ – нормальная A -допустимая холловская p' -подгруппа из R . Получаем, $R_{p'} \subseteq \Phi_\theta^p(G, A)$ и $O_p(\Phi_\theta^p(G, A))$ централизует $R_{p'}$. Так как G является p -скованной группой, то $C_G(O_p(\Phi_\theta^p(G, A))) \subseteq O_p(\Phi_\theta^p(G, A))$ и $R_{p'} = 1$. Отсюда $R = S$. По лемме 9.9 из [11] получаем, что G является бипримарной группой.

Теорема 3. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, θ – абнормально полный подгрупповой функтор и $\Phi_\theta^p(G, A)$ не является p -нильпотентной группой для некоторого нечётного $p \in \pi(G)$, тогда $G = O_p(\Phi_\theta^p(G, A))M$, где M – абнормальная p -нильпотентная максимальная подгруппа.

Доказательство. Из работы [8] следует, что G является p -разрешимой группой. Пусть $D = \Phi_\theta^p(G, A)$. Так как D не p -нильпотентна, то на основании работы [12] существует характеристическая подгруппа P^* в силовской p -подгруппе P группы D такая, что $N_D(P)/C_D(P)$ не является p -группой. Можно считать, что P^* – максимальная подгруппа с указанными выше свойствами.

Учитывая, что $N_G(P^*)$ – абнормальная подгруппа в G , то $N_G(P^*) = G$. Отсюда следует, что $P^* \subseteq O_p(D)$. Предположим, что $P^* \subset O_p(D)$, тогда $N_D(O_p(D))/C_D(O_p(D))$ – p -группа, а значит, $D/C_D(O_p(D))$ – p -группа. Из $C_D(O_p(D)) \subseteq O_p(D)$ получаем, что $D/O_p(G, A)$ – p -группа, значит D – p -группа, противоречие. Следовательно, $P^* = O_p(D)$.

Если $D/O_p(D)$ – p -нильпотентна, то в $D/O_p(D)$ имеется нормальная холловская p' -подгруппа $K/O_p(D)$. Тогда K нормальна в G и $O_p(D)$ нормальна в K . По теореме Шура-Цассенхауза существует холловская p' -подгруппа A из K такая, что $K = O_p(D)A$. По лемме Фраттини $G = KN_G(A)$.

Если $O_p(D) \subseteq \Phi(G)$, то $G = KN_G(A) = O_p(D)AN_G(A) = N_G(A)$. Следовательно, A нормальна в G . Но A – холловская p' -подгруппа из D , значит D – p -нильпотентна, противоречие.

речие. Следовательно, $O_p(D) \not\subseteq \Phi(G, A)$ и получаем $G = O_p(D)M$, где M – p -нильпотентная максимальная A -допустимая θ -подгруппа группы G . Теорема доказана.

Напомним [13], что если G – p -разрешимая группа, то арифметическим p -рангом $\bar{r}_p(G)$ называют наибольший из всех порядков p -главных факторов группы G . Класс p -разрешимых групп со свойством $(|G|, \bar{r}_p(G)) = 1$ является насыщенной формацией.

Теорема 4. Пусть G – p -разрешимая группа для которой $(|G|, \bar{r}_p(G)) = 1$, θ – абнормально полный подгрупповой функтор и группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$. Тогда подгруппа $\Phi_\theta^p(G, A)$ либо является p -нильпотентной, либо имеет нормальную силловскую p -подгруппу.

Доказательство. Предположим, что G – группа минимального порядка для которой подгруппа $\Phi_\theta^p(G, A)$ не является p -нильпотентной. По теореме 3 $G = O_p(\Phi_\theta^p(G, A))M$, где M – абнормальная p -нильпотентная максимальная A -допустимая подгруппа.

По лемме 2, если $T = O_p(\Phi_\theta^p(G, A)) \cap M$, то $\Phi_\theta^p(G/T) = \Phi_\theta^p(G, A)/T$. Если $\Phi_\theta^p(G, A)/T$, то используя доказательство леммы 2 получаем, что $\Phi_\theta^p(G, A)$ – p -нильпотентная подгруппа группы G . Противоречие. Следовательно, $\Phi_\theta^p(G, A)/T$ не p -нильпотентна. Учитывая, что $\Phi_\theta^p(G/T) = \Phi_\theta^p(G, A)/T$ и $(|G|, \bar{r}_p(G)) = 1$ предположим, что $|G/T| < |G|$. Следовательно, $\Phi_\theta^p(G/T)$ имеет A -допустимую силловскую p -подгруппу P/T нормальную в G/T . Отсюда $P \triangleleft G$. Не ограничивая общности можно считать, что $T = 1$. Так как $T = O_p(\Phi_\theta^p(G, A)) \cap M = 1$ и M – максимальная A -допустимая подгруппа группы G , $O_p(\Phi_\theta^p(G, A))$ – минимальная нормальная подгруппа группы G , являющаяся элементарной абелевой подгруппой.

Докажем, что $O_{p'}(G) = 1$. Предположим, что $O_{p'}(G) \neq 1$. Если $\Phi_\theta^p(G/O_{p'}(G)) = B/O_{p'}(G)$ – p -нильпотентна, то B – p -нильпотентна и по лемме 2 $\Phi_\theta^p(G, A)$ также p -нильпотентна, что противоречит предположению. Значит $B/O_{p'}(G)$ не является p -нильпотентной и из минимальности группы G A -допустимая силловская p -подгруппа из $B/O_{p'}(G)$ является нормальной. В частности $\Phi_\theta^p(G, A)O_{p'}(G)/O_{p'}(G)$ имеет A -допустимую силловскую p -подгруппу $PO_{p'}(G)/O_{p'}(G)$ нормальную в $G/O_{p'}(G)$. Отсюда $PO_{p'}(G) \triangleleft G$. По лемме Фраттини $G = O_{p'}(G)N_G(P)$. Если $N_G(P) = G$, то получаем противоречие с выбором группы G . Значит $N_G(P) \neq G$. Но так как $G = \Phi_\theta^p(G, A)N_G(P)$ получаем, что $N_G(P)$ – p -нильпотентна, а значит $G/O_{p'}(G)$ также p -нильпотентна. Получаем, что G является p -нильпотентной. Противоречие. Остается заключить, что $O_{p'}(G) = 1$.

Так как $G = O_p(\Phi_\theta^p(G, A))M$, $O_p(\Phi_\theta^p(G, A)) \subseteq O_p(G)$ и $O_p(G) = O_p(\Phi_\theta^p(G, A))(O_p(G) \cap M)$.

Пусть $D = O_p(G) \cap M$. Если $N_G(D) = M$, то M нормализует p -группу и по лемме X.I.6. из [10] получаем, что $O_{p'}(M) \subseteq O_{p'}(G)$ получили противоречие так как M является p -нильпотентной подгруппой и $O_{p'}(G) = 1$. Следовательно, $N_G(D) = G$, а значит $D \triangleleft G$.

Рассмотрим группу G/D . По аналогии с рассмотренным выше приемом не сложно показать, что $\Phi_\theta^p(G/D)$ не может быть p -нильпотентной и в силу минимальности группы G , если $D \neq 1$, получаем, что $\Phi_\theta^p(G/D)$ имеет нормальную A -допустимую силловскую p -подгруппу. Если $C/G = \Phi_\theta^p(G/D)$, то $\Phi_\theta^p(G, A)D/D \subseteq C/D$ и C/D имеет нормальную A -допустимую силловскую p -подгруппу. Отсюда следует, что $D = 1$. Так как

$O_p(\Phi_\theta^p(G, A)) = O_p(G)$ и по условию $(|G|, \bar{r}_p(G)) = 1$, то учитывая, что если $O_p(G) = p^s$, получаем $(|G|, s) = 1$. Также $(|M|, s) = 1$. На основании леммы I.IV 8.1 из [13] заключаем, что M является циклической подгруппой группы G . Противоречие.

Следствие 4.1. Пусть G – p -сверхразрешимая группа с группой операторов A такой, что $(|G|, |A|) = 1$ и θ – абнормально полный подгрупповой функтор, тогда подгруппа $\Phi_\theta^p(G, A)$ либо является p -нильпотентной, либо имеет нормальную силловскую p -подгруппу.

Условие теоремы $(|G|, \bar{r}_p(G)) = 1$ является существенным. Существуют примеры показывающие, что в p -разрешимой группе подгруппа $\Phi_\theta^p(G, A)$ может быть не p -нильпотентной и не иметь нормальной силловской p -подгруппы [14].

Литература

1. Frattini, G. Intorno alla generazione dei gruppi di operazioni / G. Frattini // Atti Acad. Dei Lincei. – 1885. – Vol. 1. – P. 281–285.
2. Шеметков, Л. А. Формации конечных групп / Л. А. Шеметков. – М. : Наука, 1978. – 267 с.
3. Селькин, М. В. Максимальные подгруппы в теории классов конечных групп / М. В. Селькин. – Минск : Беларуская навука, 1997. – 144 с.
4. Шидов, Л. И. О максимальных подгруппах конечных групп / Л. И. Шидов // Сиб. матем. ж. – 1971. – Т. 12, № 3. – С. 682–683.
5. Шлык, В. В. О пересечении максимальных подгрупп в конечных группах / В. В. Шлык // Матем. заметки. – 1973. – Т. 14, № 3. – С. 429–439.
6. Gilotti, A. On the intersection of maximal non-supersoluble subgroups in a finite group / A. Gilotti, U. Tiberio // Bollettino U.M.I. – 2000. – V. 8, № 3-B. – P. 691–698.
7. Скиба, А. Н. Алгебра формаций / А. Н. Скиба. – Минск : Беларуская навука, 1997. – 240 с.
8. Borodich, R. V. A generalized Frattini subgroup / R. V. Borodich // Asian-European Journal of Mathematics. – 2019. – № 14 (02). – DOI: 10.1142 / S1793557121500261.
9. Бородич, Р. В. О пересечении максимальных подгрупп конечных групп / Р. В. Бородич // Укр. мат. журн. – 2019. – Т. 71, № 11. – С. 1455–1465.
10. Huppert, B. Finite Groups II / B. Huppert, N. Blackburn. – Berlin–Heidelberg–New York : Springer, 1982. – 534 p.
11. Huppert B. Finite Groups III / B. Huppert, N. Blackburn. – Berlin–Heidelberg–New York : Springer Science & Business Media, 1982. – 456 p.
12. Thompson, J. G. Normal p -complements for finite groups / J. G. Thompson // J. Algebra. – 1964. – № 1. – P. 43–46.
13. Huppert, B. Endliche Gruppen I. / B. Huppert. – Berlin–Heidelberg–New York : Springer-Verlag, 1967. – 796 p.
14. Gilotti A. On the intersection of a certain class of maximal subgroups of a finite group / A. Gilotti, U. Tiberio // Arch. Math. – 1998. – V. 71. – P. 89–94.

Математическое моделирование подбора рецептуры состава гидрофобного профилактического

С.П. ЖОГАЛЬ¹, А.М. КУКСО¹, Д.И. БОЧКАРЕВ², А.А. ПОДДУБНЫЙ², В.В. ПЕТРУСЕВИЧ²

В статье представлено исследование влияния содержания компонентов состава гидрофобного профилактического ПРОТЕКТ-01 ТУ БУ 192670194.002-2019 на водонасыщение асфальтобетонной смеси с использованием метода математического моделирования. Математическое моделирование осуществлялось посредством полнофакторного эксперимента, который в данной работе был реализован в следующей последовательности: определение переменных факторов; выбор интервалов варьирования переменных; получение уравнений зависимостей оцениваемых показателей от влияющих на них переменных факторов; проверка адекватности модели и статистический анализ ее точности.

Ключевые слова: состав гидрофобный профилактический, физико-механические свойства, водонасыщение асфальтобетонной смеси, математическое моделирование.

The article presents a study of the influence of the content of the components composition of hydrophobic preventive PROTECT-01 TU BY 192670194.002-2019 on the water saturation of the asphalt concrete mixture using the method of mathematical modeling. Mathematical modeling was carried out through a full factor experiment, which in this work was implemented in the following sequence: determination of variable factors; choice of intervals of variation of variables; obtaining equations of dependencies of the estimated indicators on the variable factors influencing them; verification of model adequacy and statistical analysis of its accuracy.

Keywords: hydrophobic preventive composition, physical and mechanical properties, water saturation of the asphalt mix, mathematical modeling.

Введение. Для реализации защиты асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог в Республике Беларусь от разрушающего воздействия погодно-климатических факторов необходима разработка и внедрение новых технологий, одним из вариантов которых является обработка покрытий составом гидрофобным профилактическим ПРОТЕКТ-01 ТУ БУ 192670194.002-2019 (далее – состав) [1]. Данный состав обеспечивает защитные свойства, заключающиеся в создании в трещинах и порах асфальтобетона защитного слоя, препятствующего проникновению в его объем воды в осенний, зимний и весенний периоды эксплуатации (атмосферных осадков, талого снега и льда) и возможных переходов температуры окружающей среды через 0°C [1], [2]. Указанные выше защитные свойства способствуют снижению водонасыщения и повышению коэффициента морозостойкости асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог [3], [4].

Для достижения указанных выше защитных свойств состава необходимо провести значительный объем экспериментов и подготовительной работы по оптимизации его рецептуры. Применение методов математического моделирования по определению минимально достаточного объема проводимых экспериментов может повысить точность подбора рецептуры и сократить время, необходимое для этого процесса.

Цель работы – установление закономерностей влияния количества связующего и растворителя в составе, а также его нормы расхода на водонасыщение обработанных составом кернов из асфальтобетонной смеси типа Б [5].

Основная часть. Экспериментальные исследования и обработка полученных результатов выполнялись с использованием методик, изложенных в источниках [6]–[10].

Для установления закономерностей влияния количества связующего и растворителя в составе, а также его нормы расхода на водонасыщение обработанных составом кернов из асфальтобетонной смеси типа Б был выбран полнофакторный эксперимент, где число факторов $k = 3$, число опытов $N = 8$, число повторных опытов $n = 3$.

Для разработки математической модели выбраны следующие переменные факторы:

- количество связующего – C ;
- количество растворителя – P ;
- норма расхода – HP .

Значения уровней и интервалов варьирования факторов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Интервалы варьирования факторов

Фактор			Уровни варьирования факторов			Интервал варьирования
Наименование	Обозначение		нижний «-1»	средний «0»	верхний «+1»	
	натуральное	кодовое				
Связующее (С), кг	X_1	x_1	0,55	0,60	0,65	0,05
Растворитель (Р), кг	X_2	x_2	0,19	0,16	0,13	0,03
Норма расхода (НР), кг/м ²	X_3	x_3	0,3	0,4	0,5	0,1

Матрица, которая была реализована в ходе проведения эксперимента, представлена в таблице 2 [6]–[10].

Таблица 2 – План проведения эксперимента и результаты

№ опыта	Матрица			Натуральные значения переменных			Выходная величина
	x_1	x_2	x_3	С	Р	НР	у, %
1	1	1	1	0,65	0,13	0,5	1,10
2	-1	1	1	0,55	0,13	0,5	1,43
3	1	-1	1	0,65	0,19	0,5	1,25
4	-1	-1	1	0,55	0,19	0,5	1,60
5	1	1	-1	0,65	0,13	0,3	1,20
6	-1	1	-1	0,55	0,13	0,3	1,55
7	1	-1	-1	0,65	0,19	0,3	1,33
8	-1	-1	-1	0,55	0,19	0,3	1,70

Среднее арифметическое значение оптимизируемого параметра

$$y_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad (1)$$

где y_i – значение параметра оптимизации в i -том опыте; n – количество опытов.

Расчет дисперсии по каждой серии дублированных опытов проводим по формуле:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{cp} - y_i)^2}{n - 1}. \quad (2)$$

Результаты восьми серий дублированных опытов приведены в таблице 3 [6]–[10].

Таблица 3 – Результаты опытов

№ опыта	Значения факторов			Результаты эксперимента, мм			Выходная величина	
	С	Р	НР	y_1	y_2	y_3	y_{cp} , %	S_y^2
1	0,65	0,13	0,5	1,07	1,15	1,09	1,10	0,0018
2	0,55	0,13	0,5	1,41	1,47	1,40	1,43	0,0015
3	0,65	0,19	0,5	1,25	1,31	1,20	1,25	0,003
4	0,55	0,19	0,5	1,61	1,65	1,55	1,60	0,0031
5	0,65	0,13	0,3	1,16	1,22	1,23	1,20	0,0015
6	0,55	0,13	0,3	1,56	1,61	1,49	1,55	0,0037
7	0,65	0,19	0,3	1,31	1,28	1,39	1,33	0,0033
8	0,55	0,19	0,3	1,74	1,71	1,66	1,70	0,0017

Была проведена проверка однородности дисперсии опытов. В данном эксперименте имеется равномерное дублирование, поэтому используем критерий Кохрена $G_{расч.}$:

$$G_{расч} = \frac{S_6^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}. \quad (3)$$

Максимальной из дисперсий является дисперсия шестого опыта $S_6^2 = 0,0037$. Из расчетов получаем, что $G_{\text{расч}} = 0,189$. Из таблиц распределения Кохрена для уровня значимости $q = 0,05$; при числе степеней свободы для каждой выборки $f = n-1 = 2$ и количестве проведенных опытов $N = 8$ находим $G_{\text{табл}} = 0,5157$ [6, с. 283].

Полученное соотношение $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$ позволяет принять гипотезу об однородности дисперсий опытов.

Оценку дисперсии воспроизводимости эксперимента S_v^2 определяем как среднее арифметическое дисперсий опытов

$$S_v^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N} = 0,002.. \quad (4)$$

Уравнение для описания свойств состава представлено формулой (5) с коэффициентами, зависящими от числа влияющих факторов:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3, \quad (5)$$

где y – значение оптимизируемого параметра (водонасыщение W_e , %); $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{12}, b_{13}, b_{23}$ – коэффициенты, рассчитываемые по результатам опытов; x_1, x_2, x_3 – значения факторов, представленные в кодированном виде (+1, 0, -1).

Коэффициенты для данного плана рассчитываем по формулам:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}, \quad (6)$$

где y_i – значение параметра оптимизации в i -м опыте; N – число проведенных опытов,

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} y_u}{N}, \quad (7)$$

где x_{iu} – кодированное значение фактора x_i в u -м опыте,

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u}{N}; \quad i \neq j, \quad (8)$$

где x_{ju} – кодированное значение фактора x_j в u -м опыте.

План второго порядка трехфакторный в кодированных и измеренных единицах представлен в таблице 4 [6]–[10].

Таблица 4 – План второго порядка трехфакторный в кодированных и измеренных единицах

$N_{\text{опыта}}$	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	X_1	X_2	X_3	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1 X_2 X_3$	$y, \%$
1	1	1	1	1	1	1	1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,10
2	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1,43	1,43	1,43	-1,43	-1,43	1,43	-1,43	1,43
3	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1,25	-1,25	1,25	-1,25	1,25	-1,25	-1,25	1,25
4	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1,60	-1,60	1,60	1,60	-1,60	-1,60	1,60	1,60
5	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1,20	1,20	-1,20	1,20	-1,20	-1,20	-1,20	1,20
6	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1,55	1,55	-1,55	-1,55	1,55	-1,55	1,55	1,55
7	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1,33	-1,33	-1,33	-1,33	-1,33	1,33	1,33	1,33
8	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1,70	-1,70	-1,70	1,70	1,70	1,70	-1,70	1,70

При вычислении коэффициентов уравнения получаем:

$$b_0 = 1,4; b_1 = -0,175; b_2 = -0,075; b_3 = -0,05; b_{12} = 0,005; b_{13} = 0,005; b_{23} = -0,005; b_{123} = 0.$$

Уравнение регрессии в нормализованных обозначениях имеет вид:

$$y = 1,4 - 0,175x_1 - 0,075x_2 - 0,05x_3 + 0,005x_1x_2 + 0,005x_1x_3 - 0,005x_2x_3. \quad (9)$$

Статистический анализ полученного уравнения регрессии.

С учетом значения дисперсии воспроизводимости $S_e^2 = 0,002$ с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$ находим границы доверительных интервалов для коэффициентов регрессии:

$$\Delta b_i = \pm \frac{t \cdot S(y)}{\sqrt{N}}, \quad (10)$$

где t – критерий Стьюдента, его значение для трех повторных опытов и доверительной вероятности 0,95 равно 3,182 [6]–[10].

Определим границы доверительных интервалов для коэффициентов регрессии:

$$\Delta b_i = \pm \frac{3,182 \cdot 0,044}{\sqrt{8}} = \pm 0,049.$$

Сравнивая значения коэффициентов регрессии с границами доверительных интервалов, видно, что коэффициенты b_{12} , b_{13} , b_{23} , b_{123} незначимы. Но, так как b_3 – линейный коэффициент и его величина близка к Δb_i , то его из модели не исключаем. Теперь уравнение математической модели имеет вид:

$$y = 1,4 - 0,175x_1 - 0,075x_2 - 0,05x_3. \quad (11)$$

Для графической интерпретации полученных результатов один из факторов принимаем фиксированным. Затем строим график зависимости водонасыщения от количества связующего и растворителя, используя программный продукт *Autodesk Inventor* (рисунок 1). Для этого, в соответствии с таблицей 1, норму расхода принимаем равной $0,4 \text{ кг/м}^2$ и в кодированных переменных $x_3 = 0$. Данное значение подставляем в уравнение (11) и получаем уравнение:

$$y = 1,4 - 0,175x_1 - 0,075x_2. \quad (12)$$

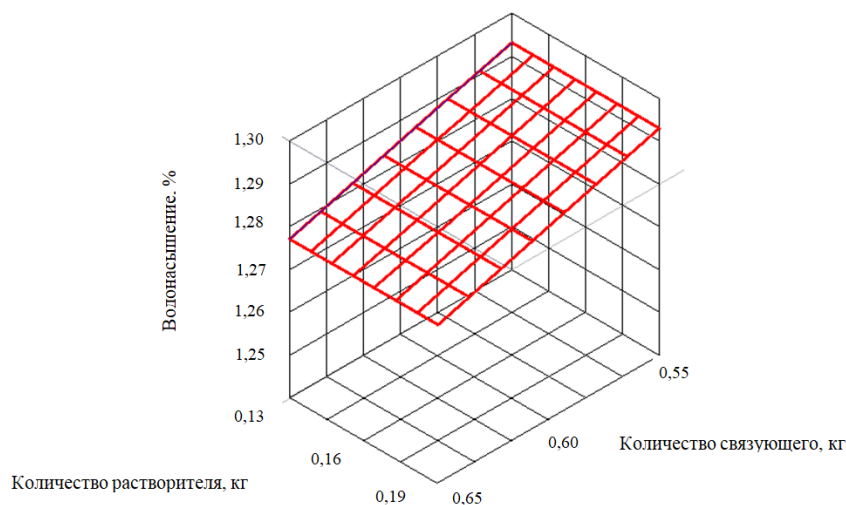


Рисунок 1 – Влияние количества связующего и растворителя на водонасыщение (норму расхода принимаем равной $0,4 \text{ кг/м}^2$)

При уменьшении количества связующего и количества растворителя водонасыщение увеличивается (рисунок 1). При этом более значительное влияние на изменение оказывает количество связующего. В количественном выражении значение водонасыщения находится в пределах 1,27–1,295 %.

Аналогично строим график зависимости водонасыщения от количества связующего и растворителя (рисунок 2). Для этого, в соответствии с таблицей 1, количество растворителя принимаем равным $0,16 \text{ кг}$ и в кодированных переменных $x_2 = 0$. Данное значение подставляем в уравнение (11) и получаем уравнение:

$$y = 1,4 - 0,175x_1 - 0,05x_3 \quad (13)$$

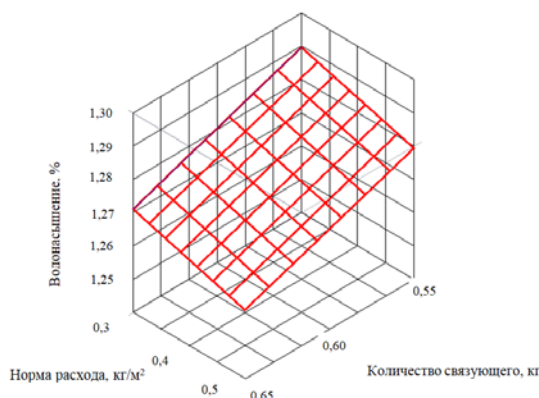


Рисунок 2 – Влияние количества связующего и нормы расхода на водонасыщение асфальтобетонной смеси (количество растворителя принимаем равным 0,16 кг)

При уменьшении количества связующего и нормы расхода водонасыщение увеличивается (рисунок 1), при этом данные факторы оказывают одинаковое влияние. На рисунке 2 видно, что при изменении количества связующего и нормы расхода водонасыщение изменяется в пределах 1,26–1,29 %.

Вывод. Выбранные параметры воздействуют на величину водонасыщения асфальтобетона, при этом более значительное влияние оказывают количество связующего и норма расхода состава. На основании представленных данных можно сделать вывод, что при уменьшении количества связующего и нормы расхода возможно снижение физико-механических свойств асфальтобетонной смеси обрабатываемых покрытий автомобильных дорог.

Также стоит отметить адекватность полученной математической модели зависимости влияния количества связующего и растворителя в составе, а также его нормы расхода на водонасыщение обработанных исследуемым составом кернов из асфальтобетонной смеси типа Б ввиду близости результатов полученных расчетов экспериментальным данным.

Литература

1. Состав гидрофобный профилактический ПРОТЕКТ-01: Технические условия ТУ ВУ 192670194.002-2019. – Введ. 03.10.2019. – Гомель : БелГУТ, 2019. – 29 с.
2. Гидрофобный состав для профилактической обработки асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог : заявка № а 20180114 Респ. Беларусь, МПК7 C08L95/00, C09D195/00, C09K3/18, E01H0/00 / Д. И. Бочкарев, В. В. Петрусевич ; заявитель Д. И. Бочкарев, В. В. Петрусевич ; заявл. 23.03.18 ; опубл. 30.10.19 // Афіцыйны бюл. – 2019. – № 5. – С. 20.
3. Бочкарев, Д. И. Исследование влияния профилактической обработки на эксплуатационные и физико-механические свойства материалов автодорожных покрытий / Д. И. Бочкарев, В. В. Петрусевич // Горная механика и машиностроение. – 2018. – № 2. – С. 82–88.
4. Петрусевич, В. В. Подбор оптимального состава профилактической обработки и анализ его влияния на физико-механические свойства материалов асфальтобетонных покрытий / В. В. Петрусевич // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 2. – С. 73–77.
5. Автомобильные дороги. Методы испытаний : СТБ 1566-2005. – Введ. 01.09.11. – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2011. – 19 с.
6. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента : учеб. пособ. / Н. А. Спириин, В. В. Лавров, Л. А. Зайнуллин [и др.] ; под общ. ред. Н. А. Спирина. – Екатеринбург, 2015. – 290 с.
7. Сидняев, Н. И. Введение в теорию планирования эксперимента : учеб. пособ. для студентов взов / Н. И. Сидняев, Н. Т. Вилисова. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 463 с.
8. Основы научных исследований. Математическое моделирование технических процессов : учеб.-метод. пособ. для студентов спец-ей 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка», 1-36 01 02 «Материаловедение в машиностроении» : в 2 ч. / Г. Ф. Протасевич [и др.]. – Минск, 2009. – Ч. 1. – 92 с.
9. Жогаль, С. П. Основы регрессионного анализа и планирования эксперимента: учеб. пособие / С. П. Жогаль, С. И. Жогаль, И. В. Максимей. – Гомель : ГГУ, 1997. – 94 с.
10. Соловьев, В. П. Организация эксперимента : учеб. пособ. / В. П. Соловьев, Е. М. Богатов. – Старый Оскол : ТНТ, 2012. – 255 с.

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²Белорусский государственный университет транспорта

Неулучшаемость теоремы Дирихле в диофантовых приближениях в поле комплексных чисел

О.Н. КЕМЕШ¹, И.М. МОРОЗОВА¹, Ж.И. ПАНТЕЛЕЕВА²

Теорема Дирихле о приближении действительных чисел рациональными обобщена на поля комплексных и p -адических чисел. Однако в обобщениях не установлены точные постоянные как в теореме Гурвица. В статье предложен метод оценок постоянных сверху, основанный на метрической теории диофантовых приближений зависимых величин. Установлено распределение алгебраических комплексных сопряженных чисел второй и третьей степени.

Ключевые слова: диофантовы приближения, многочлен с целыми коэффициентами, алгебраические числа, теорема Дирихле, теорема Гурвица.

Dirichlet's theorem on approximation of real numbers by rational numbers has been generalized to fields of complex and p -adic numbers. However, unlike Hurwitz's theorem, these generalizations do not provide the exact constants in the approximations. In this paper, we propose a method for estimating these constants from above based on metric theory of Diophantine approximation of dependent variables. We also specify the distribution of algebraic conjugate complex numbers of the second and third degree.

Keywords: Diophantine approximation, integral polynomial, algebraic numbers, Dirichlet's theorem, Hurwitz's theorem.

Введение. Почти два века назад Дирихле [1] доказал следующую теорему о приближении действительных чисел рациональными числами.

Теорема Дирихле. Для любого действительного числа $x \in I \subset [0;1)$ и натурального числа $Q > 1$ найдутся натуральное число $1 \leq q \leq Q$ и целое число p такие, что выполняются неравенства

$$\left| x - \frac{p}{q} \right| \leq \frac{1}{qQ} \text{ или } |qx - p| \leq \frac{1}{Q}. \quad (1)$$

Из первого неравенства в (1) следует неравенство $\left| x - \frac{p}{q} \right| \leq \frac{1}{q^2}$. Доказываются все три неравенства легко, и поэтому возникает предположение, что их можно без труда улучшить.

Далее $c_1 = c_1(n)$, $c_2, \dots$ – величины, зависящие от n и не зависящие от Q . Точный ответ о неравенстве

$$\left| x - \frac{p}{q} \right| < c_1 q^{-2} \quad (2)$$

дал Гурвиц [2]. Он доказал, что при $c_1 < \sqrt{5}$ неравенство (2) имеет бесконечное число решений (p, q) , $p \in \mathbb{Z}$, $q \in \mathbb{N}$ для любого $x \in I$. Если же $\varepsilon > 0$, $c_2 = \sqrt{5} + \varepsilon$, то существуют числа x_1 такие, что при любом достаточно большом $q > q_0(\varepsilon)$ выполняется неравенство

$$\left| x_1 - \frac{p}{q} \right| > c_2^{-1} q^{-2}. \quad (3)$$

В частности можно взять $x_1 = \frac{\sqrt{5}-1}{2} \approx 0,61\dots$

Получение неравенств вида (3) для специальных действительных чисел представляет собой одну из самых сложных и красивых задач теории чисел. Ее решение при алгебраических числах принесло Роту [3], [4] в 1958 г. и А. Бейкеру [5] в 1970 г. премии Филдса.

Основная часть. В данной работе мы покажем, что второе неравенство в (1) также практически неулучшаемо как в поле действительных, так и в поле комплексных чисел. Для

получения таких результатов привлечем методы метрической теории диофантовых приближений, первые результаты в которой были получены А. Хинчиным [6]. Далее $\mu_1(A)$ – мера Лебега измеримого множества $A \subset I$.

Теорема 1. Пусть $x \in I$, функция $\Psi(x)$ монотонно убывает. Обозначим через $\mathcal{L}_1(\Psi)$ множество действительных чисел x из интервала I , для которых неравенство

$$|qx - p| < \Psi(q) \quad (4)$$

имеет бесконечное число решений в рациональных числах $\frac{p}{q}$. Тогда

$$\mu_1 \mathcal{L}_1(\Psi) = \begin{cases} 0, & \text{если } \sum_{q=1}^{\infty} \Psi(q) < \infty, \\ \mu_1 I, & \text{если } \sum_{q=1}^{\infty} \Psi(q) = \infty. \end{cases}$$

К настоящему времени разрешимости значительно более сложных чем (4) диофантовых неравенств посвящены монографии [7]–[10].

В неравенстве (4) рассматривается разрешимость в точке x в многочленах первой степени. В конце прошлого века аналогичная задача была решена для многочленов произвольной степени.

Рассмотрим многочлен $P_n(x) = a_n x^n + \dots + a_1 x + a_0$ с целыми коэффициентами степени $\deg P_n(x) = n$ и высоты $H = H(P) = \max_{0 \leq j \leq n} |a_j|$.

Обозначим через $\mathcal{L}_n(\Psi)$ множество действительных $x \in I$, для которых неравенство

$$|P_n(x)| < H^{-n+1} \Psi(H) \quad (5)$$

имеет бесконечное число решений в полиномах $P_n(x)$ степени $\deg P_n(x) \leq n$ и высоты H .

Теорема 2. Справедливы два утверждения:

$$\mu_1 \mathcal{L}_n(\Psi) = \begin{cases} 0, & \text{если } \sum_{q=1}^{\infty} \Psi(H) < \infty, \\ \mu_1 I, & \text{если } \sum_{q=1}^{\infty} \Psi(H) = \infty. \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_1 \mathcal{L}_n(\Psi) = \begin{cases} 0, & \text{если } \sum_{q=1}^{\infty} \Psi(H) < \infty, \\ \mu_1 I, & \text{если } \sum_{q=1}^{\infty} \Psi(H) = \infty. \end{cases} \quad (7)$$

Утверждение (6) в теореме было доказана В.И. Берником [11], а утверждение (7) – В. Бересневичем [12], [13].

Вскоре теорема 2 была обобщена с многочленов на невырожденные кривые и поверхности в работах В. Бересневича, В.И. Берника, Д. Клейнбока и Г. Маргулиса [14]–[16].

При $\Psi(H) = H^{-w}$, $w > n$, в [5], [17] была найдена размерность Хаусдорфа множества $\mathcal{L}_n(\Psi)$, которая оказалась равна $\frac{n+1}{w+1}$.

Несколько изменим задачу (1). Докажем, что существуют $x \in I$, для которых выполняется неравенство

$$\left| x - \frac{p}{q} \right| > c_3 q^{-1} Q^{-1}$$

при некотором c_3 . Из теоремы Дирихле следует, что $c_3 < 1$. Методами метрической теории диофантовых приближений докажем следующую теорему.

Теорема 3. Для любого Q обозначим через $\mathcal{L}_1(c_4, Q)$ множество $x \in [0; 1)$, для которых верно неравенство

$$|qx - p| < c_4 Q^{-1}.$$

Тогда при $c_4 < \frac{1}{2}$ справедливо неравенство

$$\mu_1 \mathcal{L}_1(c_4, Q) < 1. \quad (8)$$

Неравенство (7) показывает, что существуют $x \in [0; 1) \setminus \mathcal{L}_1(c_4, Q)$, для которых верно неравенство

$$|qx - p| > c_4 Q^{-1}.$$

Доказательство теоремы. Неравенство $|qx - p| < c_4 Q^{-1}$ выполняется для всех x из интервалов

$$I_q = \left\{ \frac{p}{q} - c_4 Q^{-1}, \frac{p}{q} + c_4 Q^{-1} \right\} \cap [0; 1), \quad 1 \leq q \leq Q, \quad 0 \leq p \leq q.$$

Если $p \neq 0$, то

$$\mu I_q = 2c_4 Q^{-1}.$$

При $p = 0$

$$\mu I_q = c_4 Q^{-1}.$$

Определим множество

$$B_1 = \bigcup_{q=1}^Q \bigcup_{p=0}^q I_q.$$

Нетрудно видеть, что

$$\mu B_1 \leq 2c_4 \sum_{q=1}^Q Q^{-1} = 2c_4. \quad (9)$$

Из неравенства (9) очевидно, что при $c_4 < \frac{1}{2}$ имеем $\mu B_1 < 1$.

Комплексный случай. Определим множество комплексных чисел

$$B_2 = \left\{ |z| \leq 1 \cap \operatorname{Im} z \geq \frac{1}{2} \right\},$$

мера которого равна $\mu_1 B_2 = \frac{\pi}{3} - \frac{\sqrt{3}}{4} \approx 0,614185$.

Нам потребуются следующие леммы.

Лемма 1 [7]. Пусть γ_1 – ближайший к z корень полинома $P(z)$. Тогда

$$|z - \gamma_1| \leq 2^{n-1} |P(z)| |P'(\gamma_1)|^{-1}. \quad (10)$$

Лемма 2. Для того, чтобы все корни $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ полинома $P(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0$ удовлетворяли оценке сверху по модулю

$$|\alpha_j| < d(n), \quad 1 \leq j \leq n, \quad (11)$$

необходимо и достаточно выполнения неравенства

$$|a_n| > d_1(n) \cdot H. \quad (12)$$

Достаточность леммы доказана в [7] (лемма 1, глава 1, часть I).

Необходимость. Возьмем a_j такое, что $|a_j| = H = (-1)^j \sum_{(i_1, \dots, i_j)} (\alpha_{i_1} \cdot \dots \cdot \alpha_{i_j})$. Обозначим

$$\left| \sum_{(i_1, \dots, i_j)} (\alpha_{i_1} \cdot \dots \cdot \alpha_{i_j}) \right| \leq \delta(n). \text{ Ясно, что тогда } |a_n| > \delta(n) H.$$

Нетрудно понять, что при $|\alpha_i| \leq 1,01$ и $n = 2$ имеем $\delta(2) = 2,02$, а при $n = 3$ – $\delta(3) = 3,0603$.

Теорема 4. Для любого Q обозначим через $\mathcal{L}_2(c_5, Q)$ множество $z \in B_2$, для которых верно неравенство

$$|P_2(z)| < c_5 Q^{-\frac{1}{2}}, \quad H(P) \leq Q. \quad (13)$$

Тогда при $c_5 < \sqrt{\frac{1}{60} - \frac{\sqrt{3}}{80\pi}} \approx 0,09887$ справедливо неравенство

$$\mu_1 \mathcal{L}_2(c_5, Q) < \frac{\pi}{3} - \frac{\sqrt{3}}{4}. \quad (14)$$

Это означает, что существует точка $z_1 \in B_2$, в которой верно неравенство, противоположное (13).

Доказательство теоремы 4.

Воспользуемся неравенством (10):

$$|z - \gamma_1| < 2|P(z)| |P'(\gamma_1)|^{-1} < 2c_5 Q^{-\frac{1}{2}} a_2^{-1} |\gamma_2 - \gamma_1|^{-1} < 2c_5 Q^{-\frac{1}{2}} |a_2|^{-1}.$$

Точки z лежат в круге K с центром γ_1 радиуса $r(K) = 2c_5 Q^{-\frac{1}{2}} |a_2|^{-1}$ площадью $S(K) = 4\pi c_5^2 Q^{-1} a_2^{-2}$.

Просуммируем эту площадь по всем тройкам (a_2, a_1, a_0) . Поскольку изменение знака всех коэффициентов многочлена на противоположный не влияет на корни, то можно считать коэффициент a_2 положительным, а из леммы 2 следует $|a_2| \geq \frac{H}{\delta(2)}$. Таким образом, имеем

$$\frac{H}{\delta(2)} \leq a_2 \leq H, \quad -Q \leq a_1, a_0 \leq Q, \quad \text{то есть общее количество интересующих нас троек } \#\{a_2, a_1, a_0\}$$

оценивается сверху как $Q \left(1 - \frac{1}{\delta(2)}\right) (2Q+1)^2$.

Можно считать, что корни многочлена удовлетворяют условию $|a_j| < 1,01$ и можно использовать лемму 2.

$$\text{Так как } \frac{Q}{\delta(2)} \leq |a_2| \leq Q, \text{ то } \#\{a_2\} = Q \left(1 - \frac{1}{\delta(2)}\right).$$

Тогда

$$\begin{aligned} \sum_{(a_0, a_1, a_2)} \mu_1 K_1 &= \sum_{(a_0, a_1, a_2)} 4\pi c_5^2 Q^{-1} a_2^{-2} \leq 4\pi c_5^2 Q^{-1} \cdot (2Q+1)^2 \cdot \sum_{\frac{Q}{\delta(2)} \leq a_2 \leq Q} a_2^{-2} \leq \\ &\leq 4\pi c_5^2 Q^{-1} \cdot 5Q^2 \cdot \left(Q \left(1 - \frac{1}{\delta(2)}\right) \right)^{-2} \cdot Q \left(1 - \frac{1}{\delta(2)}\right) < c_5^2 \frac{20\pi\delta(2)}{\delta(2)-1}. \end{aligned}$$

$$\text{Очевидно, неравенство (14) выполняется при } c_5 < \sqrt{\frac{\delta(2)-1}{60\delta(2)} - \frac{(\delta(2)-1)\sqrt{3}}{80\pi\delta(2)}} \approx 0,07026.$$

Теорема 5. Для любого Q обозначим через $\mathcal{L}_3(c_6, Q)$ множество $z \in B_2$, для которых верно неравенство

$$|P_3(z)| < c_6 Q^{-1}, \quad H(P) \leq Q. \quad (15)$$

Тогда при $c_6 < \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 2^9} - \frac{\sqrt{3}}{2^{11}\pi}} \approx 0,01954$ справедливо неравенство

$$\mu_1 \mathcal{L}_3(c_6, Q) < \frac{\pi}{3} - \frac{\sqrt{3}}{4}. \quad (16)$$

Доказательство теоремы 5.

Многочлен третьей степени имеет три корня $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$, один из которых будет действительным. Без ограничения общности положим, что γ_3 – действительный корень.

Воспользуемся неравенством (10):

$$|z - \gamma_1| < 4|P(z)||P'(\gamma_1)|^{-1}. \quad (17)$$

Оценим значение производной

$$|P'(\gamma_1)| = a_3|\gamma_1 - \gamma_2||\gamma_1 - \gamma_3| > \frac{a_3}{2},$$

т. к. $|\gamma_1 - \gamma_2| > 1$ и $|\gamma_1 - \gamma_3| > \frac{1}{2}$.

Тогда из неравенства (17) следует

$$|z - \gamma_1| < 4|P(z)||P'(\gamma_1)|^{-1} < 8c_6Q^{-\frac{1}{2}}|a_3|^{-1}.$$

Рассмотрим круги K_1 и K_2 с центрами в комплексных корнях двух многочленов $P(x)$, удовлетворяющих условию (15). Пусть радиусы этих кругов равны $r(K_i) = 2^3c_6Q^{-1}|a_3|^{-1}$, соответственно их площади равны $S(K_i) = 2^6\pi c_6^2Q^{-2}a_3^{-2}$, $i = 1, 2$.

Для оценки меры исследуемого множества можно просуммировать площадь кругов K_2 по всем четверкам коэффициентов (a_3, a_2, a_1, a_0) .

Считаем коэффициент a_3 положительным, а из леммы 2 следует $|a_3| \geq \frac{H}{\delta(3)}$. Таким образом, имеем $\frac{H}{\delta(3)} \leq a_3 \leq H$, $-Q \leq a_2, a_1, a_0 \leq Q$, поэтому $\#\{a_3\} = Q\left(1 - \frac{1}{\delta(2)}\right)$, и общее количество интересующих нас четверок $\#\{a_3, a_2, a_1, a_0\}$ оценивается сверху как $Q\left(1 - \frac{1}{\delta(3)}\right)(2Q+1)^3$.

Учитывая, что корни многочлена удовлетворяют условию $|a_j| < 1,01$, используем лемму 2.

Тогда

$$\begin{aligned} \sum_{(a_0, a_1, a_2, a_3)} \mu_1 K_2 &= \sum_{(a_0, a_1, a_2)} 2^6\pi c_6^2Q^{-2}a_3^{-2} \leq 2^6\pi c_6^2Q^{-2} \cdot (2Q+1)^3 \cdot \sum_{\frac{Q}{\delta(3)} \leq a_3 \leq Q} a_3^{-2} \leq \\ &\leq 2^6\pi c_6^2Q^{-2} \cdot 9Q^3 \cdot \left(Q\left(1 - \frac{1}{\delta(3)}\right)\right)^{-2} \cdot Q\left(1 - \frac{1}{\delta(3)}\right) < c_6^2 \frac{24^2\pi\delta(3)}{\delta(3)-1}. \end{aligned}$$

Таким образом, (16) доказано для $c_6 < \sqrt{\frac{\delta(3)-1}{12^3\delta(3)} - \frac{\sqrt{3}(\delta(3)-1)}{48^2\pi \cdot \delta(3)}} \approx 0,01512$.

Заключение. Результаты статьи могут быть обобщены на специальные многочлены действительной и комплексной переменной, а также для многочленов p -адической переменной.

Литература

1. Dirichlet, L. G. P. Verallgemeinerung eines Satzes aus der Lehre von den Kettenbrüchen nebst einigen Anwendungen auf die Theorie der Zahlen / L. G. P. Dirichlet // Werke I. – 1842. – P. 633–638.
2. Hurwitz, A. Über die angenäherte Darstellung der Irrationalzahlen durch rationale Brüche / A. Hurwitz // Mathematische Annalen. – 1891. – Vol. 39, № 2. – P. 279–284.
3. Касселс, Дж. В. С. Введение в теорию диофантовых приближений / Дж. В. С. Касселс. – М. : Изд-во Иностран. литер., 1961. – 213 с.
4. Шмидт, В. Диофантовы приближения / В. Шмидт. – М. : Мир, 1983. – 228 с.

5. Baker, A. Diophantine approximation and Hausdorff dimension / A. Baker, W. M. Schmidt // *Proc. London Math. Soc.* – 1970. – № 21. – P. 1–11.
6. Khintchine, A. Einige Sätze über Kettenbrüche, mit Anwendungen auf die Theorie der Diophantischen Approximationen / A. Khintchine // *Mathematische Annalen.* – 1924. – Vol. 92. – P. 115–125.
7. Спринджук, В. Г. Проблема Малера в метрической теории чисел / В. Г. Спринджук. – Минск : Наука и техника, 1967. – 181 с.
8. Спринджук, В. Г. Метрическая теория диофантовых приближений / В. Г. Спринджук. – М. : Наука, 1977. – 143 с.
9. Bernik, V. I. Metric Diophantine Approximation on Manifolds / V. I. Bernik, M. M. Dodson. – Cambridge : Cambridge University Press, 1999. – Vol. 137. – P. 172.
10. Bugeaud, Y. Approximation by Algebraic Numbers (Cambridge Tracts in Mathematics) / Y. Bugeaud. – Cambridge : Cambridge University Press, 2004. – Vol. 160. – P. 174.
11. Bernik, V. I. The exact order of approximating zero by values of integral polynomials / V. I. Bernik // *Acta Arith.* – 1989. – Vol. 53, № 1. – P. 17–28.
12. Бересневич, В. В. Оптимальный порядок аппроксимации точек на гладких кривых в трехмерном евклидовом пространстве / В. В. Бересневич // *Доклады НАН Беларуси.* – 1999. – Т. 43, № 4. – С. 9–13.
13. Beresnevich, V. V. On approximation of real numbers by real algebraic numbers / V. V. Beresnevich // *Acta Arith.* – 1999. – Vol. 90, № 2. – P. 97–112.
14. Beresnevich, V. A Groshev type theorem for convergence on manifolds / V. Beresnevich // *Acta Mathematica Hungarica.* – 2002. – Vol. 94, № 1. – P. 99–130.
15. Beresnevich, V. V. Metric Diophantine approximation : The Khintchine-Groshev theorem for non-degenerate manifolds / V. V. Beresnevich // *Moscow Math. J.* – 2002. – Vol. 2. – P. 203–225.
16. Bernik, V. I. Khintchine-type theorems on manifolds : the convergence case for standard and multiplicative versions / V. I. Bernik, D. Kleinbock, G. A. Margulis // *Internat. Math. Res. Notices.* – 2001. – Vol. 9. – P. 453–486.
17. Bernik, V. I. Application of the Hausdorff dimension in the theory of Diophantine approximations / V. I. Bernik // *Acta Arith.* – 1983. – Vol. 42, № 3. – P. 219–253.

¹Белорусский государственный
аграрно-технический университет

²Институт математики
НАН Беларуси

О конструктивном описании времени обслуживания и входящего потока

Ю.В. МАЛИНКОВСКИЙ

Статья посвящена определенным особенностям конструктивного (параметрического) подхода при описании промежутков времени между моментами поступления запросов и длительностей их обслуживания.

Ключевые слова: длительности обслуживания, промежутки времени между моментами поступления запросов, конструктивное описание, системы массового обслуживания, составной прибор.

The paper deals with some properties of constructive (parametric) approach for description of time intervals between arrival moments and service times.

Keywords: service times, time intervals between arrival moments, constructive description, queueing systems, composite server.

Конструктивное или параметрическое задание длительностей обслуживания и промежутков времени между моментами поступления запросов часто встречается в современных литературных источниках по теории массового обслуживания. Однако в подавляющей массе таких источников изложение материала ведется на нечетком жаргонном языке, что создает определенные сложности для исследования, особенно у начинающих специалистов. Целью настоящей статьи является достаточно понятное научно-методическое обоснование конструктивного описания и преодоление жаргонных штампов в изложении.

Рассмотрим, например, систему массового обслуживания $M / M / s$ с простейшим входящим потоком с интенсивностью λ и s экспоненциальными приборами с интенсивностью обслуживания μ для каждого из них. Представим работающие приборы как единое целое – один прибор, который назовем составным. Чтобы отличать его от имеющихся в системе s приборов, будем называть их простыми приборами.

Пусть $\xi(t)$ – число запросов в системе в момент времени t , v_i – виртуальное время обслуживания запроса составным прибором, т. е. v_i – время обслуживания запроса, начинающееся в момент t при условии, что в этот момент в системе имеются запросы, т. е. $\xi(t) \neq 0$. Если v – время обслуживания запроса составным прибором, то в силу сказанного

$$B(x) = P\{v < x\} = P\{v_i < x / \xi(t) \neq 0\} = F_{v_i}(x / \xi(t) \neq 0).$$

Предположим, что в момент t работает составной прибор, тогда в силу отсутствия «памяти» у показательного распределения не имеет значения, сколько времени работают имеющиеся простые приборы.

Пусть $v_i(1), v_i(2), \dots, v_i(s)$ – остаточные времена обслуживания запросов простыми приборами и пусть $x \geq 0$. Остаточное и виртуальное остаточные времена обслуживания составным прибором обозначим теми же буквами, что и полные времена обслуживания, но с тильдой.

Тогда

а) при $1 \leq n \leq s$

$$\begin{aligned} P\{\tilde{v} \geq x / \xi(t) = n\} &= P\{\tilde{v}_i \geq x / \xi(t) = n\} = P\{\min(v_i(i_1), \dots, v_i(i_n)) \geq x\} = \\ &= P\{v_i(i_1) \geq x, \dots, v_i(i_n) \geq x\} = e^{-\mu x} \dots e^{-\mu x} = e^{-n\mu x}, \end{aligned}$$

т. е. условное распределение остаточного времени обслуживания запроса составным прибором $\tilde{v}$ при условии, что $\xi(t) = n$, – показательное с параметром $\mu(n) = n\mu$;

б) при $n > s$

$$\begin{aligned} P\{\tilde{v} \geq x / \xi(t) = n\} &= P\{\tilde{v}_i \geq x / \xi(t) = n\} = P\{\tilde{v}_i \geq x / \xi(t) = n\} = \\ &= P\{\min(v_i(1), \dots, v_i(s)) \geq x\} = P\{v_i(1) \geq x, \dots, v_i(s) \geq x\} = \\ &= e^{-\mu x} \dots e^{-\mu x} = e^{-s\mu x}, \end{aligned}$$

т. е. условное распределение остаточного времени обслуживания запроса составным прибором – показательное с параметром $\mu(n) = s\mu$. Объединяя а) и б) и учитывая, что если остаточное время жизни имеет показательное распределение с некоторым параметром, то и полное время жизни имеет показательное распределение с тем же параметром, получаем, что для $x \geq 0$

$$B(x/n) = P\{v < x/\xi(t) = n\} = 1 - e^{-\mu(n)x},$$

где

$$\mu(n) = \begin{cases} n\mu, & \text{если } 1 \leq n \leq s \\ s\mu, & \text{если } n > s \end{cases}. \quad (1)$$

Здесь при $n = 0$ распределение случайной величины v_t не определено, так как обслуживание не может начинаться в момент, когда в системе нет заявок. Тем не менее, как будет видно из дальнейшего, удобно доопределить $\mu(n)$ в нуле, считая, что $\mu(0) = 0$.

Таким образом, условное распределение времени обслуживания запроса составным прибором – показательное с параметром $\mu(n)$, определяемым равенством (1).

Отметим, что конструктивное задание длительности обслуживания с помощью условного распределения времени обслуживания эквивалентно традиционному заданию, поскольку оба задания приводят к одному и тому же (в широком смысле) марковскому процессу. Это следует из того, что инфинитезимальные характеристики этих процессов одинаковы. Итак, конечномерные распределения процессов совпадают, а, следовательно, совпадают их стационарные распределения. Но при этом конструктивный подход удобнее, так как интенсивности переходов $n \rightarrow n-1$ (скачков вниз процесса $\xi(t)$) уже заданы с помощью (1), а при традиционном подходе их надо находить. К тому же при конструктивном подходе с помощью абстрактного задания $\mu(n)$ (не обязательно в виде (1)) можно описывать многие реальные и теоретически задаваемые системы массового обслуживания. При этом реальное распределение времени обслуживания, как правило, – не экспоненциальное.

Так, в рассмотренном примере, если выполнено условие эргодичности $\lambda < s\mu$, $\{p_n, n = 0, 1, \dots\}$ – стационарное распределение числа запросов в системе $M/M/s$, начальное распределение совпадает со стационарным, а $p_{>s} = \sum_{n=s+1}^{\infty} p_n$, то функция распределения времени обслуживания составным прибором v

$$\begin{aligned} B(x) &= P\{v < x\} = P\{v_t < x/\xi(t) \neq 0\} = \sum_{n=1}^{\infty} P\{v_t < x/\xi(t) = n\} P\{\xi(t) = n / \xi(t) \neq 0\} = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} [1 - e^{-\mu(n)x}] \frac{P\{\xi(t) = n\}}{P\{\xi(t) \neq 0\}} = \\ &= \sum_{n=1}^s \frac{p_n}{1 - p_0} [1 - e^{-n\mu x}] + \frac{p_{>s}}{1 - p_0} [1 - e^{-s\mu x}]. \end{aligned}$$

Это – взвешенная линейная комбинация $s+1$ показательных распределений, т. е. безусловное распределение времени обслуживания фиктивным прибором (а не условное) является гиперэкспоненциальным.

Абстрагируемся теперь от конкретного вида $\mu(n)$. Рассмотрим систему, которую будем обозначать $M/M(n)/1$, а время обслуживания задается параметрически. В однолинейную систему поступает простейший поток с интенсивностью λ . Условное распределение времени обслуживания при условии $\xi(t) = n$ ($n \neq 0$) является показательным с параметром $\mu(n)$, зависящим от числа заявок n в системе.

Лемма. Для того чтобы условное распределение времени обслуживания при условии $\xi(t) = n$ ($n \neq 0$) являлось показательным с параметром $\mu(n)$, необходимо и достаточно, чтобы при $\Delta t \downarrow 0$

$$P\{t \leq v < t + \Delta t / v \geq t, \xi(t) = n\} = \mu(n)\Delta t + o(\Delta t).$$

Доказательство. Необходимость. Пусть условное распределение v – показательное с параметром $\mu(n)$. Тогда

$$\begin{aligned} P\{t \leq v < t + \Delta t / v \geq t, \xi(t) = n\} &= \frac{P\{t \leq v < t + \Delta t / \xi(t) = n\}}{P\{v \geq t / \xi(t) = n\}} = \\ &= \frac{[1 - e^{-\mu(n)(t+\Delta t)}] - [1 - e^{-\mu(n)t}]}{1 - [1 - e^{-\mu(n)t}]} = 1 - e^{-\mu(n)\Delta t} = \mu(n)\Delta t + o(\Delta t). \end{aligned}$$

Достаточность. Пусть для $t \geq 0$ $P\{t \leq v < t + \Delta t / v \geq t, \xi(t) = n\} = \mu(n)\Delta t + o(\Delta t)$.

Если $B(t / n)$ – условная функция распределения времени обслуживания (при условии $\xi(t) = n$), то отсюда следует, что

$$\frac{B(t + \Delta t / n) - B(t / n)}{1 - B(t / n)} = \mu(n)\Delta t + o(\Delta t).$$

Разделив обе части на Δt и устремив Δt к нулю, получим

$$\frac{B'(t / n)}{1 - B(t / n)} = \mu(n),$$

откуда

$$1 - B(t / n) = Ce^{-\mu(n)t}.$$

Поскольку $B(0 / n) = 0$, то $C = 1$, откуда

$$B(t / n) = 1 - e^{-\mu(n)t} \quad \text{для } t \geq 0.$$

Это означает, что условное распределение v при условии $\xi(t) = n$ – показательное с параметром $\mu(n)$.

Смысл леммы состоит в том, что если в данный момент времени прибор занимается обслуживанием запроса, а в системе находится n запросов, то вероятность того, что в течение ближайших Δt единиц времени ее обслуживание завершится, равна $\mu(n)\Delta t + o(\Delta t)$. Поэтому вероятность того, что обслуживание этого запроса не завершится в течение ближайших Δt единиц времени, равна $b_0(\Delta t) = 1 - \mu(n)\Delta t + o(\Delta t)$. Отметим, что если $\xi(t) \geq 2$ в некоторый момент времени t , то вероятность того, что в промежутке времени $[t, t + \Delta t)$ будет обслужено не меньше двух запросов, есть $o(\Delta t)$ при $\Delta t \rightarrow 0$. Действительно, если в этом промежутке будет обслужено не меньше двух запросов, то найдется такое $c \in [t, t + \Delta t)$ в нем, что в каждом из промежутков $[t, t + c)$ и $[t + c, t + \Delta t)$ завершится обслуживание запроса, а по лемме вероятность этого события равна $[\mu(\xi(t))(c - t) + o(c - t)][\mu(\xi(c))(t + \Delta t - c) + o(t + \Delta t - c)] = o(\Delta t)$.

Составим уравнения Колмогорова для безусловных вероятностей состояний $P_n(t) = P\{\xi(t) = n\}$ процесса $\xi(t)$. По формуле полной вероятности при $\Delta t \rightarrow 0$

$$\begin{aligned} P_0(t + \Delta t) &= P\{\xi(t + \Delta t) = 0\} = \sum_{k=0}^{\infty} P\{\xi(t) = k\}P\{\xi(t + \Delta t) = 0 / \xi(t) = k\} = \\ &= P\{\xi(t) = 0\}P\{\xi(t + \Delta t) = 0 / \xi(t) = 0\} + P\{\xi(t) = 1\}P\{\xi(t + \Delta t) = 0 / \xi(t) = 1\} + \\ &= 0 / \xi(t) = 1\} + \sum_{k=2}^{\infty} P\{\xi(t) = k\}P\{\xi(t + \Delta t) = 0 / \xi(t) = k\}. \end{aligned}$$

Покажем, что последняя сумма есть $o(\Delta t)$. Действительно, эта сумма

$$\begin{aligned} \sum_{k=2}^{\infty} P\{\xi(t) = k, \xi(t + \Delta t) = 0\} &= P\{\xi(t) \geq 2, \xi(t + \Delta t) = 0\} = \\ &= P\{\xi(t) \geq 2\}P\{\xi(t + \Delta t) = 0 / \xi(t) \geq 2\} \leq P\{\xi(t + \Delta t) = 0 / \xi(t) \geq 2\} \leq o(\Delta t), \end{aligned}$$

так как последняя вероятность не превосходит вероятности того, что за время Δt будет обслужено не меньше двух запросов (при условии, что сначала в системе было по крайней мере 2 запроса).

С учетом смысла леммы получим

$$P_0(t + \Delta t) = P_0(t)(1 - \lambda\Delta t + o(\Delta t)) + P_1(t)(1 - \lambda\Delta t + o(\Delta t))(\mu(1)\Delta t + o(\Delta t)) + o(\Delta t),$$

откуда стандартным образом получаем

$$P_0'(t) = -\lambda P_0(t) + \mu(1)P_1(t).$$

Аналогично, для отличных от 0 состояний находим

$$P_n(t + \Delta t) = P_{n-1}(t)(\lambda\Delta t + o(\Delta t))(1 - \mu(n-1)\Delta t + o(\Delta t)) + P_n(t)(1 - \lambda\Delta t + o(\Delta t))(1 - \mu(n)\Delta t + o(\Delta t)) + P_{n+1}(t)(1 - \lambda\Delta t + o(\Delta t))(\mu(n+1)\Delta t + o(\Delta t)) + o(\Delta t),$$

откуда

$$P_n'(t) = -\lambda P_{n-1}(t) + (\lambda + \mu(n))P_n(t) + \mu(n+1)P_{n+1}(t), \quad n = 1, 2, \dots$$

Итак, $\xi(t)$ – процесс размножения и гибели с постоянной интенсивностью рождения λ и переменной интенсивностью гибели $\mu(n)$.

Допустим, что процесс $\xi(t)$ эргодический, тогда существует предельное распределение $\{p_n\}$, являющееся единственным стационарным распределением. Выберем его в качестве начального распределения, тогда распределение цепи $\xi(t)$ в произвольный момент времени $\{P_n(t), n = 0, 1, \dots\}$ совпадет с ним и не будет зависеть от времени. Поэтому производные по времени обратятся в 0, а последние уравнения превратятся в следующие уравнения равновесия:

$$\lambda p_0 = \mu(1)p_1,$$

$$(\lambda + \mu(n))p_n = \lambda p_{n-1} + \mu(n+1)p_{n+1}.$$

Для процесса размножения и гибели уравнения равновесия эквивалентны уравнениям равновесия для вертикальных сечений

$$\lambda p_{n-1} = \mu(n)p_n, \quad n = 1, 2, \dots,$$

откуда легко находится стационарное распределение

$$p_n = p_0 \prod_{k=1}^n \frac{\lambda}{\mu(k)}, \quad (2)$$

где из условия нормировки

$$p_0 = \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \prod_{k=1}^n \frac{\lambda}{\mu(k)}\right)^{-1}.$$

Заметим, что этим решением можно пользоваться не только для системы $M / M(n) / s$ с учетом (1), но и для всех других экспоненциальных систем с учетом конкретного вида $\mu(n)$. Из вида стационарного распределения заключаем, что для эргодичности необходимо, чтобы ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} \prod_{k=1}^n \frac{\lambda}{\mu(k)} \quad (3)$$

сходился. Это условие и достаточно для эргодичности по эргодической теореме Фостера. Действительно, из сходимости ряда (3) вытекает сходимость ряда

$$\sum_{n=1}^{\infty} (\lambda + \mu(n)) p_0 \prod_{k=1}^n \frac{\lambda}{\mu(k)}, \quad (4)$$

фигурирующего в эргодической теореме Фостера. На самом деле легко понять, используя признаки сравнения рядов с положительными членами, что ряды (3) и (4) сходятся или расходятся одновременно. Конечно, можно было необходимое и достаточное условие эргодичности получить из общего условия эргодичности для процессов размножения и гибели.

Отметим также, что аналогичным образом (конструктивно) можно задавать входящие потоки. Рассмотрим, например, систему $M(n) / M / 1$, т. е. однолинейную систему с экспоненциальным прибором, в которую поступает рекуррентный поток, в котором условное распределение промежутков времени между моментами поступления запросов (при фиксированном числе запросов n в моменты поступления запросов в систему) – показательное с параметром $\lambda(n)$, зависящим от числа запросов n в момент поступления. Если, например, имеется единственный пуассоновский источник запросов с интенсивностью поступления λ , который перекрывается, когда число запросов в системе больше N (велико), то

$$\lambda(n) = \begin{cases} \lambda, & \text{если } n \leq N \\ 0, & \text{если } n > N \end{cases}.$$

Это – так называемый ограниченный пуассоновский поток.

Заметим в заключение, что в литературе широкое распространение получили следующие жаргонные обороты:

а) время обслуживания запроса – показательное с параметром $\mu(n)$, зависящим от числа запросов n в системе (правильно говорить – условное распределение времени обслуживания запроса при фиксированном числе n запросов в системе – показательное с параметром $\mu(n)$);

б) в систему поступает пуассоновский поток с интенсивностью $\lambda(n)$, зависящей от числа n запросов в системе в моменты поступления запросов (правильно говорить – между моментами изменения состояний системы в систему поступает пуассоновский поток с интенсивностью, зависящей от состояния системы).

Применение этих жаргонных оборотов сокращает соответствующие фразы, но может привести к недоразумениям.

Литература

1. Гнеденко, Б. В. Введение в теорию массового обслуживания / Б. В. Гнеденко, И. Н. Коваленко. – М. : ЛКИ, 2013. – Изд. 6. – 400 с.

Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 11.10.2022

УДК 621.372.51

Согласование патч-антенны для геолокации

М.А. ЯНЦЕВИЧ

В работе представлены этапы проектирования антенны, используемой для решения задач геолокации. Ключевым вопросом при этом является расширение рабочей полосы частот антенны за счет согласования её сопротивления. Представлена методика синтеза микрополосковых согласующих отрезков, основанная на обобщенном методе Дарлингтона. Отличительной особенностью методики является представление сопротивления нагрузки в виде каскадно-соединенных отрезков одинаковой длины и применение частотного преобразования Ричардса к аппроксимирующим функциям с расширенным вариативным потенциалом. На основе результатов синтеза проведено моделирование и натурный эксперимент. Также рассмотрен вариант оптимизации параметров согласующего устройства. Представлен опытный образец антенны, удовлетворяющий заявленным требованиям.

Ключевые слова: патч-антенна, аппроксимация, моделирование, методика согласования.

The paper presents the stages of designing an antenna used to solve geolocation problems. The key issue in this case is the expansion of the working frequency band of the antenna by matching its resistance. The method of synthesis of microstrip matching segments based on the Generalized Darlington method is presented. A distinctive feature of the technique is the representation of load resistance in the form of cascaded-connected segments of the same length and the application of the Richards frequency transform to approximating functions with an extended variable potential. Based on the synthesis results, modeling and a full-scale experiment were carried out. The option of optimizing the parameters of the matching device is also considered. A prototype antenna that meets the stated requirements is presented.

Keywords: patch-antenna, approximation, modeling, matching technique.

Введение. Строительство аэродромов, дорог, зданий и других сооружений, прокладка трубопроводов, определение глубины водоёмов, поиск полезных ископаемых, как правило, не обходятся без решения задачи георазведки в частности с использованием беспилотных летательных аппаратов. Используемые для этих целей георадары должны удовлетворять определенным техническим требованиям, большинство которых зависят от антенной системы. Антенна для геолокации с использованием беспилотных летательных аппаратов должна быть низкопрофильной, работать в двух ортогональных плоскостях диаграммы направленности, обладать довольно широкой рабочей полосой частот и иметь минимально возможные габариты при обеспечении электрических характеристик, предъявляемых к ней.

К наиболее простому варианту антенны, удовлетворяющей перечисленные требования, можно отнести патч-антенну. Однако авторы существующих публикаций отмечают типичные значения полосы согласования 5...7 %, что не всегда оказывается достаточным. Ниже представлен возможный вариант расширения рабочей полосы частот за счёт согласования патч-антенны микрополосковыми отрезками.

Моделирование патч-антенны. На рисунке 1 представлена предлагаемая конструкция патч-антенны, рассчитанная на рабочую частоту 1,2 ГГц. Используемый материал – пластины фольгированного стеклотекстолита FR4 (диэлектрическая проницаемость материала – $\varepsilon = 4,4$).

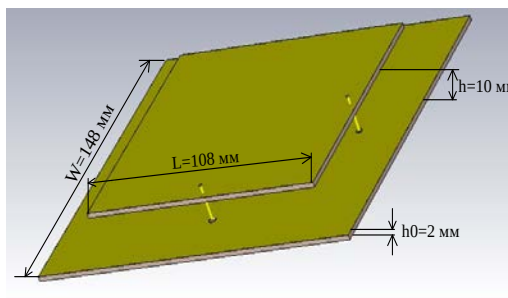


Рисунок 1 – Конструкция антенны (в среде CST STUDIO)

Две симметричные точки подключения и квадратный верхний лепесток обеспечивают два одинаковых канала для передачи и приёма сигналов с вертикальной и горизонтальной поляризацией. Основные параметры смоделированной антенны представлены на рисунке 2. Обращает на себя внимание смещение от резонансной частоты влево реальной и мнимой частей сопротивления (рисунке 2а). Это смещение может быть обусловлено выбором места подключения точки питания [1].

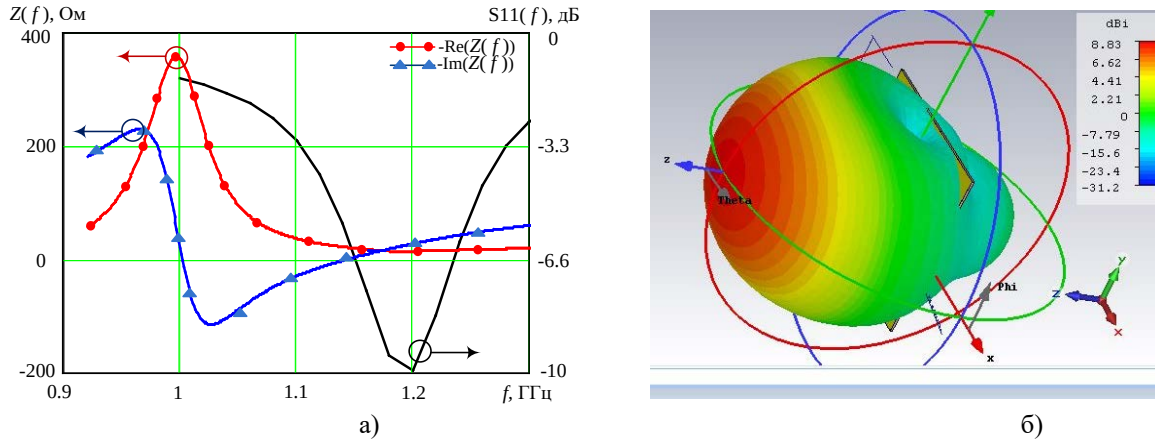


Рисунок 2 – а – частотные характеристики; б – диаграмма направленности на частоте 1,2 ГГц

Ширина полосы пропускания по уровню КСВ = 2 равна 27 МГц (2,2 %). Расширение рабочей полосы частот такой антенны чаще производится за счет выбора точки подключения [2]. Поэтому интерес представляет исследование, направленное на оценку возможностей согласования при использовании системного аналитического подхода, в основе которого лежит обобщенный метод синтеза по Дарлингтону [3].

Методика широкополосного согласования. Представленная в работах [4], [5] методика согласования на основе обобщенного метода Дарлингтона с использованием гибких аппроксимирующих функций позволяет производить синтез сосредоточенных согласующих элементов. Для решения задачи согласования в распределенном элементном базисе необходимо воспользоваться теорией синтеза фильтров на однородных микрополосковых линиях, в основе которого лежит частотное преобразование Ричардса [6], [7]. Особенность синтеза фильтров на однородных линиях состоит в том, что каждый отрезок линии (единичный элемент) имеет фиксированную длину, а их каскадное соединение обеспечивает нули передачи только на вещественной оси частот. Последние должны содержаться как в нагрузке (сопротивление антенны), так и в аппроксимирующей функции (АФ) передачи мощности согласующего устройства, подключенного к нагрузке.

Возможности аналитических методов существенно зависят от способа представления модели входного сопротивления согласуемой нагрузки. Для рассматриваемой антенны модель входного сопротивления можно аппроксимировать функцией (1), характеризующей 2 каскадно-соединённых отрезка с электрической длиной $\lambda/2$ и волновыми сопротивлениями 150 Ом, 56 Ом, нагруженных на активное сопротивление 30 Ом.

$$Z_n(f) = \frac{m_{1n} + n_{1n}}{m_{2n} + n_{2n}}, \quad (1)$$

где $m_{1n} = 252000 + 94080p^2$, $m_{2n} = 8400 + 22500p^2$, $n_{1n} = 1730400p$, $n_{2n} = 6180p$, $p = j \tan(2\pi f\tau)$ ($\tau = 0,4167$ – постоянная времени (время задержки) микрополосковой линии).

В (1) содержатся только нули передачи на вещественной оси частот, что видно из выражения – $N_n(-p^2) = m_{1n}m_{2n} - n_{1n}n_{2n} = 2116800000(p^2 - 1)^2$.

На рисунке 1 представлено сопоставление реальной и мнимой частей функции входного сопротивления модели патч-антенны полученной в среде CST и функции (1).

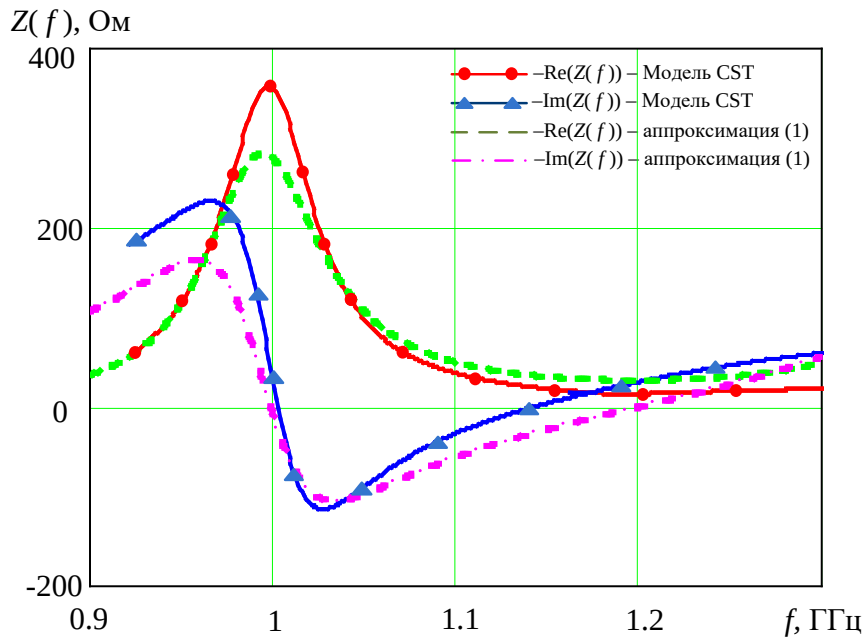


Рисунок 3 – Сопоставление сопротивлений модели CST и аппроксимацией (1)

В качестве АФ выбрана функция с расширенным вариативным потенциалом, представленная в [4], [5]. Параметрическое преимущество этой функции в сравнении с классическими аппроксимациями способствует как расширению диапазона согласуемых нагрузок, так и увеличению полосы согласования. Учитывая, что порядок выражения (1) равен 2, порядок АФ должен быть не менее 3, что означает наличие минимум одного согласующего элемента. АФ после частотного преобразования [7], обеспечивающего нули передачи единичных элементов $p = \pm 1$, принимает вид

$$K(-p^2) = \frac{K}{\varepsilon^2 \left[-\frac{v_1 p^2}{1-p^2} + \frac{v_2 p^4}{(1-p^2)^2} - \frac{v_3 p^6}{(1-p^2)^3} \right]}, \quad (2)$$

$$1 + \frac{-\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_3}{\varepsilon^2 \left[-\frac{v_1 p^2}{1-p^2} + \frac{v_2 p^4}{(1-p^2)^2} - \frac{v_3 p^6}{(1-p^2)^3} \right]},$$

где K – коэффициент уровня передачи мощности, ε – коэффициент регулировки полосы согласования; $v_{1,2,3}$ – варьируемые параметры, $\alpha_1 = \frac{v_1 p'^2}{1-p'^2}$, $\alpha_2 = \frac{v_2 p'^4}{(1-p'^2)^2}$, $\alpha_3 = \frac{v_3 p'^6}{(1-p'^2)^3}$,

$p' = j \tan(2\pi f_{н,в})$ ($f_{н,в}$ – нижняя или верхняя граничная частота (исходя из ширины полосы 15 % – $f_{н} = 1,11$, $f_{в} = 1,29$)).

Далее формируется система уравнений (3), связывающих параметры функции (2) с параметрами функции коэффициента отражения (4).

$$K_p(-p^2) = 1 - \rho(p)\rho(-p), \quad (3)$$

$$\rho(p) = \frac{b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}. \quad (4)$$

В результате система уравнений, сформированная согласно (3) совместно с условиями для полинома Гурвица, выглядит следующим образом:

$$\begin{cases}
(1-K)(\alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2 + \alpha_3 v_3) = b_0^2; \\
\alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2 + \alpha_3 v_3 = a_0^2; \\
\varepsilon^2 v_1 + 3(1-K)(-\alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2 - \alpha_3 v_3) = 2b_0 b_2 - b_1^2; \\
\varepsilon^2 v_1 + 3(-\alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2 - \alpha_3 v_3) = 2a_0 a_2 - a_1^2; \\
-\varepsilon^2 (v_2 + 2v_1) + 3(1-K)(\alpha_1 v_1 - \alpha_2 v_2 + \alpha_3 v_3) = b_2^2 + 2b_1 b_3; \\
-\varepsilon^2 (v_2 + 2v_1) + 3(\alpha_1 v_1 - \alpha_2 v_2 + \alpha_3 v_3) = a_2^2 + 2a_1 a_3; \\
\varepsilon^2 (v_1 + v_2 + v_3) + (1-K)(-\alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2 - \alpha_3 v_3) = -b_3^2; \\
\varepsilon^2 (v_1 + v_2 + v_3) + (-\alpha_1 v_1 + \alpha_2 v_2 - \alpha_3 v_3) = -a_3^2; \\
a_0 a_1 a_2 - a_0^2 a_3 \geq 0 \\
a_1 a_2 - a_0 a_3 \geq 0 \\
a_i \geq 0.
\end{cases} \quad (5)$$

Определив функцию входного сопротивления (6), выбирается необходимый вариант системы z-параметров [3].

$$Z_{\text{вх}}(s) = \frac{1 \pm \rho(s)}{1 \mp \rho(s)} = \frac{m_1 + n_1}{m_2 + n_2}, \quad (6)$$

где $m_1 = (a_0 - b_0) + (a_2 - b_2)p^2$, $m_2 = (a_0 + b_0) + (a_2 + b_2)p^2$, $n_1 = (a_1 - b_1)p + (a_3 - b_3)p^3$, $n_2 = (a_1 + b_1)p + (a_3 + b_3)p^3$.

Для рассматриваемой нагрузки потребуется система по варианту А, которая имеет вид [3]:

$$z_{11} = \frac{m_1 m_{2\text{н}} - n_1 n_{2\text{н}}}{n_2 m_{2\text{н}} - m_2 n_{2\text{н}}}, \quad z_{22} = \frac{m_2 m_{1\text{н}} - n_2 n_{1\text{н}}}{n_2 m_{2\text{н}} - m_2 n_{2\text{н}}}, \quad z_{12} = \frac{\left(N(-p^2)N_{\text{н}}(-p^2)\right)^{0.5}}{n_2 m_{2\text{н}} - m_2 n_{2\text{н}}}. \quad (7)$$

Так как в нагрузке (1) и АФ (2) содержатся только нули передачи $p = \pm 1$, то и в z-параметрах никаких других нулей быть не может. В соответствии с положениями обобщенного метода синтеза по Дарлингтону для каждого нуля передачи нагрузки (их кратность 2) все полиномы z-параметров обращаются в нуль. Поэтому с учетом кратности нуля передачи нагрузки система ограничений имеет следующий вид:

$$\begin{cases}
P(p)|_{p=1} = 0, \\
\frac{dP(p)}{dp}|_{p=1} = 0,
\end{cases} \quad (8)$$

где $P(p) = (a_1 + b_1 + (a_3 + b_3)p^2)(R^2 p^2 + R_1 R)p - R_2 p(R_1 + R)(a_0 + b_0 + (a_2 + b_2)p^2)$ – полином знаменателя z-параметров (7).

Совместное решение уравнений (5), (8) методом Левенберга-Маркварда даёт следующий результат $K = 0,938$, $\varepsilon = 0,14$, $v_1 = 140,637$, $v_2 = -3942$, $v_3 = 3803$.

Синтез согласующего устройства, так же как и для сосредоточенных элементов [4], [5] можно произвести по $Z_{\text{вых}}(s)$:

$$Z_{\text{вых}} = \frac{(m_2 + n_1)m_{1\text{н}} - (m_1 + n_2)n_{1\text{н}}}{(m_1 + n_2)m_{2\text{н}} - (m_2 + n_1)n_{2\text{н}}}.$$

Результатом синтеза по функции $Z_{\text{вых}}$, является волновое сопротивление согласующего отрезка $\rho_c = 18$ Ом. Геометрические размеры согласующего элемента с учётом высоты и диэлектрической проницаемости подложки соответственно равны $l = 64$ мм, $w = 15,9$ мм. Согласующая линия расположена на обратной стороне земляной пластины (рисунок 4а). На рисунке 4б представлено сопоставления результатов согласования, полученных теоретически, при моделировании и экспериментально.

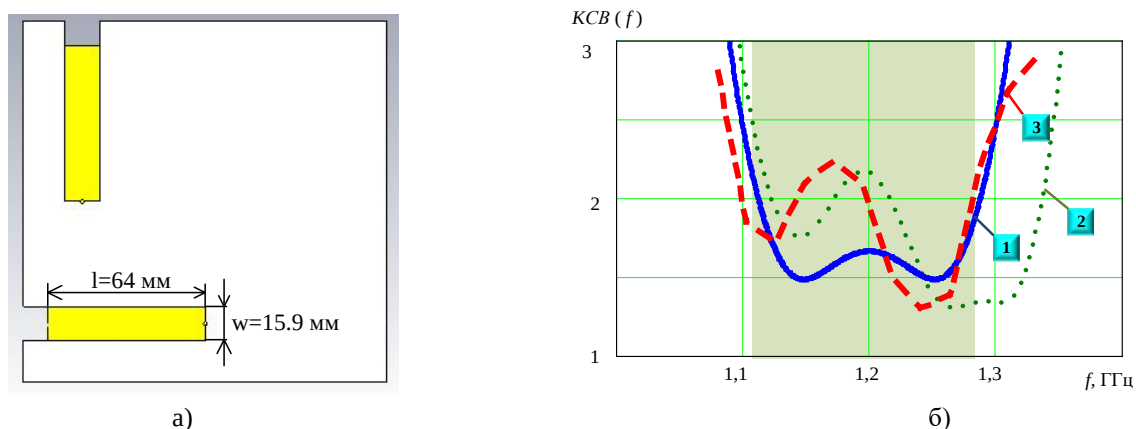


Рисунок 4 – а – расположение и размеры согласующего элемента; б – характеристика КСВ согласованной антенны: 1 – теоретический результат; 2 – промоделировано в среде CST; 3 – эксперимент

Увеличить полосу (при среднем значении КСВ = 2) удалось до 15 % всего одним согласующим элементом. Улучшить результат можно при помощи алгоритмов оптимизации заложенных в среде моделирования CST Studio, используя в качестве начальных приближений результаты синтеза. В качестве подстроечного элемента, как показывает практика, можно использовать дополнительный шлейф [8]. На рисунке 5 представлены геометрические размеры согласующего устройства после оптимизации.

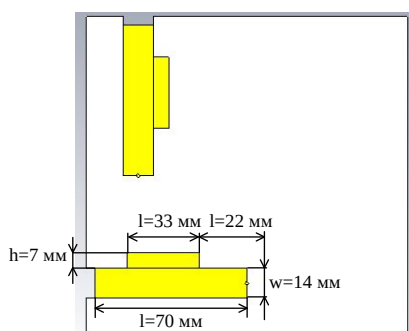


Рисунок 5 – размеры согласующего элемента после оптимизации

Опытный образец антенны представлен на рисунке 6. Полоса согласования по уровню КСВ = 2 составляет 20 % (рисунок 7), что является хорошим результатом и обеспечивает прием и передачу сигналов в полосе 240 МГц.



Рисунок 6 – Конструкция антенны: а – вид сбоку; б – вид сзади

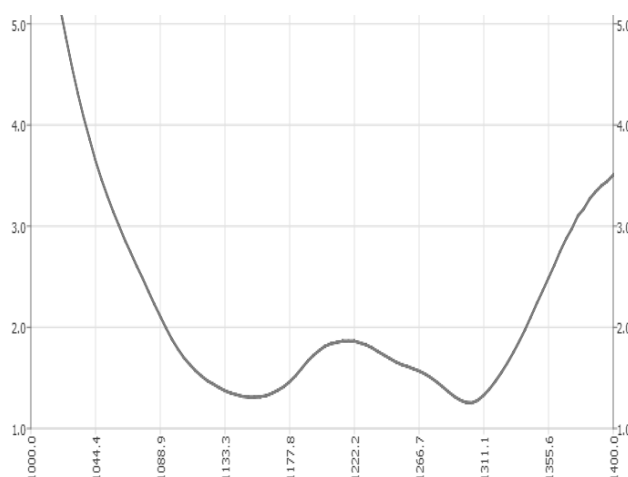


Рисунок 7 – Характеристика КСВ согласованной антенны

Заключение. Успешное решение практической задачи основано на использовании фундаментальных положений аналитической теории широкополосного согласования. Показана возможность применения методики синтеза, основанной на обобщенном методе Дарлингтона для согласования в распределенном элементном базисе. Полученные теоретические результаты имеют достаточно высокую степень соответствия с результатами моделирования и эксперимента. Оптимизация параметров на конечном этапе позволила улучшить характеристику КСВ с учётом расширения рабочей полосы до 20 %.

Литература

1. Nacsimento, D. C. Probe-fed linearly-polarized electrically equivalent microstrip antennas on FR4 substrates / D. C. Nacsimento, J. C. da S. Lacava // *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*. – 2014. – Vol. 13 (1). – P. 55–66.
2. Sharma, S. Impedance Matching Techniques for Microstrip Patch Antenna / S. Sharma, C. C. Tripathi, R. Rishi // *Indian journal of science and technology*. – 2017. – Vol. 10 (28). – P. 1–16.
3. Филиппович, Г. А. Широкополосное согласование сопротивлений / Г. А. Филиппович. – Минск : ВАРБ, 2004. – 176 с
4. Янцевич, М. А. Методика синтеза широкополосных согласующих устройств с использованием ограниченно-плоских аппроксимирующих функций / М. А. Янцевич, Г. А. Филиппович // *Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины*. – 2021. – № 6 (129). – С. 154–158.
5. Янцевич, М. А. Гибкие аппроксимирующие функции для широкополосного согласования / Г. А. Филиппович, М. А. Янцевич // *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. – 2022. – № 2. – С. 6–15.
6. Richards, P. I. Resistor-transmission-line circuits / P. I. Richards // *Proc. IRE*. – 1948. – Vol. 36. – P. 217–220.
7. Yarman, S. B. Design of ultra wideband power transfer networks / S. B. Yarman – Istanbul University, 2010. – P. 751.
8. Kusama, Y Compact and broadband microstrip band-stop filters with single rectangular stubs / Y. Kusama, R. Isozaki // *Applied sciences*. – 2019. – Vol. 9 (248). – P. 1–12.

Физика

УДК 537:621.3.049.774

Повышение селективности травления нитрида кремния к диоксиду кремния субмикронных интегральных схем

В.В. ЕМЕЛЬЯНОВ

В работе представлены решение для повышения селективности травления нитрида кремния, полученного химическим осаждением из парогазовой фазы, по отношению к термическому диоксиду кремния.

Ключевые слова: реактивно-ионное травление, нитрид кремния, диоксид кремния, микроэлектроника.

The paper presents a solution for increasing the selectivity of etching of silicon nitride obtained by chemical vapor deposition with respect to thermal silicon dioxide.

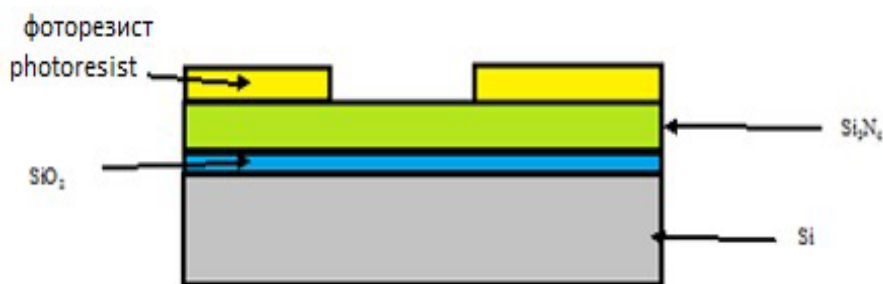
Keywords: reactive ion etching, silicon nitride, silicon dioxide, microelectronics.

Введение. Поставленная задача решается тем, что в способе формирования рисунка в пленке нитрида кремния, включающем формирование на полупроводниковой подложке с топологическими элементами интегральных схем пленки диоксида кремния, формирование пленки нитрида кремния химическим осаждением из парогазовой фазы, формирование фоторезистивной маски методами стандартной фотолитографии, реактивно-ионное травление нитрида кремния во фторсодержащей плазме и удаление фоторезистивной маски, после формирования пленки нитрида кремния химическим осаждением из парогазовой фазы проводят обработку полученной пленки 1–5 импульсами ближнего инфракрасного излучения длительностью от 0,05 до 0,5 с при экспозиции от 0,2 до 1,0 Дж/см².

Методика. Предлагаемое техническое решение заключается в снижении скорости травления диоксида кремния за счет повышения энергии химической связи в его решетке. Исходный монокристаллический кремний является достаточно прозрачным в ИК-области. Термообработанный кремний содержит большое количество точечных дефектов, являющихся центрами поглощения. Поэтому кремниевые пластины, на которых сформированы топологические элементы с использованием термообработки, практически непрозрачны. Все ИК-излучение при этом поглощается в поверхностной области. При использовании излучения большей длины волны кремниевая подложка соответственно прогревается на большую глубину. В этом случае для достижения сравнимого положительного эффекта требуется пропорциональное увеличение мощности излучателей, что экономически нецелесообразно.

Источники ближнего ИК-излучения широко распространены и используются в технологии микроэлектроники [1]. К ним, в частности, относятся галогенные кварцевые лампы, дающие максимум излучения на длине волны порядка 1,1 мкм. Невысокая глубина поглощающей области приводит к концентрации поглощенной энергии в активной области полупроводниковой структуры, не затрагивая объем кремниевой пластины. Однако в связи с высокой теплопроводностью кремния эта поглощенная энергия довольно быстро распределяется по всему объему, приводя к быстрому охлаждению поверхностного слоя. Поэтому импульс ИК-излучения должен быть достаточно мощным для достижения требуемого эффекта в активной области и достаточно коротким, чтобы предотвратить нагрев всего объема пластины. Только в этом случае достигается эффект релаксации напряжений с соответствующими структурно-фазовыми изменениями и эффект «заковки» генерируемых и высвобождаемых точечных дефектов, стабилизирующих достигнутое состояние.

Нагреву при реализации предлагаемого способа подвергаются пленка нитрида кремния, пленка диоксида кремния и приповерхностная область кремниевой подложки толщиной порядка 1 мкм (рисунок 1).

Рисунок 1 – Поперечное сечение сформированной структуры $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}$

После прекращения ИК-импульса поглощенное этой частью структуры тепло в результате теплопроводности распределяется по всему объему подложки. Поскольку толщина подложки (600–800 мкм) неизмеримо больше нагреваемой области, а ее температура равна комнатной, вследствие высокой теплопроводности кремния происходит «закалка» пленок диоксида и нитрида кремния. В течение действия ИК-импульса происходит быстрая релаксация растягивающих напряжений в нитриде кремния за счет генерации и взаимодействия точечных дефектов, которая сопровождается соответствующей релаксацией сжимающих напряжений в его диоксиде. При этом нестабильный стишовит под воздействием высокой температуры в условиях существенного снижения напряжений переходит в более стабильный коэсит и другие полиморфные модификации SiO_2 , энергия химической связи в которых существенно выше. Охлаждение поверхностного слоя структуры за счет теплопроводности кремния после прекращения ИК импульса способствует фиксации образовавшихся фаз диоксида кремния до непосредственно процесса травления нитрида. Стойкость SiO_2 к воздействию фторсодержащей плазмы за счет повышения энергии химической связи повышается. Одновременно высвобождение большого количества точечных дефектов в Si_3N_4 в результате релаксации растягивающих напряжений способствует повышению скорости его травления. Таким образом, селективность травления нитрида кремния по отношению к его диоксиду существенно возрастает.

Выбор режимов обработки структур определяется наличием и полнотой протекания рассматриваемых полиморфных превращений. Минимальная длительность ИК-импульса определена экспериментально на основании реальных возможностей технологического оборудования по набору экспозиции. При длительности импульса менее 0,05 с для достижения требуемой экспозиции необходимо использовать специализированное оборудование высокой мощности, что экономически не обосновано. А при длительности импульса более 0,5 с вследствие высокой теплопроводности кремния происходит чрезмерный преждевременный разогрев объема полупроводниковой подложки, что не позволяет в должной мере осуществить «закалку» пленок.

При экспозиции менее $0,2 \text{ Дж/см}^2$ поверхностная область обрабатываемой структуры не нагревается до требуемой температуры полиморфных превращений во всем временном интервале предложенного способа, а при экспозиции более $1,0 \text{ Дж/см}^2$ в заданном временном интервале в структуре вероятно возникновение дефектов, связанных с особенностями релаксации механических напряжений.

Экспериментально установлено, что повышение селективности травления достигается после обработки структур хотя бы одним ИК-импульсом с заявленными характеристиками. При этом использование более 5 импульсов нецелесообразно как в связи с необоснованным увеличением длительности процесса, так и в связи с накоплением подложкой тепла и связанной с этим потерей эффекта «закалки».

Данный способ реализован при изготовлении интегральных схем типа IZ33567B. На пластинах 150 КДБ-12 (100) стандартными методами химической обработки, окисления, термообработки, ионного легирования, диффузии, фотолитографии, травления формировали области кармана. Затем на поверхности полученных структур формировали методом термического окисления поднитридный диоксид кремния толщиной 25 нм. Пленку нитрида кремния толщиной 200 нм осаждали из парогазовой фазы при температуре 780°C за счет реакции моносилана с аммиаком [2]. Импульсную ИК-обработку структур проводили на установке оптического отжига с модернизированным таймером, обеспечивающим получение ИК-импульсов с шагом 0,01 с. Режимы ИК-обработки приведены в таблице. Методами стандартной фотолитографии

на поверхности полученных структур формировали маску фоторезиста, после чего структуры подвергали плазмохимическому травлению во фторсодержащей плазме [3] на установке плазмохимического травления GIR 260S компании Alcatel, которая представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Установка реактивно-ионного травления GIR 260S

После удаления фоторезиста проводили контроль полученного фотолитографического рисунка на соответствие требованиям действующей на данное изделие технической документации. Селективность травления определяли на тестовых структурах, изготовленных в одном технологическом цикле с рабочими. По окончании технологического цикла изготовления структур проводили контроль их функционирования [4]–[5]. Результаты контроля приведены в таблице 1.

Из таблицы видно, что данный способ в совокупности отличительных признаков позволяет повысить селективность травления нитрида кремния по отношению к диоксиду, предотвратить появление микротрещин, что повышает качество фотолитографического рисунка и увеличивает выход годных кристаллов на операции контроля функционирования ИС [6].

Таблица 1 – Влияние режимов ИК-обработки на селективность травления нитрида кремния и выход годных ИС

п/п	Количество импульсов, шт.	Длительность импульса, с	Экспозиция, Дж/см ²	Селективность травления	Выход годных кристаллов, %	Примечание
1	1	0,2	0,5	3,3	85,3	
2	3	0,2	0,5	3,5	88,8	
3	5	0,2	0,5	3,6	90,1	
4	8	0,2	0,5	2,8	89,1	Необоснованное увеличение продолжительности процесса
5	3	0,03	0,5	2,7	72,6	Неполное полиморфное превращение
6	3	0,05	0,5	3,5	89,0	
7	3	0,50	0,5	3,7	92,6	
8	3	0,80	0,5	2,6	81,8	Перегрев структур, нивелирование «закалки»
9	3	0,2	0,1	2,5	78,2	Неполное полиморфное превращение
10	3	0,2	0,2	3,5	88,1	
11	3	0,2	1,0	3,7	91,0	
12	3	0,2	1,5	2,5	84,3	Перегрев структур, нивелирование «закалки»
13	прототип			2,2	68,7	Отдельные микротрещины

Заключение. Введение дополнительной операции инфракрасного (ИК) облучения формируемой структуры в соответствии с заявляемыми длительностью и экспозицией обеспечивает нагрев поверхностной области на глубину, соизмеримую с длиной волны используемого излучения ($\sim 0,7\text{--}2,0$ мкм), до температур порядка $700\text{--}1000^\circ\text{C}$. Это приводит к релаксации механических напряжений и полиморфным превращениям в структуре поднитридного диоксида кремния с повышением энергии химической связи. Стишовит, образовавшийся под действием высоких сжимающих напряжений в пленке SiO_2 и обладающий сравнительно невысокой энергией химической связи, превращается в коэсит и другие полиморфные модификации, энергия химической связи и устойчивость к воздействию фторсодержащей плазмы которых заметно выше. Таким образом, скорость травления пленки SiO_2 снижается, а селективность травления пленки Si_3N_4 по отношению к SiO_2 возрастает.

Литература

1. Инновационные технологии и оборудование субмикронной электроники / А. П. Достанко, В. В. Емельянов, С. И. Мадвейко [и др.] ; под ред. акад. А. П. Достанко. – Минск : Беларуская навука, 2020. – 260 с.
2. Турцевич, А. С. Формирование из газовой фазы функциональных слоев интегральных микросхем / А. С. Турцевич, В. А. Емельянов. – Минск : «Интегралполиграф», 2007. – 224 с.
3. Григорьев, Ф. И. Плазмохимическое и ионное химическое травление в технологии микроэлектроники / Ф. И. Григорьев. – М. : МГИЭМ, 2003. – 48 с.
4. Емельянов, В. В. Повышение устойчивости к стресс-миграции пленочных структур на основе алюминия в микроэлектронике / В. В. Емельянов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2020. – № 1. – С. 152–159.
5. Емельянов, В. В. Многослойные токопроводящие пленки на основе алюминия для полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / В. В. Емельянов, В. А. Емельянов, В. В. Баранов // Вес. Нац. Акад. наук Беларуси. Сер., Физ-техн. наук. – 2020. – Т. 65, № 2. – С. 170–176.
6. Абдуллаев, Д. А. Селективное плазмохимическое травление нитрида кремния относительно оксида кремния / Д. А. Абдуллаев, А. А. Зайцев, Е. А. Кельм // Нано- и микросистемная техника. – 2014. – № 2. – С. 17–19.

Оптимизация параметров лазерной двухлучевой сварки кварцевого стекла с использованием метода планирования вычислительных экспериментов

В.А. ЕМЕЛЬЯНОВ¹, Е.Б. ШЕРШНЕВ², Ю.В. НИКИТЮК², С.И. СОКОЛОВ², А.Ю. АУШЕВ³

В работе с использованием метода полного факторного эксперимента получена регрессионная модель двухлучевой сварки кварцевого стекла с применением CO₂-лазеров и выполнена оптимизация параметров обработки. Расчет температурных полей был выполнен методом конечных элементов в программе ANSYS с учетом зависимости теплофизических свойств кварцевого стекла от температуры. В качестве варьируемых факторов использовались скорость обработки, радиусы и мощности лазерных пучков. В качестве откликов использовались максимальные температуры в зоне обработки и глубины проплавления материала. Определены значения технологических параметров двухлучевой сварки кварцевого стекла, обеспечивающие максимальную глубину проплавления материала при заданном диапазоне значений температуры в зоне воздействия лазерного излучения.

Ключевые слова: лазерная сварка, кварцевая пластина, ANSYS.

The regression model of double-beam welding of quartz glass using CO₂ lasers and the optimization of processing parameters were obtained in this work using the method of full-factor experiment. The calculation of the temperature fields was performed with the finite element method in the ANSYS program taking into account the dependence of thermal physical properties of quartz glass on the temperature. The processing speed, radii, and laser beam powers were used as varying factors. The maximum temperatures in the treatment area and the depth of material penetration were used as responses. The values of technological parameters of double-beam welding of quartz glass, providing the maximum depth of material penetration at a given range of values of temperature in the zone of laser radiation were determined.

Keywords: laser welding, quartz plate, ANSYS.

Введение. Кварцевое стекло характеризуется уникальным набором характеристик [1]–[2]. Для данного материала характерна высокая термостойкость, химическая стойкость и прочность, что обуславливает применение кварцевого стекла в микроэлектронике [3]–[8].

Одним из эффективных методов создания изделий из кварцевого стекла является лазерная сварка, при этом благодаря высокой плотности энергии и узкой зоне проплавления использование лазерной сварки обеспечивает минимальные деформации сварных соединений [9]–[15]. В ряде случаев успешная реализация технологий лазерной сварки обеспечивалась применением двухлучевых методов [14]. Ранее авторами с использованием конечно-элементного моделирования были проведены исследования процесса двухлучевой лазерной сварки кварцевого стекла [15].

Повышение эффективности применения лазерных технологий может быть обеспечено за счет оптимизации соответствующих технологических параметров. Примеры реализации оптимизации параметров лазерной обработки приведены в работах [16]–[19].

В настоящее время успешно применяется метамоделирование, при реализации которого модели для сложных систем строятся по результатам вычислительных экспериментов. Основной целью создания метамоделей является определение приближенных значений выходных параметров на основе входных параметров без проведения полных расчётов. Достижение данного результата обеспечивается применением метода планирования вычислительных экспериментов при создании соответствующих регрессионных выражений [20]–[23].

В работе с использованием метамоделирования проведена оптимизация параметров лазерной двухлучевой сварки кварцевого стекла.

Конечно-элементный анализ. Температурное поле, формируемое в материале лазерным излучением, является основной характеристикой, определение которой обеспечивает возможность оптимизации параметров лазерной сварки кварцевого стекла.

Для расчета температурных полей, формируемых при двухлучевой лазерной сварке кварцевого стекла, использовался комплекс конечно-элементного анализа ANSYS. Моделирование осуществлялось с использованием подготовленной расчётной программы на языке программирования APDL (ANSYS parametric design language) [24]–[26] по схеме двухлучевой суперпозиционной сварки кварцевого стекла (см. рисунок 1) [14]–[15].

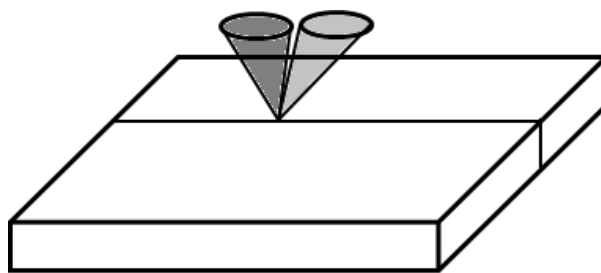


Рисунок 1 – Схема двухлучевой суперпозиционной сварки

Для моделирования использовалась пластина с геометрическими размерами $20 \times 10 \times 3$ мм. Для расчетов была создана конечно-элементная модель, состоящая из 38400 элементов и 43173 узлов. При реализации теплового анализа применялись элементы Solid 70. Моделирование выполнялось с учетом зависимости теплофизических свойств кварцевого стекла от температуры [1]–[2], [13], [15].

Таблица 1 – Параметры лазерной двухлучевой сварки

Параметры	Значения
Скорость обработки v , мм/с	3
Радиус первого лазерного пучка r_1 , мм	1
Радиус второго лазерного пучка r_2 , мм	1,5
Мощность первого пучка P_1 , Вт	30
Мощность второго пучка P_2 , Вт	30

Полученные при моделировании распределения температурных полей представлены на рисунке 2.

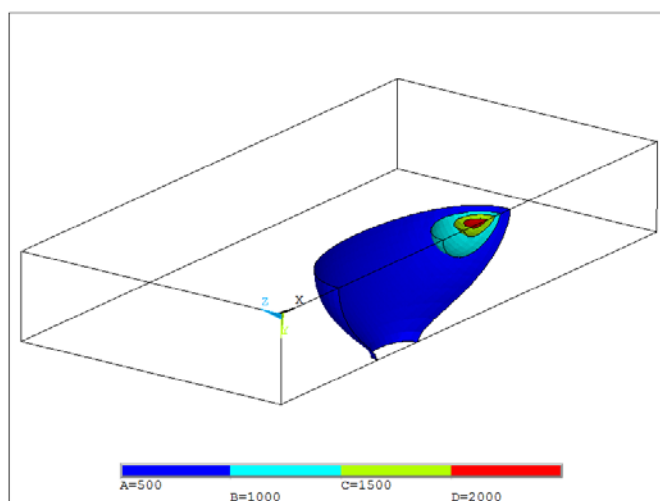


Рисунок 2 – Распределение температурного поля при воздействии двух круглых лазерных пучков, определенное с помощью ANSYS, К

Верификация конечно-элементной модели была выполнена на основании экспериментальных данных, полученных с использованием CO_2 -лазера и тепловизора ИТ-3СМ. При проведении экспериментов использовалась пластина из кварцевого стекла размерами $20 \times 10 \times 2$ мм. На рисунке 3 представлено распределение температурного поля в образце при воздействии круглого лазерного пучка радиусом 1 мм с мощностью 20 Вт, скорость обработки составляла 5 мм/с.

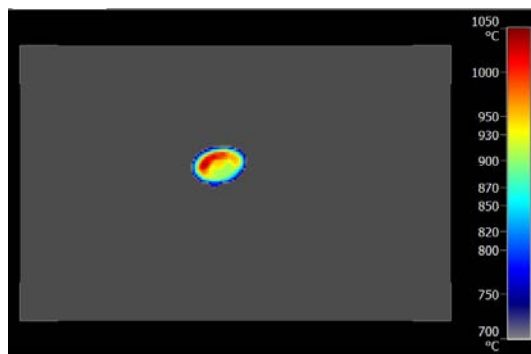


Рисунок 3 – Распределение температурного поля при воздействии круглого лазерного пучка, определенное экспериментально, °C

Результаты экспериментов позволяют сделать вывод о необходимом соответствии данных конечно-элементного моделирования экспериментальным данным. При этом относительная ошибка при определении максимальных температур на поверхности образца не превысила 5 %.

Методика численного эксперимента. При планировании численного эксперимента была использована методика полного факторного эксперимента первого порядка с двухуровневым варьированием факторов.

Сформирован план для пяти факторов: скорость обработки v , радиус первого лазерного пучка r_1 , радиус второго лазерного пучка r_2 , мощность первого пучка P_1 , мощность второго пучка P_2 . При этом определялись следующие выходные параметры: глубина проплавления z и максимальная температура в зоне обработки T . Таким образом, моделью объекта исследования являлись функции отклика (z) и (T), связывающие выходные параметры с факторами (V, r_1, r_2, P_1, P_2), которые менялись в заданных пределах при проведении опытов.

После преобразования независимых переменных в натуральном масштабе к безразмерным переменным с кодируемыми значениями $-1, +1$ была сформирована таблица 2.

Таблица 2 – Значения независимых переменных в кодированном виде

Независимые переменные	Безразмерные переменные	-1	+1
Скорость обработки v , мм/с	x_1	3	4
Радиус первого лазерного пучка r_1 , мм	x_2	1	1,25
Радиус второго лазерного пучка r_2 , мм	x_3	1,5	1,75
Мощность первого пучка P_1 , Вт	x_4	30	35
Мощность второго пучка P_2 , Вт	x_5	30	35

В таблице 3 представлены результаты численного эксперимента по двулучевой лазерной сварке кварцевого стекла, проведенные при всех значениях факторов.

Таблица 3 – Результаты численного эксперимента

Номер комбинации факторов	Факторы					Глубина проплавления z , мм	Максимальная температура в зоне обработки T , К
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5		
1	-1	-1	-1	-1	-1	0,24	2222
2	1	-1	-1	-1	-1	0,20	2111
3	-1	1	-1	-1	-1	0,25	2121
4	1	1	-1	-1	-1	0,18	2014
5	-1	-1	1	-1	-1	0,20	2124
6	1	-1	1	-1	-1	0,15	2017
7	-1	1	1	-1	-1	0,18	1984
8	1	1	1	-1	-1	0,11	1884
9	-1	-1	-1	1	-1	0,30	2404
10	1	-1	-1	1	-1	0,25	2281
11	-1	1	-1	1	-1	0,32	2273
12	1	1	-1	1	-1	0,25	2155
13	-1	-1	1	1	-1	0,27	2307

Окончание таблицы 3

14	1	-1	1	1	-1	0,22	2188
15	-1	1	1	1	-1	0,26	2136
16	1	1	1	1	-1	0,20	2024
17	-1	-1	-1	-1	1	0,27	2312
18	1	-1	-1	-1	1	0,22	2194
19	-1	1	-1	-1	1	0,30	2227
20	1	1	-1	-1	1	0,23	2112
21	-1	-1	1	-1	1	0,23	2198
22	1	-1	1	-1	1	0,19	2084
23	-1	1	1	-1	1	0,23	2066
24	1	1	1	-1	1	0,16	1959
25	-1	-1	-1	1	1	0,33	2494
26	-1	-1	-1	1	1	0,27	2364
27	-1	1	-1	1	1	0,36	2378
28	1	1	-1	1	1	0,29	2253
29	-1	-1	1	1	1	0,30	2380
30	1	-1	1	1	1	0,24	2255
31	-1	1	1	1	1	0,30	2218
32	1	1	1	1	1	0,23	2100

По данным, представленным в таблице 3, были построены регрессионные модели, определяющие зависимости z и T от параметров обработки. Полученные уравнения регрессии имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 z = & 0,2410 - 0,0295x_1 - 0,0011x_2 - 0,0248x_3 + 0,0333x_4 + 0,0173x_5 - \\
 & - 0,0048x_1x_2 + 0,0008x_1x_3 - 0,0011x_1x_4 - 0,0008x_1x_5 - 0,0070x_2x_3 + \\
 & + 0,0030x_2x_4 + 0,0039x_2x_5 + 0,0030x_3x_4 + 0,0002x_3x_5 - 0,0017x_4x_5 + \\
 & + 0,0005x_1x_2x_3 + 0,0017x_1x_2x_4 + 0,0002x_1x_2x_5 - 0,0002x_1x_3x_4 + \\
 & + 0,0008x_1x_3x_5 - 0,0011x_1x_4x_5 + 0,0002x_2x_3x_4 - 0,0008x_2x_3x_5 - \\
 & - 0,0008x_2x_4x_5 - 0,0008x_3x_4x_5 + 0,0002x_1x_2x_3x_4 - 0,0008x_1x_2x_3x_5 + \\
 & + 0,0005x_1x_2x_4x_5 - 0,0014x_1x_3x_4x_5 + 0,0002x_2x_3x_4x_5 + 0,0002x_1x_2x_3x_4x_5;
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 T = & 2182,46875 - 57,7812x_1 - 63,4688x_2 - 62,2188x_3 + 80,6563x_4 + 42,1563x_5 - \\
 & - 1,4063x_1x_2 + 1,4063x_1x_3 - 2,8438x_1x_4 - 1,7188x_1x_5 - 10,4063x_2x_3 - 7,5313x_2x_4 + \\
 & + 2,9683x_2x_5 + 0,0938x_3x_4 - 4,9063x_3x_5 - 0,0313x_4x_5 + 0,3438x_1x_2x_3 + 0,0938x_1x_2x_4 - \\
 & - 0,0313x_1x_2x_5 - 0,0313x_1x_3x_4 + 0,0938x_1x_3x_5 + 0,0938x_1x_4x_5 - 0,0938x_2x_3x_4 - 0,8438x_2x_3x_5 + \\
 & + 0,0318x_2x_4x_5 + 0,0318x_3x_4x_5 - 0,0938x_1x_2x_3x_4 - 0,0318x_1x_2x_3x_5 + 0,0313x_1x_2x_4x_5 + \\
 & + 0,0313x_1x_3x_4x_5 + 0,0938x_2x_3x_4x_5 - 0,0313x_1x_2x_3x_4x_5,
 \end{aligned} \quad (2)$$

где $x_1 = \frac{v-3,5}{0,5}$, $x_2 = \frac{r_1-1,125}{0,125}$, $x_3 = \frac{r_2-1,625}{0,125}$, $x_4 = \frac{P_1-32,5}{2,5}$, $x_5 = \frac{P_2-32,5}{2,5}$.

Была проведена проверка регрессионной модели на тестовом наборе данных, приведенном в таблице 4.

Таблица 4 – Тестовый набор данных

v , мм/с	r_1 , мм	r_2 , мм	P_1 , Вт	P_2 , Вт	z , мм	T , К
3,3	1,1	1,6	32	32	0,26	2198
3,3	1,2	1,7	32	32	0,22	2076
3,3	1,2	1,7	34	34	0,27	2169
3,6	1,2	1,7	33	33	0,22	2089
3,6	1,1	1,6	32	34	0,25	2198

Оценка полученной регрессионной модели была выполнена с использованием следующих критериев: – средняя абсолютная ошибка (англ. Mean Absolute Error, MAE)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i - y_i|;$$

– средняя квадратичная ошибка (англ. Root Mean Square Error, RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2};$$

– средняя абсолютная процентная ошибка (англ. Mean Absolute Percentage Error, MAPE)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{d_i - y_i}{d_i} \right| \times 100,$$

где d_i – значения, определенные методом конечных элементов, y_i – значения, определенные с использованием регрессионных моделей.

Значения критериев, используемых для оценки регрессионных моделей, представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты оценки регрессионных моделей

Критерий	Тестовый набор	
	z	T
RMSE	0,008	21,1
MAE	0,006	18,8
MAPE	2,5	0,9

Полученные данные позволяют сделать вывод о наличии необходимого соответствия регрессионной модели результатам конечно-элементного анализа.

Оптимизация параметров лазерной сварки кварцевого стекла осуществлялась с использованием метода перебора. Этот метод в случае решения экстремальных задач является вариантом прямого метода оптимизации [27].

Диапазон значений температуры T , необходимой для эффективной лазерной сварки, был принят равным 2000–2500 К. Затем были рассчитаны глубины проплавления. Скорость v варьировалась в пределах 3–4 мм/с с шагом 0,1 мм/с, радиус первого лазерного пучка r_1 изменялся в пределах 1,0–1,25 мм с шагом 0,025 мм, радиус второго лазерного пучка r_2 изменялся в пределах 1,5–1,75 мм с шагом 0,025 мм, мощность первого лазерного пучка P_1 изменялся в пределах 30–35 Вт с шагом 0,5 Вт и мощность второго лазерного пучка P_2 изменялся в пределах 30–35 Вт с шагом 0,5 Вт. Результаты оптимизации приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты оптимизации

№	$v, \text{мм/с}$	$r_1, \text{мм}$	$r_2, \text{мм}$	$P_1, \text{Вт}$	$P_2, \text{Вт}$	$T, \text{К}$	$z, \text{мм}$
1	3,0	1,25	1,50	35,00	35,00	2378	0,360
2	3,0	1,23	1,50	35,00	35,00	2390	0,357
3	3,0	1,25	1,50	35,00	34,50	2367	0,356

Как видно из таблицы 5, формирование температур в заданном диапазоне осуществляется при выборе трех наборов параметров лазерной обработки, при этом значения параметров во всех наборах имеют небольшие различия.

Заключение. В работе с использованием методики полного факторного эксперимента первого порядка с двухуровневым варьированием факторов получена регрессионная модель лазерной дуговой сварки кварцевых пластин. Выполнена верификация конечно-элементной модели на основании экспериментальных данных. Установлено наличие необходимого соответствия регрессионной модели результатам конечно-элементного анализа. В результате численного эксперимента определены оптимальные параметры лазерной сварки кварцевых изделий, обеспечивающие максимальную глубину проплавления при заданном диапазоне значений температуры в зоне воздействия лазерного излучения. Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации процессов лазерной сварки кварцевых изделий.

Литература

1. Арбузов, В. И. Основы радиационного оптического материаловедения / В. И. Арбузов. – СПб. : СПб ГУ ИТМО, 2008. – 284 с.
2. Леко, В. К. Свойство кварцевого стекла / В. К. Леко, О. В. Мазурин. – Л. : Наука, 1985. – 165 с.

3. Технология интегральной электроники : учеб. пособ. по дисциплине / Л. П. Ануфриев, С. В. Бордусов, Л. И. Гурский [и др.]. – Минск : «Интегралполиграф», 2009. – 379 с.: ил.
4. Ланин, В. Л. Формирование токопроводящих контактных соединений в изделиях электроники / В. Л. Ланин, А. П. Достанко, Е. В. Телеш. – Минск : Изд. центр БГУ, 2007. – 574 с.
5. Бокарев, В. Контактная литография в нанотехнологии / В. Бокарев, Е. Горнев // Наноиндустрия. – 2010. – № 5. – С. 22–25.
6. Инновационные технологии и оборудование субмикронной электроники / А. П. Достанко [и др.] ; под ред. акад. НАН Беларуси А. П. Достанко. – Минск : Беларуская навука, 2020. – 260 с.
7. Аваков, С. Оптико-механические комплексы для бездефектного изготовления фотошаблонов 0,35 мкм и 90 нм // С. Аваков, В. Овчинников, С. Карпович, Е. Титко, Г. Трапашко // Фотоника. – 2007. – № 6. – С. 35–39.
8. Сысоев, В. К. Многофункциональная технология обработки кварцевого стекла излучением $\text{Co } 2$ лазеров / В. К. Сысоев // Известия высш. учебн. завед. Приборостроение. – 2004. – Т. 47. – № 6. – С. 61–67.
9. Мачулка, Г. А. Лазерная обработка стекла / Г. А. Мачулка. – М. : Советское радио, 1979. – 135 с.
10. Kondratenko, V. S. Laser Welding of Glass / V. S. Kondratenko, V. E. Borisovskii // Glass and Ceramics. – 2018. – № 75 (3-4). – P. 83–88.
11. Sysoev, V. K. Laser welding of quartz glass workpieces / V. K. Sysoev, B. N. Planida, A. A. Verlan [et al.] // Glass and Ceramics. – 2012. – № 68 (11-12). – P. 389–392.
12. Miyamoto, I. Laser welding of glass / I. Miyamoto // Handbook of Laser Welding Technologies. – Woodhead Publishing, 2013. – P. 301–331.
13. Борисовский, В. Е. Развитие теории и разработка комплекса технологий и оборудования для лазерной обработки кварцевого стекла : дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.14 / В. Е. Борисовский. – М., 2011. – 182 с.
14. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
15. Распределение температурных полей при двухлучевой сварке кварцевого стекла / Е. Б. Шершнев, Ю. В. Никитюк, С. И. Соколов, А. Е. Шершнев // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2012. – № 6 (75). – С. 105–109.
16. Бессмельцев, В. П. Оптимизация режимов лазерной микрообработки / В. П. Бессмельцев, Е. Д. Булушев // Автометрия. – 2014. – Т. 50, № 6. – С. 3–21.
17. Parandoush, P. review of modeling and simulation of laser beam machining / P. Parandoush, A. Hossain // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2014. – V. 85. – P. 135–145.
18. Nikityuk, Y. V. Optimization of two-beam laser cleavage of silicate glass / Y. V. Nikityuk, A. N. Serdyukov, I. Y. Aushev // J. Opt. Technol. – 2022. – V. 89. – P. 121–125.
19. Никитюк, Ю. В. Оптимизация параметров лазерного раскалывания кварцевого стекла / Ю. В. Никитюк, А. Н. Сердюков, И. Ю. Аушев // Проблемы физики, математики и техники. – 2021. – № 4 (49). – С. 21–28.
20. Сокращение размерности данных в задачах имитационного моделирования / Ю. Г. Агалаков, А. В. Бернштейн // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2012. – № 3. – С. 3–17.
21. Wang, G. Review of Metamodeling Techniques in Support of Engineering Design Optimization / G. Wang, S. Gary Shan // J. Mech. Des. – 2007. – № 129 (3). – P. 370–381.
22. Планирование и анализ результатов эксперимента : учеб. пособ. / А. П. Моргунов, И. В. Ревина ; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2014. – 343 с.
23. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 278 с.
24. Официальный сайт компании ANSYS [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.ansys.com/>. – Дата доступа : 25.04.2022.
25. Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера : практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
26. Чигарев, А. В. ANSYS для инженеров : справочное пособие / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. – М. : Машиностроение, 2004. – 512 с.
27. Gill, F. Practical optimization / F. Gill, W. Murray, M. Wright. – М. : Mir, 1985. – P. 383.

¹ОАО «Интеграл»

²Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

³Университет гражданской защиты
МЧС Республики Беларусь

Влияние термообработки на электрофизические характеристики контактов Pt к гетероструктурам SiC/Si

М.В. ЛОБАНОК¹, Н.В. ПОЛОНСКИЙ¹, С.В. КОЗОДОВ², П.И. ГАЙДУК¹

В работе представлены результаты исследования влияния режимов термообработки на электрофизические характеристики контактов Pt к гетероструктурам SiC/Si и Si/SiC/Si. Термообработку образцов проводили в инертной среде (сухой N₂) при температуре в диапазоне от 350°C до 500°C в течение 10 минут. Установлено, что при температуре процесса термообработки 350°C на обоих типах структуры происходит формирование Pt₂Si, вызывающее резкое снижение слоевого сопротивления до ~ 90 Ом/квadrat. При дальнейшем увеличении температуры процесса термообработки до 500°C в структуре Si/SiC/Si сопротивление снижается до 38 Ом/квadrat за счет формирования PtSi. Обратные токи утечки, высота барьера Шоттки сформированных контактов Pt₂Si к гетероструктурам SiC/Si и Si/SiC/Si составили $2,54 \cdot 10^{-8}$ и $4,50 \cdot 10^{-8}$ А, 0,79 и 0,77 эВ соответственно. Предполагается, что термообработка при 500°C структуры Pt/SiC/Si увеличивает токи утечки контакта, которые связаны с образованием углеродных кластеров.

Ключевые слова: гетероструктуры SiC/Si, диод Шоттки, силициды платины, тонкие пленки.

The paper presents the effect of heat treatment regimes on the electrical characteristics of Pt contacts to SiC/Si and Si/SiC/Si heterostructures. The heat treatment of the samples is carried out in an inert atmosphere (dry N₂) at a temperature in the range from 350°C to 500°C for 10 minutes. It is shown by a scanning electron microscopy that heat treatment of both types of structures at 350°C leads to the formation of Pt₂Si. At the same time, heat treatment of the Pt/SiC/Si and Pt/Si/SiC/Si structures at 500°C leads to the formation of Pt₂Si and PtSi, respectively. The reverse leakage currents, the height of the Schottky barrier of the formed Pt₂Si contacts to the SiC/Si and Si/SiC/Si heterostructures were $2,54 \cdot 10^{-8}$ and $4,50 \cdot 10^{-8}$ А, 0,79 and 0,77 eV, respectively. It is assumed that heat treatment at 500°C of the Pt/SiC/Si structure increases contact leakage current, which is associated with the formation of carbon clusters.

Keywords: SiC/Si heterostructures, Schottky diode, platinum silicides, thin films.

Введение. Карбид кремния (SiC) является широкозонным полупроводником с привлекательным набором электрофизических, химических, термических и механических характеристик, что позволяет создавать силовые полупроводниковые приборы с высокой температурной и радиационной устойчивостью [1], [2]. Вместе с тем, получение слитков и пластин монокристаллического SiC большого диаметра связано с определенными технологическими проблемами, что приводит к высокой стоимости приборов и интегральных схем, формируемых на их основе. Альтернативным решением могут стать гетероструктуры, включающие тонкие слои SiC, эпитаксиально выращенные на кремниевых подложках [3]. Такие гетероэпитаксиальные структуры позволяют не только интегрировать слои SiC в хорошо отработанную кремниевую технологию, но и создавать функциональные полупроводниковые приборы, например, газовые датчики [4], [5], МЭМС [6], вертикальные диодные структуры [7] и другие устройства. Гетероструктуры SiC/Si использованы также при создании гибридных силовых устройств, включающих первичный Si-IGBT с малым прямым током и вспомогательный SiC-MOS с большим прямым током. Сообщается [8], что в таких устройствах обеспечен компромисс между стоимостью силовых полупроводниковых приборов и их производительностью.

Важным условием нормальной работы полупроводниковых приборов и интегральных схем является создание воспроизводимых и надежных контактов с заданными параметрами. Среди различных типов контактов к слоям SiC особый интерес представляют контакты на основе силицидов металлов, которые способны функционировать при достаточно высоких температурах [2]. Вместе с тем, в настоящее время все еще не решен ряд проблемных вопросов, связанных с подбором способов нанесения металлизации и режимов формирования силицидов металлов при их последующей термообработке (ТО). В частности, в ряде исследований показано [9]–[12], что формирование омических и выпрямляющих контактов к слоям SiC сильно зависит от режимов ТО слоев металл/карбид кремния, что в ряде случаев связано с сегрегацией примеси и (или) присутствием окислов на межфазных границах или поверхности при нанесении металлов и силицидообразовании.

Таким образом, формирование надежных контактов к слоям SiC на Si-подложке требует проведения систематических исследований влияния режимов термообработки на структуру и морфологическое состояние контактных областей, а также на электрофизические характеристики структур металл (силицид)/SiC.

Методика эксперимента. В качестве исходных подложек использованы высокоомные (1000 Ом·см) пластины кремния n-типа проводимости с ориентацией поверхности вдоль (111). Структуры SiC/Si или Si/SiC/Si выращивали методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке VG Semicon V80. Толщина слоев SiC составляла около 100 нм в структуре SiC/Si или около 90 нм в структуре Si/SiC/Si. Такой выбор обеспечил приблизительно одинаковую толщину слоя SiC после формирования силицида с учетом расхода материала SiC слоя при синтезе силицида. Толщина верхнего слоя Si в структуре Si/SiC/Si составляла около 100 нм. После разделения структур на образцы наносили пленки Pt методом ионного распыления на установке RMC-Eiko IB-5. Процесс проводили при токе 6 мА, длительностью 20 минут в вакууме не хуже 33 Па, что обеспечило нанесение слоев платины толщиной около 23 нм. Наконец, для формирования силицидов платины проводили термообработку (ТО) в инертной среде (сухой N₂) в температурном интервале 350–500°C длительностью 10 минут.

Исследования морфологических и структурных характеристик сформированных контактов и границ разделов образцов проводилось на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Hitachi S-4800 при ускоряющем напряжении 10 кВ. Регистрация РЭМ микрофотографий выполнялась в режиме вторичных электронов.

Слоевое сопротивление было определено с помощью прибора ИУС-3. Величины удельного сопротивления ρ (Ом · см) пленок рассчитывались по формуле

$$\rho = R_s \cdot h, \quad (1)$$

где R_s – слоевое сопротивление, Ом/квадрат, h – толщина пленки, см.

Для измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) на всех образцах были сформированы мезоструктуры, как представлено на рисунке 1, с помощью фотолитографии и селективного травления в HF + HNO₃ в пропорции 1:5. Площадь сформированных контактов варьировалась от 0,006 см² до 0,01 см². На тыльной стороне образцов формировались омические контакты путем нанесения галлий-алюминиевой пасты. Измерения ВАХ проведено с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-1.



Рисунок 1 – Мезоструктуры образцов использованных для измерения ВАХ

Результаты и обсуждение. На рисунке 2 приведены РЭМ-микрофотографии структур Pt/SiC/Si и Pt/Si/SiC/Si, отожженных при 350°C и 500°C. В Si-подложке видны поры, формирование которых при высокотемпературном молекулярно-лучевом синтезе карбида кремния подробно исследовано в нашей работе [13]. Далее, хорошо различается трехслойная (а, б) или двухслойная (в, г) структура пленок, сформированных на Si-подложке. Первым слоем (считая от Si-подложки) является карбид кремния. Толщина этого слоя во всех случаях составляет около 83–90 нм. Вторым слоем на микрофотографиях (а, б) является слой кремния. Его толщина составляет ~83 нм после отжига при 350°C и ~65 нм после отжига при 500°C. Меньшая толщина слоя Si после отжига при 500°C связана, вероятно, с потреблением большего количества атомов кремния при формировании силицида платины. Наконец, верхний (более светлый) слой, в зависимости от типа исходной структуры и температуры отжига, имеет толщину от ~40 до ~60 нм.

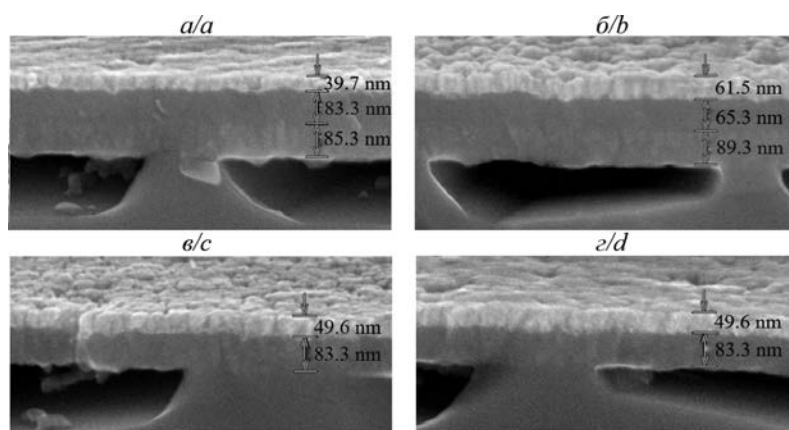


Рисунок 2 – Микрофотографии РЭМ: (а) структура типа Pt/Si/SiC/Si при отжиге 350°C; (б) структура типа Pt/Si/SiC/Si при отжиге 500°C; (в) структура типа Pt/SiC/Si при отжиге 350°C; (г) структура типа Pt/SiC/Si при отжиге 500°C

Факт, что верхний слой на всех образцах имеет более светлый контраст (рисунок 2), очевидно обусловлен содержанием тяжелых атомов (Pt) в составе слоя: атомы платины эффективнее рассеивают электроны и, следовательно, приводят к более светлому контрасту на микрофотографиях при регистрации РЭМ-изображений в режиме вторичных электронов. Необходимо отметить, что толщина верхнего слоя (40–60 нм) во всех случаях существенно превышает толщину исходной (после нанесения) пленки Pt (23 нм), поэтому логично предположить, что термообработка приводит к формированию силицидов платины. А именно, приток атомов кремния в слой платины приводит к химической реакции силицидообразования и тем самым увеличивает толщину верхнего слоя. Одновременно уменьшается толщина оставшегося (непрореагировавшего) слоя кремния (60–80 нм) (рисунок 2а, б) по сравнению с толщиной исходного (после нанесения) слоя Si (100 нм). Как это следует из анализа рисунка 2, толщина слоя силицидов платины существенно зависит от типа структуры и температуры ТО. С учетом различия ковалентных размеров атомов кремния и платины, а также молекулярной плотности силицидов, были проведены оценки толщин слоев Si и Pt, необходимых для формирования различных силицидов платины [9]. Из оценок следует, что ТО структур Pt/Si/SiC/Si приводит к формированию силицида платины, обогащенного металлом (Pt₂Si) при T = 350°C или моносилицида платины (PtSi) при T = 500°C, что хорошо коррелирует с известными литературными данными по пороговым температурам формирования силицидов платины [14]. Толщина оставшегося (непрореагировавшего) слоя Si пропорционально уменьшается с увеличением температуры с 350 до 500°C, что также указывает на различное количество кремния, инкорпорированного в состав силицидов.

Несколько отличается поведение морфологии слоев и процесса формирования силицида в случае непосредственного контакта слоев платины и карбида кремния (рисунок 2в, г). Термообработка образцов структур Pt/SiC/Si как при 350°C, так и при 500°C приводит к формированию поверхностного слоя силицида платины с толщиной несколько больше, чем ожидаемая для силицида Pt₂Si, но меньше, чем для моносилицида платины. Вероятно, этот результат можно объяснить захватом атомов углерода в силицидный слой, а также процессами сегрегации на границе раздела силицид/SiC (см. обсуждение ниже).

Установлено, что различия толщины, фазового состава и морфологии силицидов платины влияют на их электрофизические свойства (таблица 1, рисунок 3).

Таблица 1 – Среднее значение слоевого сопротивления образцов до ТО и после ТО при 350°C и 500°C в течение 10 минут

Термообработка	Структура	Слоевое сопротивление, Ом/квadrat
–	Pt/SiC/Si	196
	Pt/Si/SiC/Si	248
350°C	Pt ₂ Si/SiC/Si	98
	Pt ₂ Si/Si/SiC/Si	91
500°C	Pt ₂ Si/SiC/Si	80
	PtSi/Si/SiC/Si	38

Из таблицы 1 видно, что слои сопротивления пленок Pt, Pt₂Si и PtSi зависят от типа исходной структуры и режима последующей ТО. До проведения ТО слои сопротивление пленки Pt меняется в зависимости от структуры. Проведение ТО при 350°C приводит к снижению слои сопротивления у обоих типов структур. При этом значение слои сопротивления в обоих структурах практически одинаковы. После ТО при 500°C слои сопротивления начинают не совпадать друг с другом. В структуре PtSi/Si/SiC/Si слои сопротивления принимает значение вдвое меньше, чем слои сопротивления структуры Pt₂Si/SiC/Si.

Используя данные РЭМ (рисунок 2) и слои сопротивления (таблица 1), были рассчитаны удельные сопротивления образцов всех типов структур. Для образцов структур Pt/Si/SiC/Si после ТО при 350°C и 500°C удельное сопротивление пленок Pt₂Si и PtSi составило около 36 мкОм·см и 24 мкОм·см соответственно. Для образцов структур Pt/SiC/Si после ТО при 350°C и 500°C удельное сопротивление составило около 48 мкОм·см и 40 мкОм·см соответственно. Полученные значения удельного сопротивления образцов хорошо коррелируют с известным литературным данным для фаз Pt₂Si и PtSi [14].

На рисунке 3 представлены ВАХ исследованных структур. Видно, что ТО при 350°C приводит к уменьшению обратных токов до уровня 40 нА у всех типов структур. Однако, в случае структуры Pt/SiC/Si, дальнейшее увеличение температуры ТО до 500°C сопровождается увеличением тока утечки до 195 нА.

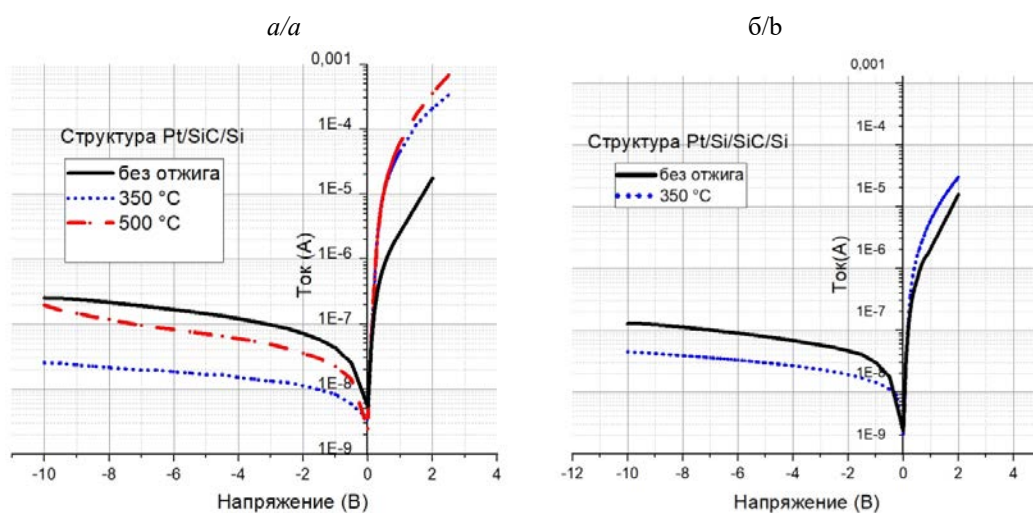


Рисунок 3 – Вольт-амперные характеристики структур металл-карбид кремния до и после ТО при 350°C и 500°C: а – структура типа Pt/SiC/Si; б – структура типа Pt/Si/SiC/Si

Параметры контактов Шоттки (фактор идеальности и высота барьера Шоттки) рассчитаны применяя следующую формулу:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right], \quad (2)$$

где I_0 – обратный ток, n – фактор идеальности, T – температура измерения.

Обратный ток насыщения выражается формулой:

$$I_0 = A^{**} S T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right), \quad (3)$$

где A^{**} – модифицированная постоянная Ричардсона, S – площадь контакта, ϕ_B – высота барьера.

Результаты сравнительного анализа высоты барьера Шоттки и фактора идеальности, сформированного на двух типах структур с использованием ТО и без нее, представлены в таблице 2.

Из анализа данных приведенных в таблице 2 следует, что в результате ТО при 350°C в обоих типах структур увеличивается высота барьера Шоттки, которая коррелирует с уменьшением тока утечек. Также наблюдается уменьшение фактора идеальности, что возможно связано с улучшением токопрохождения через границу раздела. В свою очередь ТО при 500°C приводит к уменьшению высоты барьера в структуре Pt/SiC/Si и как следствие увеличению то-

ков утечек.

Таблица 2 – Контактные свойства сформированных структур при различных режимах термообработки

Структура	Режим ТО, °С	Высота барьера, эВ	Фактор идеальности	Обратный ток, А ($V_R = 10$ В)
Pt/SiC/Si	–	0,75	2,88	$2,53 \cdot 10^{-7}$
Pt/Si/SiC/Si	–	0,76	2,92	$1,27 \cdot 10^{-7}$
Pt/SiC/Si	350	0,79	1,76	$2,54 \cdot 10^{-8}$
Pt/SiC/Si	500	0,78	1,92	$1,95 \cdot 10^{-7}$
Pt/Si/SiC/Si	350	0,77	2,12	$4,50 \cdot 10^{-8}$

Таким образом, процессы формирования омических и выпрямляющих контактов к слоям SiC сильно зависят от режимов ТО, что хорошо коррелирует и с данными других исследований [5], [9]. При анализе результатов исследования контактных характеристик и слоевого сопротивления сформированных структур (таблицы 1 и 2) необходимо учитывать возможные процессы захвата атомов углерода растущим слоем силицида, процессов сегрегации и кластерообразования при формировании силицидов на слоях SiC, а также отжига рекомбинационных центров при термообработке [15]. В частности, термообработка структур Pt/SiC приводит к формированию силицидов платины [10], при этом приток атомов кремния обеспечивается распадом молекул SiC. Однако, в этом процессе на границе раздела PtSi/SiC образуется неравновесная концентрация атомов углерода. Поскольку растворимость углерода в слоях Si и SiC является низкой, эти атомы углерода могут встраиваться в слой силицида платины или аккумулироваться на границе раздела силицид/SiC, что может оказывать негативное влияние на выпрямляющие свойства диода Шоттки. Диффузионная подвижность атомов углерода сильно зависит от температуры, поэтому отжиг при более низкой температуре (350°C) затрудняет процесс сегрегации и приводит к преимущественному захвату атомов углерода в слой силицида платины. Напротив, увеличение температуры отжига до 500°C обеспечивает большую диффузионную подвижность примесных атомов и, как следствие, более эффективное оттеснение атомов углерода на границу раздела силицид/SiC и формирование углеродных преципитатов.

В литературе сообщалось, что слой углеродных преципитатов между силицидом и SiC может приводить к деградации контактов при нагревании приборной структуры до определенной температуры [11]. В работе [12] для формирования силицидов платины использовали промежуточные тонкие слои Pt и Si, нанесенные между SiC и Pt. В этом случае предполагалось предотвращения сегрегации углерода на границе раздела силицид/SiC. Однако, вольт-амперные характеристики таких контактов оказались хуже ожидаемых из-за образования нестабильной фазы Pt₃Si и присутствия на поверхности и границе раздела островков оксида, устойчивых даже после высокотемпературного отжига при 750°C.

Согласно данным структурных исследований [10], отжиг образцов Pt/SiC/Si при 500°C приводит к образованию углеродных кластеров на границе раздела платина карбид кремний. При этом углерод может служить в качестве дополнительных донорных уровней, и тем самым увеличивать обратные токи. Таким образом, можно предположить, что ухудшение токов утечки в структурах Pt/SiC/Si при изменении режима ТО связано с образованием углеродных кластеров на границах раздела Pt/SiC/Si.

Заключение. Сформированы контакты Pt к структурам SiC/Si и Si/SiC/Si, обладающие выпрямляющими характеристиками, с коэффициентом идеальности, лежащем в интервале 2,92–1,76, высотой барьеров от 0,79 до 0,75 эВ.

По результатам исследования методом растровой электронной микроскопии и измерения слоевого сопротивления четырехзондовым методом установлено формирование PtSi толщиной 61,5 нм на структуре Si/SiC/Si после термообработки при 500°C, а также формирование Pt₂Si толщиной порядка 40 нм на структурах SiC/Si и Si/SiC/Si после термообработки при 350°C.

Установлено, что при температуре процесса термообработки 350°C на структурах SiC/Si и Si/SiC/Si происходит формирование Pt₂Si с удельным сопротивлением 48 мкОм·см и 36 мкОм·см соответственно, а также токами утечки порядка 40 нА. При дальнейшем увеличении температуры процесса термообработки до 500°C в структурах удельное сопротивление пленок Pt₂Si и PtSi снижается до 40 мкОм·см и 24 мкОм·см соответственно. При этом, изменение токов утечек в структуре Pt₂Si/SiC/Si при увеличении температуры термообработки свя-

зано с образованием углеродных кластеров на границах раздела силицид-карбид кремния.

Благодарности. Исследования выполнены в рамках проекта T22-030 Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (№ ГР 20221052), а также, частично, проекта государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций» (проект 3.1.2, № ГР 20212702).

Литература

1. Ferro, G. 3C-SiC Heteroepitaxial Growth on Silicon : The Quest for Holy Grail / G. Ferro // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. – 2015. – № 76. – P. 40–56.
2. Shenai, K. Optimum semiconductors for high-power electronics / K. Shenai, R. S. Scott, B. J. Baliga // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 1989. – Vol. 9, № 36. – P. 1811–1823.
3. Лобанок, М. В. Формирование эпитаксиальных слоев 3C-SiC на Si методом быстрой вакуумно-термической обработки / М. В. Лобанок, С. Л. Прокопьев, М. А. Моховиков [и др.] // *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. – 2022. – №2. – P. 79–86.
4. Kim, C. K. Pd- and Pt-SiC Schottky diodes for detection of H₂ and CH₄ at high temperature / C. K. Kim, J. H. Lee, S. M. Choi [et al.] // *Sensors and Actuators. B: Chemical*. – 2001. – Vol. 77, № 1–2. – P. 455–462.
5. Bourenane, K. Electrical properties of Schottky diode Pt/SiC and Pt/porous SiC performed on highly resistive p-type 6H-SiC / K. Bourenane, A. Keffous, G. Nezza // *Vacuum*. – 2007. – Vol. 81, № 5. – P. 663–668.
6. Chung, G. S. Electrical characterization of Au/3C-SiC/n-Si/Al Schottky junction / G. S. Chung, K. S. Kim, F. Yakuphanoglu // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2010. – Vol. 507. – P. 508–512.
7. Shenoy, P. Vertical Schottky Barrier Diodes on 3C-SiC Grown on Si / P. Shenoy, A. Moki, B. J. Baliga [et al.] // *IEEE International Electron Devices Meeting*. – San Francisco, 1994. – P. 411–414.
8. Fu, Y. A Low-Cost Compact SiC/Si Hybrid Switch Gate Driver Circuit for Commonly Used Triggering Patterns / Y. Fu, Z. Ma, H. Ren // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2022. – Vol. 37, № 5. – P. 5212–5223.
9. Агеев, О. А. Проблемы технологии контактов к карбиду кремния / О. А. Агеев. – Таганрог : Изд. ТРТУ, 2005. – 250 с.
10. Erikson, J. Nanoscale characterization of electrical transport at metal/3C-SiC interfaces / J. Erikson, F. Roccaforte, S. Reshanov [et al.] // *Nanoscale Research Letters*. – 2011. – Vol. 6. – P. 120.
11. Chou, T. C. Solid state reactions of SiC with Co, Ni, and Pt / T. C. Chou, A. Joshi, J. Wadsworth // *Journal of Materials Research*. – 1991. – Vol. 6. – P. 796–809.
12. Constantinidis, G. Improvements in Pt-based Schottky contacts to 3C-SiC / G. Constantinidis, B. Pecz, K. Tsagaraki [et al.] // *Materials Science and Engineering*. – 1999. – Vol. 61-62. – P. 406–410.
13. RaoJuluri, R. Impact of a SiGe interfacial layer on the growth of a SiC layer on Si with voids at the interface / R. RaoJuluri, P. I. Gaiduk, J. L. Hansen [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2018. – Vol. 662. – P. 103–109.
14. Мьюрарка, Ш. П. Силициды для СБИС / Ш. П. Мьюрарка ; пер. В. В. Баранов ; под ред. Ю. Д. Чистякова. М. : Мир, 1986. – 176 с.
15. Papanicolaou, N. A. Pt and PtSix Schottky contacts on n-type β -SiC / N. A. Papanicolaou, A. Cristou, M. Gipe // *Journal of Applied Physics*. – 1989. – Vol. 65. – P. 3526–3530.

¹Белорусский государственный университет

²ОАО «Интеграл»

Поступила в редакцию 30.09.2022

Электрические свойства твёрдых растворов $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$ ($\text{M} = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}$)

Г.С. РИМСКИЙ¹, А.В. РУТКАУСКАС², М.А. БУНЕВИЧ³

В работе представлены результаты исследования влияния катионного замещения никеля железом и кобальтом на электрические свойства твердых растворов $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$ ($\text{M} = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}$). В качестве объекта исследования выступали поликристаллы в виде прямоугольного параллелепипеда. Исследованы температурные зависимости удельного электросопротивления, магниторезистивного эффекта и эффекта Зеебека. Определены фундаментальные характеристики: величины удельного электросопротивления при 3К, остаточное электросопротивление, магниторезистивный эффект и температуры смены знака коэффициента Зеебека.

Ключевые слова: интерметаллиды, электропроводность, магниторезистивный эффект, эффект Зеебека.

The paper presents the results of studying the effect of cationic substitution of nickel with iron and cobalt on the electrical properties of $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$ ($\text{M} = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}$) solid solutions. The object of the study was polycrystals in the form of a rectangular parallelepiped. The temperature dependences of the electrical resistivity, the magnetoresistive effect, and the Seebeck effect are studied. The fundamental characteristics are determined: the values of electrical resistivity at 3K, the residual electrical resistance, magnetoresistive effect, and the temperature of the sign change of the Seebeck coefficient.

Keywords: intermetallics, electrical conductivity, magnetoresistive effect, Seebeck effect.

Введение. Поиск функциональных материалов, обладающих определенными магнитными и электрическими свойствами, является одной из наиболее актуальных задач современной физики конденсированного состояния. Ферромагнитные полугейслеровские сплавы проявляют широкий спектр физических свойств и представляют интерес для технологии микроэлектронной промышленности [1]. В частности, к таким материалам относится соединение NiMnSb , которое является исходным соединением исследуемой в данной работе системы $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$. Из-за наличия полуметаллического характера, структурного сходства с полупроводниками (подобие электронной и кристаллической структуры с структурой полупроводников типа цинковой обманки, а также сходство химических связей, связанное с наличием занятых неосновных d-состояний марганца) и относительно высокой температуры Кюри (~750 К), NiMnSb позиционируются как материал с потенциальным применением в спинтронике для инжекции поляризованных спинов в гетероструктурах [2]. В полугейслеровских сплавах именно количество валентных электронов отвечает за физические свойства соединений [3], а учитывая сложные магнитные взаимодействия между магнитными подрешетками системы, нелинейные зависимости магнитных взаимодействий в этой системе определяют научный интерес к подобным соединениям. Поэтому частичное замещение никеля другим переходным элементом может существенно изменить магнитные и транспортные свойства исходного соединения [4], [5]. Синтез новых материалов позволит изучать закономерности изменения механизмов проводимости и магнитных свойств в зависимости от концентрации и типа замещающего элемента. Ранее проведено исследование кристаллической структуры и магнитных характеристик твердых растворов систем $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$ ($\text{M} = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}$) [6], [7], [8]. Целью данной работы является изучение влияния переходных элементов ($\text{M} = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}$) в системе $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$ на транспортные свойства в широком диапазоне температур и магнитных полей.

Методика проведения эксперимента. Твердые растворы систем $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$ ($\text{M} = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}$) для эксперимента синтезированы методом твердофазных реакций в вакуумированных кварцевых ампулах. Чистота исходных порошков составляла для Mn (99,98 %), Ni, Ti, V и Cr (99,99 %), Sb (99,999 %). Синтез осуществлён при температуре 1020 К в течении 24 часов с последующей закалкой. Изучение кристаллической структуры и оценка фазового состава осуществлена методом дифракции рентгеновских лучей в $\text{Cu-K}\alpha$ – излучении ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$) при комнатной температуре. Удельное электросопротивление и термоЭДС измерены на образцах прямоугольной формы четырехконтактным методом на постоянном токе в интервале температур 4–900 К в магнитных полях до 6 Тл. При измерении магнитосопротивления ориен-

тация магнитного поля через образец была перпендикулярна электрическому току ($\mathbf{B} \perp \mathbf{I}$). Установка для измерений зависимостей коэффициента Зеебека (термо-ЭДС) прокалибрована по температурным зависимостям термо-ЭДС Fe и Ni относительно меди. Градиент величиной 10–15 градусов поддерживался во всем диапазоне температур измерения коэффициента Зеебека.

Результаты и их обсуждение. Ранее проведено исследование кристаллической структуры и магнитных характеристик твердых растворов систем $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$ ($\text{M} = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}$) с помощью рентгеновской дифракции, пондеромоторным и вибрационным методами [6], [7], [8]. Численные значения основных величин, описывающих кристаллическую структуру и магнитные характеристики, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения параметров a , расчетной $d_{\text{расч.}}$ и экспериментальной $d_{\text{эксп.}}$ плотности кристаллической ячейки, значения среднего магнитного момента при 80 К $\mu_{80\text{K}}$ и температур Кюри T_C в твердых растворах $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$ ($\text{M} = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}$)

x	a , нм	$d_{\text{расч.}}$, Г/см ³	$d_{\text{эксп.}}$, Г/см ³	$\mu_{80\text{K}}$, μ_B	T_C , К
NiMnSb					
0,00	0,592(6)	7,51	7,19	3,81	725
Ni_{1-x}Ti_xMnSb					
0,05	0,592(9)	7,48	7,16	3,77	702
0,10	0,593(2)	7,45	7,10	3,58	664
0,15	0,594(3)	7,39	7,11	3,28	631
0,20	0,595(5)	7,33	6,99	2,94	--
0,25	0,596(0)	7,30	6,99	2,76	--
Ni_{1-x}V_xMnSb					
0,05	0,593(0)	7,48	7,13	3,80	673
0,10	0,593(2)	7,46	7,19	3,71	611
0,15	0,593(8)	7,43	7,10	3,62	559
0,20	0,594(5)	7,39	7,08	3,47	--
Ni_{1-x}Cr_xMnSb					
0,05	0,592(9)	7,49	7,19	3,92	688
0,10	0,593(2)	7,47	7,10	3,89	659
0,15	0,593(6)	7,44	7,13	3,74	–

С целью дальнейшего изучения данных соединений проведено исследование температурных зависимостей удельного электросопротивления, магнитосопротивления и эффекта Зеебека.

Температурная зависимость удельного электросопротивления $\rho_{xx} = f(T)$ в соединении NiMnSb представлена на рисунке 1 и согласуется с литературными данными [9], [10].

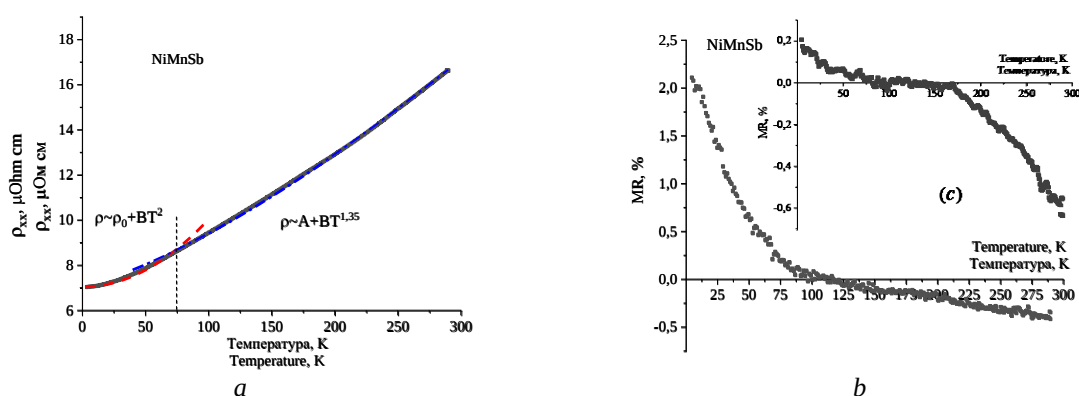


Рисунок 1 – Температурные зависимости удельного электросопротивления (a) и магнитосопротивления в поле 6 Тл (b) и 1 Тл (c) соединения NiMnSb

Исходное соединение NiMnSb при 4 К имеет удельное электросопротивление $\rho_{4\text{K}} \sim 7$ мкОм см. При аппроксимации температурных зависимостей удельного электросопротивления можно выделить 2 участка. Первый участок в интервале температур 4–70 К описывается квадратичной функцией $\rho = \rho_0 + B_1 T^2$ ($\rho_0 = 7,05$ мкОм·см, $B_1 = 36$ нОм·см/К²) и соответствует полуметаллическому состоянию. Второй участок в области 70–300 К описывается функцией $\rho = A_2 + B_2 T^{1.35}$ ($A_2 =$

$= 7,15 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$, $B_2 = 45,2 \text{ нОм} \cdot \text{см} / \text{K}^{1,35}$), что скорее всего связано со спиновым беспорядком выше 70 К и соответствует состоянию нормального ферромагнетика. Следует отметить, что у других авторов имеется разброс значений степени температуры $1,35 < \alpha < 1,65$ [9], [10], [11].

Результаты эксперимента по изучению магниторезистивных свойств NiMnSb $MR = f(T)$ в магнитных полях 1 и 6 Тл представлены на рисунке 1. Выявлена зависимость изменения величины и знака поперечного магнитосопротивления ($MR = (\rho_B - \rho_0) / \rho_0 \cdot 100 \%$) от величины индукции магнитного поля. Установлено, что в магнитном поле с индукцией $B = 1$ и 6 Тл магниторезистивный эффект NiMnSb отрицателен в интервале температур 4–100 К, после чего становится положительным. В интервале температур 4–100 К магнитосопротивление принимает положительные значения, а выше 100 К становится отрицательным. Положительное значение $MR = f(T)$ наблюдается в области температур, где зависимость $\rho(T)$ описывается квадратичной зависимостью и имеет полуметаллический тип проводимости. Выявлено, что с ростом магнитного поля магниторезистивный эффект смещается в сторону положительных значений. Значения MR , полученные для NiMnSb в поле 6 Тл, согласуются с ранее полученными результатами [10], [11].

Температурные зависимости удельного электросопротивления твердых растворов систем $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$ ($M = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}$) представлены на рисунке 2.

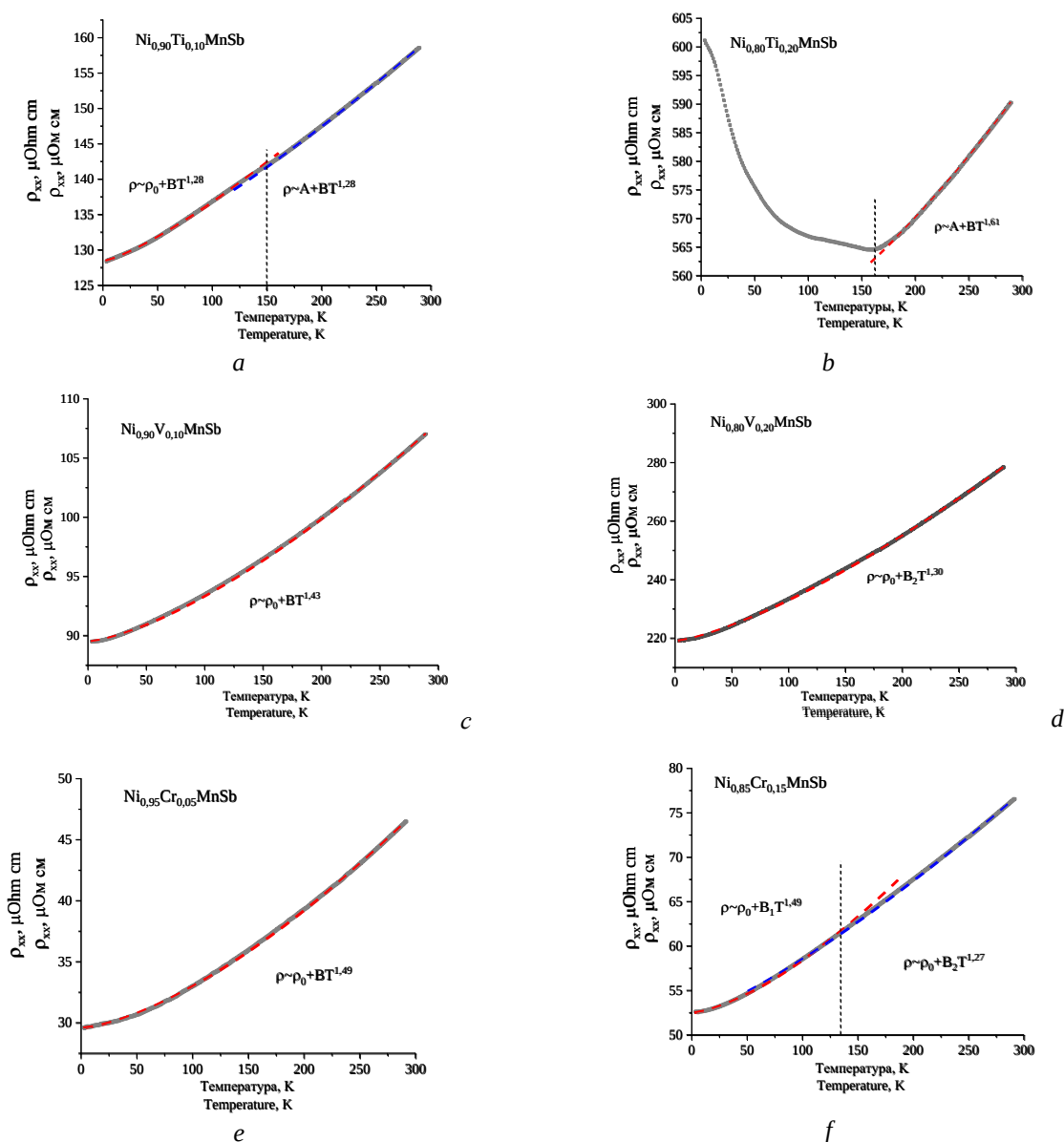


Рисунок 2 – Температурные зависимости удельного электросопротивления твердых растворов систем $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$ ($M = \text{Ti}$ ($x = 0,10$ (a) и $x = 0,20$ (b)), V ($x = 0,10$ (c) и $x = 0,20$ (d)), Cr ($x = 0,05$ (e) и $x = 0,15$ (f)))

Температурная зависимость удельного электросопротивления твердых растворов системы $\text{Ni}_{1-x}\text{Ti}_x\text{MnSb}$ при $x = 0,10$ описывается двумя функциями: в интервале температур $3 \text{ K} \leq T \leq 150 \text{ K}$ $\rho_1 = \rho_0 + B_1 T^{1,28}$ и в интервале температур $150 \text{ K} \leq T \leq 300 \text{ K}$ $\rho_2 = \rho_0 + B_2 T^{1,28}$. В районе 150 К наблюдается аномалия в виде небольшого перегиба (рисунок 2а). Увеличение концентрации титана до $x = 0,20$ в системе $\text{Ni}_{1-x}\text{Ti}_x\text{MnSb}$ приводит к изменению температурной зависимости удельного электросопротивления (рисунок 2б). Зависимость $\rho(T)$ в интервале температур $3 \text{ K} \leq T \leq 160 \text{ K}$ имеет полупроводниковой характер, а выше 160 К становится металлической и описывается функцией: $\rho = A + B_1 T^{1,16}$ и возможно связана с температурой кристаллического и магнитного фазового перехода. В твердых растворах $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$ ($\text{M} = \text{V}, \text{Cr}$) удельное электросопротивление имеет металлическую зависимость (рисунок 2 с–f). Обнаружено, что увеличение замещения никеля катионами Ti, V и Cr приводит к увеличению удельного электросопротивления и уменьшению остаточного электросопротивления, что обусловлено увеличением дефектности кристаллической структуры. Полученные значения удельного электросопротивления при 3 К и остаточного электросопротивления ($RRR = \rho_{300\text{K}}/\rho_{3\text{K}}$) всех исследованных твердых растворов представлены в таблице 2. Установлено, что замещение никеля титаном и ванадием приводит к заметному уменьшению остаточного электросопротивления, чем замещение хромом, что может быть связано с различием в ионных радиусах никеля и замещающих металлов.

Таблица 2 – Численные значения удельного электросопротивления при 3 К ($\rho_{3\text{K}}$), остаточного электросопротивления (RRR) и температуры смены знака коэффициента Зеебека ($T_{\text{trans.}}$) в твердых растворах систем $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$ ($\text{M} = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}$)

Состав	$\rho_{3\text{K}}, 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$	RRR	$T_{\text{trans.}}, \text{ K}$
NiMnSb	7,05	2,45	220
$\text{Ni}_{0,90}\text{Ti}_{0,10}\text{NiSb}$	128,4	1,25	337
$\text{Ni}_{0,80}\text{Ti}_{0,20}\text{NiSb}$	601,2	–	444
$\text{Ni}_{0,90}\text{V}_{0,10}\text{NiSb}$	86,7	1,25	365
$\text{Ni}_{0,80}\text{V}_{0,20}\text{NiSb}$	214,9	1,30	465
$\text{Ni}_{0,95}\text{Cr}_{0,05}\text{NiSb}$	30,3	1,60	401
$\text{Ni}_{0,90}\text{Cr}_{0,10}\text{NiSb}$	41,4	1,51	450
$\text{Ni}_{0,85}\text{Cr}_{0,15}\text{NiSb}$	51,4	1,49	503

Температурные зависимости магнитосопротивления в твердых растворах систем $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$ ($\text{M} = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}$) в магнитных полях 1 и 6 Тл представлены на рисунке 3а,б,с.

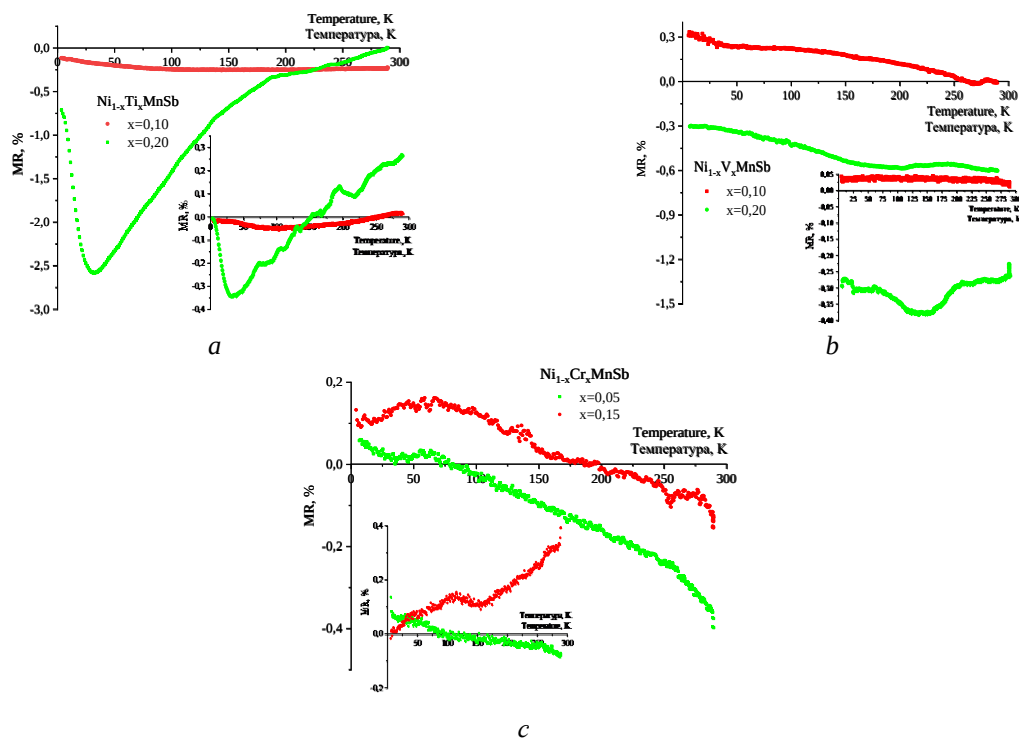


Рисунок 3 – Температурные зависимости магниторезистивного эффекта твердых растворов систем $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$ ($\text{M} = \text{Ti}$ (а), V (б), Cr (с)) в магнитном поле 6 Тл. На вставках представлены температурные зависимости магниторезистивного эффекта в поле 1 Тл.

Усиление отрицательного эффекта магнитосопротивления в твердых растворах $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$ ($\text{M} = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}$) с увеличением магнитного поля и концентрации замещающего элемента вызвано появлением магнитного порядка в этой системе. В твердых растворах $\text{Ni}_{1-x}\text{Ti}_x\text{MnSb}$ максимальное значение отрицательного магнитосопротивления обнаружено при $T = 50 \text{ K}$, а смена знака магнитосопротивления для $x = 0,2$ происходит при 160 K , там, где меняется тип проводимости. В $\text{Ni}_{1-x}\text{Cr}_x\text{MnSb}$ увеличение концентрации приводит к увеличению температуры при которой наблюдается смена знака магнитосопротивления от 70 K ($x = 0,05$) до 170 K ($x = 0,15$). Причем увеличение магнитного поля на эту температуру для $x = 0,05$ не влияет, а для $x = 0,15$ приводит к появлению отрицательного магнитосопротивления при $T > 170 \text{ K}$. В $\text{Ni}_{1-x}\text{V}_x\text{MnSb}$ увеличение концентрации приводит к смене знака магнитосопротивления на отрицательный во всей области температур. Магнитное поле, оказывая упорядочивающее влияние на магнитные моменты ионов марганца, приводит к снижению магнитного вклада в рассеяние. При увеличении концентрации замещающих катионов происходит переход от полуметаллического характера проводимости в NiMnSb к почти металлическому, что выражается в малой величине значения магниторезистивного эффекта твердых растворах систем $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$ ($\text{M} = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}$).

Температурные зависимости коэффициента Зеебека в твердых растворах систем $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$ ($\text{M} = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}$) представлены на рисунке 4.

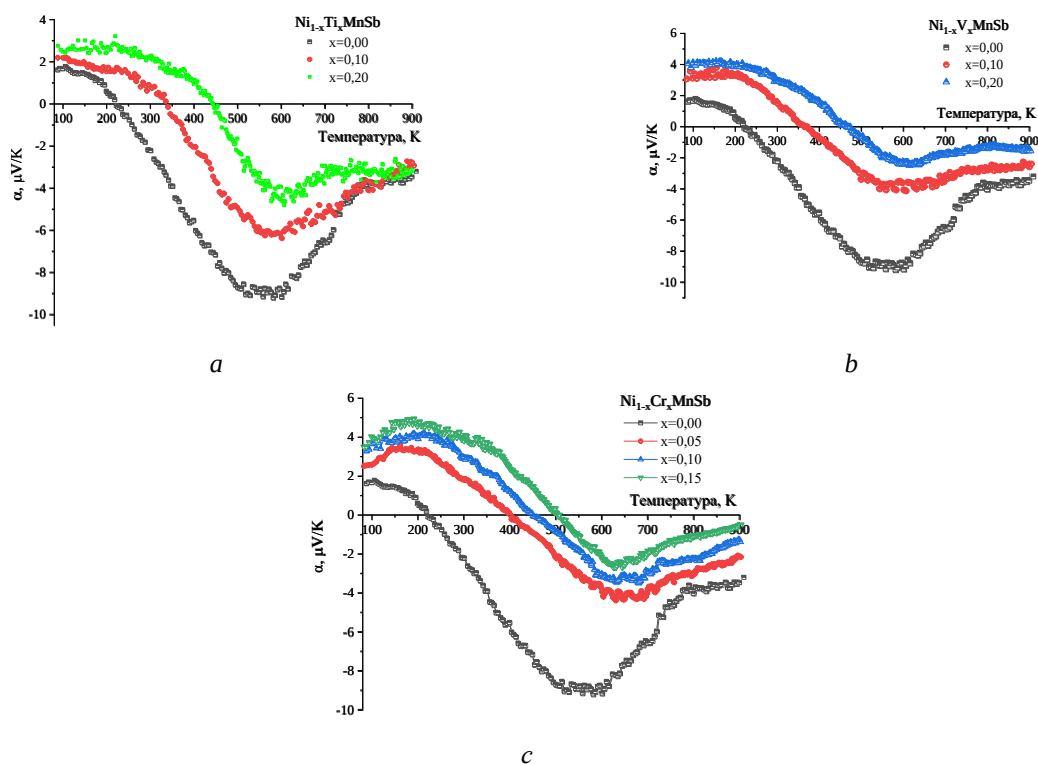


Рисунок 4 – Температурные зависимости коэффициента Зеебека в твердых растворах $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$ ($\text{M} = \text{Ti}$ (a), V (b), Cr (c))

В исходном соединении NiMnSb коэффициент Зеебека (α) в абсолютном значении находится в относительно небольшой области значений, что свидетельствует о скомпенсированной двух типов носителей заряда. Положительное значение коэффициента α в интервале температур $77 \text{ K} \leq T \leq 220 \text{ K}$ указывает на то, что доминирующим носителем заряда являются дырки, тогда как выше 220 K отрицательный знак коэффициента α свидетельствует, что носителями заряда являются электроны.

Замещение никеля титаном, ванадием и хромом показывает влияние дырочного допирования на транспортные свойства системы $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$ ($\text{M} = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}$) в интервале температур $100\text{--}900 \text{ K}$. По мере увеличения катионного замещения обнаружено смещение температуры перехода из отрицательных в положительные значения термо-ЭДС от 220 K для $x = 0,00$ до 444 K для $x = 0,25$ для системы с Ni ; до 465 K для $x = 0,20$ для системы с V и до 503 K для $x = 0,15$ для системы с хромом [12].

Смена знака коэффициента α в твердых растворах $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$ ($\text{M} = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}$) с ростом температуры может быть связана либо с ростом термически возбужденных электронов, либо с увеличением подвижности электронов. Наблюдающийся рост α с концентрацией замещающего элемента (Ti, V и Cr) в системе $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$ свидетельствует о том, что эти элементы выступают в качестве акцепторной примеси. Ионы Ti, V и Cr препятствуют проводимости n-типа и стимулируют проводимость p-типа. Установленные значения температуры смены знака коэффициента Зеебека всех исследованных твердых растворов представлены в таблице 1.

Заключение. Исходное соединение NiMnSb является полуметаллическим ферромагнетиком. Установлено, что твердые растворы систем $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$ при замещении никеля Ti, V и Cr , демонстрируют температурные зависимости удельного электросопротивления характерные металлическому типу проводимости. Интересным является то, что дырочное допирование в случае титана и ванадия меняет знак магнитосопротивления на отрицательный. Только в случае с хромом магнитосопротивление остается положительным в низкотемпературной области. Обнаружено, что замещение катионов никеля катионами титана, ванадия и хрома увеличивает температуру смены коэффициента Зеебека.

Благодарности. Работа выполнена в рамках совместного гранта для молодых ученых «БРФФИ-РФФИ М-2021» (грант № T21PM-029 и № 20-52-04003 Бел_мол_a).

Литература

1. Hirohata, A. Review on spintronics : Principles and device applications / A. Hirohata, K. Yamada, Y. Nakatani [et al.] // J. Magn. Magn. Mater. – 2020. – Vol. 509. – Article ID : 166711.
2. Schmidt, G. Spin injection into semiconductors, physics and experiments / G. Schmidt, L. W. Molenkamp // Semiconductor Science and Technology. – 2002. – Vol. 17, № 4. – P. 310–321.
3. Graf, T. Simple rules for the understanding of Heusler compounds / T. Graf, C. Felser, S. S. P. Parkin // Progress in Solid State Chemistry. – 2011. – Vol. 39, № 1. – P. 1–50.
4. Ren, S. K. Magnetic behavior of half-Heusler alloy $\text{Cu}_x\text{Ni}_{1-x}\text{MnSb}$ / S. K. Ren, W. Q. Zou, J. Gao [et al.] // J. Magn. Magn. Mater. – 2005. – Vol. 288. – P. 276–281.
5. Ren, S. K. Effects of substitution of Zn for Ni in NiMnSb alloys / S. K. Ren, J. Gao, X. L. Jiang, [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2004. – Vol. 384, № 1-2. – P. 22–24.
6. Римский, Г. С. Кристаллическая структура и магнитные характеристики твердых растворов $\text{Ni}_{1-x}\text{Cr}_x\text{MnSb}$ / Г. С. Римский, К. И. Янушкевич, А. В. Руткаускас // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-техн. навук. – 2021. – Т. 66, № 6. – С. 263–269.
7. Римский, Г. С. Особенности кристаллической структуры и магнитных характеристик твердых растворов $\text{Ni}_{1-x}\text{Ti}_x\text{MnSb}$ ($0,00 \leq x \leq 0,50$) / Г. С. Римский, К. И. Янушкевич, А. В. Руткаускас // Вестн. фонда фундамент. исследований. – 2021. – Т. 95, № 1. – С. 34–41.
8. Римский, Г. С. Влияние катионного замещения на кристаллическую структуру и магнитные характеристики твердых растворов $\text{MnNi}_{1-x}\text{V}_x\text{Sb}$ / Г. С. Римский, К. И. Янушкевич // Весн. Брэсц. ун-та. Сер. 4, Фізика. Матэматыка. – 2021. – № 1. – С. 34–40.
9. Gardelis, S. Synthesis and physical properties of arc melted NiMnSb / S. Gardelis, J. Androulakis, P. Migiakis [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2004. – Vol. 95, № 2. – P. 8063–8068.
10. Hordequin, C. On the cross-over from half-metal to normal ferromagnet in NiMnSb / C. Hordequin, D. Ristoiu, L. Ranno, J. Pierre // The European Physical Journal B. – 2000. – Vol. 16, № 2. – P. 287–293.
11. Borca, C. N. Evidence for temperature dependent moments ordering in ferromagnetic $\text{NiMnSb}(100)$ / C. N. Borca, T. Komesu, H.-K. Jeong [et al.] // Physical Review B. – 2001. – Vol. 64, № 5. – Article ID : 052409.
12. Vedernikov, M. V. The thermoelectric powers of transition metals at high temperature / M. V. Vedernikov // Advances in Physics. – 1969. – Vol. 18, № 74. – P. 337–370.

¹Научно-практический центр
НАН Беларуси по материаловедению

²Объединенный институт
ядерных исследований

³Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

Поступила в редакцию 13.10.2022

Краткие сообщения

УДК 57.072.2:528.92:551.781.3(476.2)

Картографирование отложений сумской свиты в Гомельской области

А.С. СОКОЛОВ

В статье представлены характеристики палеоценовых отложений сумской свиты на территории Гомельской области – мощность, глубина залегания кровли, литологический состав. Составлены карты изолиний, отражающие пространственную дифференциацию распространения отложений на территории области и их характеристик.

Ключевые слова: отложения палеоцена, геологические карты, литология.

The article presents the characteristics of Sumy Formation Paleocene deposits on the territory of Gomel region – thickness, depth of the roof, lithological composition. Contour maps reflecting the spatial differentiation of the distribution of deposits in the region and their characteristics have been created.

Keywords: Paleocene deposits, geological maps, lithology.

Сумская свита является единственной свитой, отложения которой представлены в палеоценовом отделе палеогеновой системы Беларуси. Согласно общей стратиграфической шкале, они соответствуют низу зеландского – верху танетского яруса. Картографирование отложений кайнозойской эратемы является сегодня актуальной научной задачей, включённой в программу ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 гг. [1].

Нами составлены карты глубины залегания кровли отложений (рисунок 1) и их мощности (рисунок 2) отложений сумской свиты на территории Гомельской области. Карты составлялись способом изолиний с применением метода интерполяции кригинга с использованием процедур фильтрации и сплайнового сглаживания. Информационной основой стала база данных скважин ПО «Белгеология», в которой имеется информация о более 10 тыс. скважин на территории области, из которых в 393 вскрыты отложения сумской свиты.

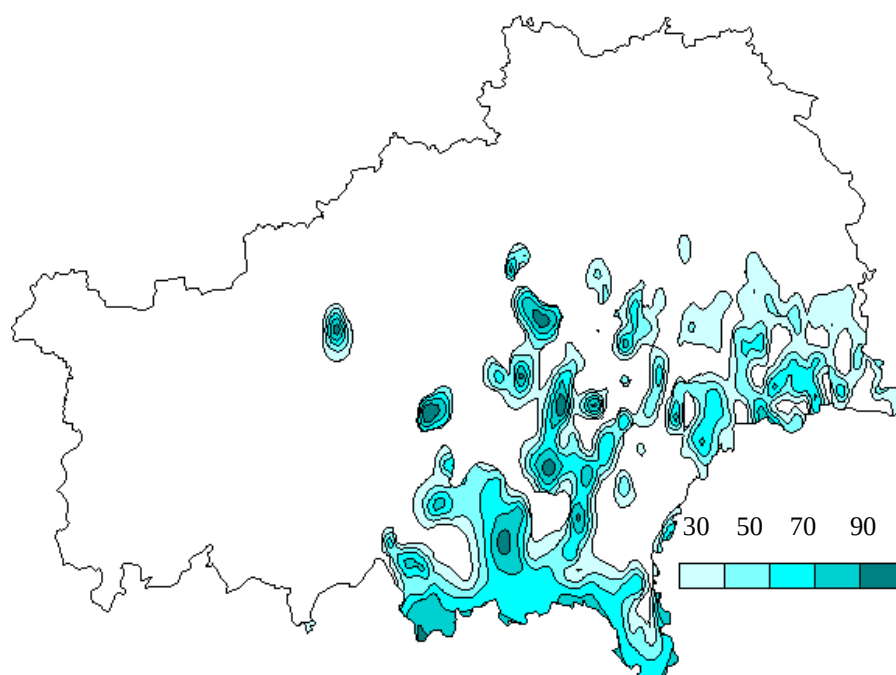


Рисунок 1 – Глубина залегания кровли отложений сумской свиты в Гомельской области, м

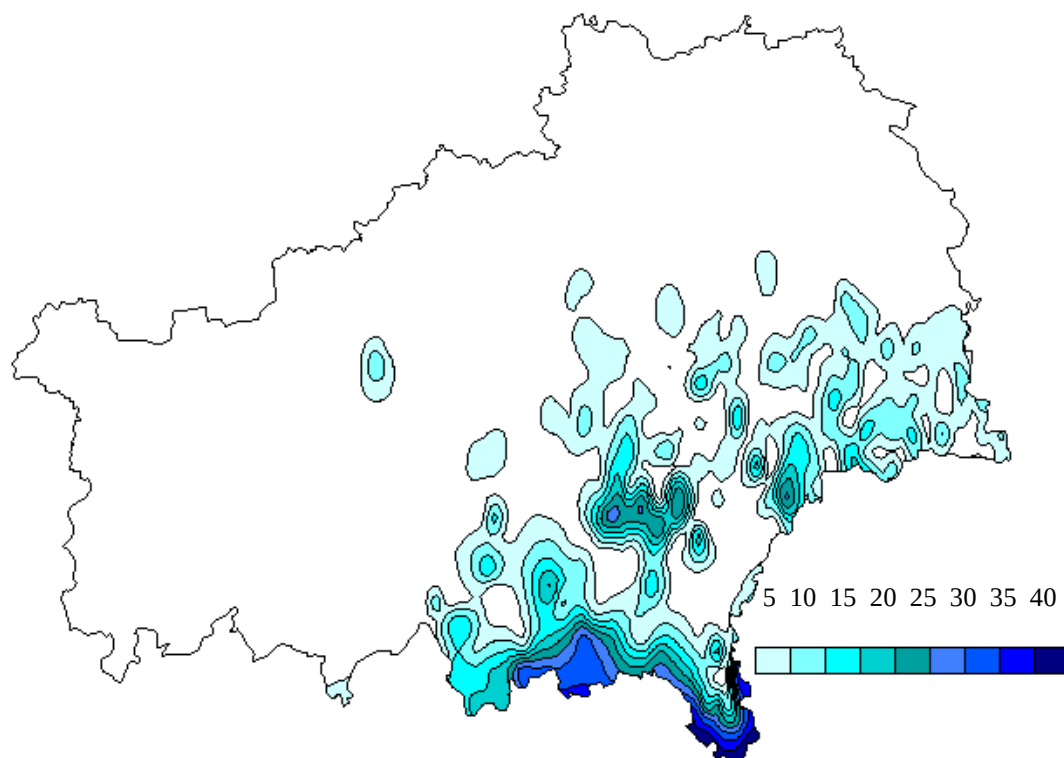


Рисунок 2 – Мощность отложений сумской свиты в Гомельской области, м

Результаты показывают, что отложения сумской свиты мощностью более 1 метра представлены на около 25 % территории Гомельской области. Из них 28 % имеют мощность более 10 м, 11 % – более 20 м, 5 % – более 30 м. У около 43 % отложений кровля залегает на глубине менее 30 м, 57 % – на глубине более 30 м, 32 % – более 50 м, 10 % – более 70 м. Средняя мощность отложений составляет 8,3 м, средняя глубина залегания кровли 45 м, наибольшая отмеченная глубина кровли 144 м, наибольшая отмеченная мощность отложений – 45,1 м.

Литология отложений примерно 18 % площади их распространения представлена песком с глиной, 14 % – алевритом глауконитово-кварцевым с песком, глиной, песчаником, опокой, 11 % – глиной, 10 % – песком глауконитово-кварцевым с песчаником, глиной, алевритом, изредка опокой, 6 % – песком, по 4 % – алевритом, алевролитом и глиной с песчаником (удельные площади подсчитывались с помощью полигонов Вороного). Очень редко встречаются мергель, мел, желваки фосфоритов.

Литература

1. Государственная программа «Охрана окружающей среды и устойчивое использование природных ресурсов» на 2021–2025 годы [Электронный ресурс] : утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь, 19 февр. 2022 г., № 99 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа : <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100099>. – Дата доступа : 21.03.2022.

Персоналии

УДК 512.5:929*М.В.Селькин

Михаил Васильевич Селькин (к 75-летию юбилею)

А.Н. Скиба¹, В.С. Монахов¹, А.А. Махнёв², В.Г. Сафонов³, А.Ф. Васильев¹,
С.П. Жогаль¹, Р.В. Бородич¹

30 августа 2022 г. исполнилось 75 лет профессору кафедры фундаментальной и прикладной математики, доктору физико-математических наук Селькину Михаилу Васильевичу.

Ключевые слова: М.В. Селькин, теории классов групп, классы Шунка.

August 30, 2022 marked the 75th anniversary of the professor of the Department of Fundamental and Applied Mathematics, Doctor of Physical and Mathematical Sciences Selkin Mikhail Vasilievich.

Ключевые слова: M.V. Selkin, theories of group classes, Shunk classes.

Михаил Васильевич Селькин родился в г. Ветке Гомельской области в семье рабочего. В 1965 г. окончил школу с золотой медалью и в этом же году поступил на физико-математический факультет Гомельского государственного педагогического института им. В.П. Чкалова, который в 1969 г. был преобразован в Гомельский государственный университет.

Преподаватели университета вызывали восхищение студента Селькина своим самоотверженным отношением к науке и образованию, интеллигентностью и чрезвычайным чувством уважения как к коллегам, так и к студентам. Это оказало серьезное влияние на формирование личности М.В. Селькина как интеллигентного, высокообразованного и высоконравственного человека, дало возможность стать прекрасным преподавателем, педагогом, целеустремленным исследователем, широкоизвестным ученым, высококвалифицированным руководителем.

В 1969 г. М.В. Селькин окончил с отличием механико-математический факультет университета и по рекомендации учёного совета Гомельского госуниверситета поступил в аспирантуру по специальности алгебра и теория чисел. Его научным руководителем стал Леонид Александрович Шеметков, который в этом же году в возрасте 32 лет защитил докторскую диссертацию. Л.А. Шеметков – талантливый учёный, в будущем – член-корреспондент НАН Беларуси, ученик и продолжатель деятельности академика С.А. Чунихина.

С 1971 г. по 1972 г. Михаил Васильевич служил в рядах Советской армии. После окончания в 1973 г. аспирантуры работал в Гомельском государственном университете: с 1973 г. – старшим преподавателем кафедры алгебры и геометрии, с 1978 г. – доцентом этой же кафедры, с 1979 г. – заместителем декана математического факультета, с 1987 г. – деканом математического факультета, в 1990–2000 гг. – первым проректором, проректором по учебной работе, в 2000–2003 гг. – ректором Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины, с октября 2003 г. – профессором кафедры высшей математики (ныне кафедра фундаментальной и прикладной математики).

Диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук «Исследование F-абнормальных максимальных подгрупп конечных групп» М.В. Селькин защитил в 1977 г. в Институте математики Академии наук Украинской ССР, докторскую диссертацию «Максимальные подгруппы в теории классов конечных групп» по специальности 01.01.06 – математическая логика, алгебра и теория чисел защитил 19 мая 1998 г. в Уральском отделении Института математики и механики Российской академии наук (г. Екатеринбург).

Селькин М.В. активно занимается научными исследованиями в одной из интенсивно развивающихся областей современной алгебры – теории классов групп. Начиная с 1975 г., принимал участие в работе Всесоюзных и Республиканских симпозиумов, конференций и коллоквиумов по алгебре, выступал с докладами на конференции математиков в ГДР в 1981 г. и Международном математическом конгрессе в Японии в 1990 г. В 1981 и в 1993 гг. проходил научную

стажировку в Германии, принимал участие в совещаниях по вопросам высшей школы во Франции (1994 г.), в Англии (1994 г.), в Германии (1995, 1996 гг.). Им опубликовано более 160 работ, в том числе монографии «Максимальные подгруппы в теории классов конечных групп» (Минск, издательство «Беларуская навука», 1997), «Подгрупповые функторы и классы конечных групп» (Минск, издательство «Беларуская навука», 2003, совместно с С.Ф. Каморниковым).

Научное творчество М.В. Селькина тесно связано с изучением свойств и приложений подгрупп фраттиниена типа. Данное направление стартует с классической работы Фраттини 1885 г., в которой впервые были изучены свойства пересечения максимальных подгрупп конечной группы, подгруппы Фраттини в современной терминологии. Дальнейшему изучению свойств подгруппы Фраттини и ее обобщений были посвящены работы (до выхода основополагающих работ М.В. Селькина) многих математиков: В. Гашюца, Бетчелла, В. Дескинса, Д. Бейдлемана, Г. Смита, Л.А. Шеметкова, В.А. Ведерникова, В.В. Шлыка, Л.И. Шидова, А. Баллестера-Болинше, Л. Эскверро, Н. Мукереджи и др. Михаилом Васильевичем Селькиным на основе введенного им понятия подгруппового m -функтора и теории классов Шунка был разработан наиболее общий подход исследования обобщений подгрупп Фраттини. Предложенный им метод позволяет с единой точки посмотреть на конкретные результаты многих авторов, включить их в единую схему исследований, получить в качестве следствий не только известные, но и новые ранее неизвестные. Отметим, что предложенный им функторный подход имеет универсальный характер, успешно может масштабироваться и использоваться при изучении других алгебраических систем.

Суммируя основные научные достижения, представленные в статьях и монографиях М.В. Селькина, отметим, что их значение заключается в том, что им впервые в математике:

- разработана и применена теория подгрупповых функторов для изучения свойств подгрупп фраттиниена типа;
- изучены свойства X -абнормальных максимальных подгрупп и их пересечений для классов Шунка;
- установлено поведение F -достижимых подгрупп в обобщенно фраттининовых расширениях групп;
- описано строение нормальных подгрупп, имеющих заданные пересечения с максимальными подгруппами групп;
- изучены свойства покрытия максимальных подалгебр мультиколец и на этой основе описано строение пересечения F -абнормальных максимальных подалгебр мультиколец.

Результаты исследований докладывались на алгебраических семинарах Московского, Новосибирского, Екатеринбургского и Киевского университетов и на многих белорусских, всесоюзных и международных математических конференциях и, в частности, на Международном математическом конгрессе в Японии (1990 г.). М.В. Селькин входит в программные комитеты многих Международных конференций по теории групп.

Полученные М.В. Селькиным результаты получили широкое признание, что нашло отражение в ряде известных монографий и, в частности, в монографии Л.А. Шеметкова «Формации конечных групп» (1978), монографии известных испанских математиков А. Баллестера-Болинше и Л. Эскверро «Classes of Finite Group» (2006) и в монографии известного китайского математика Го Веньбиня «Theory for Canonical Classes of Finite Groups» (2015).

Научные достижения Михаила Васильевича высоко оценены в Республике Беларусь. Он включен в список «Выдающиеся математики Беларуси» на портале <https://obm.bsu.by/>.

М.В. Селькиным много внимания и энергии уделяется подготовке кадров и научно-организаторской работе. Под его руководством были защищены диссертации на соискание учёных степеней кандидатов наук (Р.В. и Е.Н. Бородичи), при его непосредственном научном консультировании – докторские диссертации (А.М. Гальмак и Ю.И. Кулаженко). Михаил Васильевич с 1995 г. по настоящее время является членом совета по защите кандидатских и докторских диссертаций. Работая в качестве заместителя главного редактора научного и производственно-практического журнала «Известия Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины», М.В. Селькин активно способствовал продвижению журнала и включению его в перечень ВАК Республики Беларусь по двенадцати научным направлениям.

Работая в должностях декана математического факультета, первого проректора и ректора университета, Михаил Васильевич постоянно совершенствовал учебно-воспитательный процесс в университете. При его активном участии открыты новые специальности и специализации, пе-

реработаны учебные планы и программы, установлены тесные научно-учебные международные связи с университетами Российской Федерации, Китайской Народной Республики, Франции, Германии, Великобритании, Испании, открыты новые учебные и научные подразделения при университете, постоянно осуществлялся поиск новых форм обучения, обновлялась и пополнялась материально-техническая база, разработаны методические рекомендации по управлению качеством подготовки специалистов, которые и в настоящее время востребованы в учебно-методической работе и воспитательном процессе университета. Десятки студентов университета обучались в Москве, благодаря Российско-Белорусскому проекту «Университет интеграции».

При непосредственном участии Михаила Васильевича был разработан и внедрен проект «Франко-Белорусский Институт управления», благодаря которому сотни студентов университета смогли получить дополнительное европейское образование в области экономики и французские государственные дипломы. Университет участвовал в этом европейском проекте с университетами Франции, Германии и Англии, в результате чего в университете была разработана и введена в действие локальная компьютерная сеть управления университетом с оснащением необходимым количеством современных компьютеров и технологическим оборудованием, многие студенты и преподаватели прошли многодневные стажировки в указанных странах.

Каждый предыдущий ректор университета после себя оставлял память не только в учебном, научном и культурно-воспитательном процессах, но и в построенных при его руководстве зданиях, сооружениях. Во время ректорства М.В. Селькина был построен прекрасный спортивный комплекс – учебный корпус № 8.

Михаил Васильевич неоднократно поощрялся Министерством образования Республики Беларусь, награждён знаком «Выдатнік адукацыі Рэспублікі Беларусь», в 2021 г. – Почетной грамотой академии наук НАН Беларуси. В 1997 г. ему присвоено Почётное звание «Заслуженный работник образования Республики Беларусь». Избирался членом Совета Республики Национального Собрания Республики Беларусь второго созыва, был членом постоянной комиссии Совета Республики по законодательству и государственному строительству (2000–2004 гг.). Награждён Почётными грамотами Национального Собрания Республики Беларусь (2002, 2004 гг.). Отмечен медалью Патриарха Московского и Всея Руси Алексия II, избран Почётным профессором Гомельского госуниверситета им. Ф. Скорины.

Среди увлечений Михаила Васильевича – футбол, которым он всегда увлекался. Начиная со студенческой секции, он на протяжении полувека с азартом и целеустремлённостью выходил на площадку, мотивируя своим примером сотрудников и студентов, объединяя вузы в рамках товарищеских встреч, вдохновляя молодёжь в рамках турниров между командами преподавателей и студентов.

Следует отметить, что и сын Михаила Васильевича Вадим Михайлович, окончив в 1992 г. математический факультет Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины с отличием, связал свою судьбу с родным вузом, пройдя, как и отец, важные ступени к научным вершинам, защитив в 1996 г. кандидатскую диссертацию, а в 2012 г. и докторскую диссертацию, став одним из самых молодых докторов физико-математических наук в университете. В настоящее время В.М. Селькин возглавляет кафедру алгебры и геометрии, активно продолжая исследования в области теории формаций.

Михаил Васильевич Селькин пользуется авторитетом и признанием коллег не только за научные достижения. Благожелательное и уважительное отношение к любому человеку, будь то студент или доктор наук, в сочетании с принципиальностью и требовательностью снискали ему любовь и уважение окружающих его людей.

Коллектив Гомельского государственного университета, ученики и коллеги других вузов и научных центров Республики Беларусь, Российской Федерации поздравляют Михаила Васильевича с юбилеем и желают новых творческих свершений, крепкого здоровья и благополучия ему и его близким.

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения РАН

³Белорусский государственный университет

Технический редактор: *О.Г. Шляхтова*. Корректоры: *В.А. Бобрик, И.А. Хорсун*

Подписано в печать 01.12.2022. Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 16,50. Уч.-изд. л. 14,37. Тираж 100 экз. Заказ № 621.
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.