

ИЗВЕСТИЯ

Гомельского государственного университета
имени Ф. Скорины

№ 3 (144)

Естественные науки

Гомельский государственный университет
имени Ф. Скорины

ИЗВЕСТИЯ

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

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Члены редакционной коллегии:

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

Члены редакционной коллегии по естественным наукам:

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

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

Francisk Skorina Gomel State University

PROCEEDINGS

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

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

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

EDITORIAL BOARD

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

Members of editorial board:

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

Members of editorial board for the natural sciences

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

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

© Учреждение образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины», 2024
© Educational Establishment «Francisk Skorina Gomel State
University», 2024

ИЗВЕСТИЯ

Гомельского государственного университета
имени Ф. Скорины

НАУЧНЫЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с 1999 г.
Выходит 6 раз в год

• 2024, № 3 (144) •

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ:

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

СОДЕРЖАНИЕ

Биология

Гончаренко Г.Г. <i>Нобелевская премия за расшифровку генома неандертальца</i>	5
Гулаков А.В., Дроздов Д.Н., Иванцов Д.Н. <i>Цитогенетическое действие радиационного облучения на ихтиофауну водных объектов Полесского радиационно-экологического заповедника</i>	17
Дайнеко Н.М., Тимофеев С.Ф. <i>Оценка миграции ^{137}Cs в звене почва–растение пойменного луга реки Сож после катастрофы на ЧАЭС</i>	22
Дорожко Н.В., Сидоркина Е.И., Турышев Л.Н., Светашев А.Г. <i>Вариант методики ретроспективного моделирования годовых доз биоэффектов солнечного УФ излучения</i>	27
Калиниченко С.А., Головешкин В.В., Тагай С.А. <i>Особенности вертикального распределения ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{241}Am в почвах ближней зоны Чернобыльской АЭС</i>	32
Колмаков П.Ю., Жерносеков Д.Д. <i>Обмен ионов тяжелых металлов в микоризном корневом окончании системы «<i>Picea abies</i> – эктомикоризные грибы»</i>	39
Концевая И.И., Дайнеко Н.М., Тимофеев С.Ф., Юревич И.С. <i>Влияние микробных удобрений на взаимоотношения основных эколого-трофических групп почвенных микроорганизмов в посевах ярового ячменя в условиях засухи</i>	46
Соколов А.С. <i>Распределение вегетационного индекса NDVI на территории Гомеля</i>	52
Танкевич Е.А., Симончик Ю.К. <i>Влияние микроорганизмов основных трофических групп на содержание в биодоступных формах макро- и микроэлементов в дерново-подзолистой супесчаной почве Полесского государственного радиационно-экологического заповедника</i>	56
Храмченкова О.М. <i>Методические основы оценки фотозащитных свойств экстрактов из лишайников</i>	62
Шендрик Т.В. <i>Первые находки церкарий <i>Brachylaima</i> sp. (Digenea: Brachylaimidae) у наземных моллюсков на территории Беларуси</i>	68

ИНФОРМАТИКА

Долженок А.В., Осипенко Н.Б. <i>Разработка дополнительного сервиса работы в Windows с использованием инструментария PowerShell и голосового помощника</i>	74
Сукач Е.И., Громько В.В. <i>Об одной реализации коммуникационной платформы для обмена документами с математическими выражениями</i>	80

Шилин Л.Ю., Навроцкий А.А. Система шифрования данных на основе устройств фазовой синхронизации.....	84
МАТЕМАТИКА	
Бородич Р.В., Бородич Е.Н., Бузланов А.В., Близнац И.В. О пересечении абнормальных максимальных подгрупп, не содержащих подгруппу p -нильпотентный радикал, в группах с операторами.....	90
Бураковский В.В., Казимиров Г.Н. Симметричная маркерная локальная сеть с носителем приоритетом.....	94
ФИЗИКА	
Андрусевич П.П., Редьков В.М. Внутренняя симметрия квантованных многокомпонентных майорановских полей.....	98
Никитюк Ю.В., Сердюков А.Н., Купо А.Н., Руденков А.С., Аушев И.Ю. Оптимизация параметров двулучевого лазерного раскалывания силикатных стекол по криволинейным траекториям.....	105
Новикова О.В., Тюменков Г.Ю. Приближение Вина в ультрафиолетовой области спектра теплового излучения звёзд.....	112
Остриков В.О., Остриков О.М. Расчет сил, действующих на непараллельных границах раздела аустенит / мартенсит в ферромагнитном монокристалле с памятью формы, находящемся в жесткой заделке.....	116
КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ	
Островский А.М. О находке аноплиуса сарматского (<i>Anoplius samariensis</i>) на территории Гомельского района.....	122
Саварин А.А., Левшунова Л.А. Случай полидактилии у свиньи породы ландрас.....	125

PROCEEDINGS

of Francisk Skorina Gomel State University

SCIENTIFIC, PRODUCTION AND PRACTICAL JOURNAL

Published since 1999

Released bimonthly

• 2024, № 3 (144) •

NATURAL SCIENCES:

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

• MATHEMATICS • PHYSICS

CONTENTS

BIOLOGY

Goncharenko G.G. <i>Nobel Prize for deciphering the Neanderthal genome</i>	5
Gulakov A.V., Drozdov D.N., Ivantsov D.N. <i>Cytogenetic effect of radiation exposure on the ichthyofauna of water bodies of the Polessky Radiation and Ecological Reserve</i>	17
Daineko N.M., Timofeev S.F. <i>Assessment of ¹³⁷Cs migration in the soil-plant link of a floodplain meadow of the river Sozh after the Chernobyl disaster</i>	22
Dorozko N.V., Sidorkina E.I., Turishev L.N., Svetashev A.G. <i>A variant of the method of retrospective modeling of annual dose of bioeffects of solar UV radiation</i>	27
Kalinichenko S.A., Goloveshkin V.V., Tagai S.A. <i>Features of the vertical distribution of ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am in soils of the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant</i>	32
Kolmakov P.Yu., Zhernosekov D.D. <i>Exchange of heavy metal ions in the mycorrhizal root tip of the «Picea abies – ectomycorrhizal fungi» system</i>	39
Kontsevaya I.I., Daineko N.M., Timofeev S.F., Yurevich I.S. <i>The influence of microbial fertilizers on the relationship of the main ecological-trophic groups of soil microorganisms in spring barley crops under drought conditions</i>	46
Sokolov A.S. <i>Distribution of the NDVI vegetation index on the territory of Gomel</i>	52
Tankevich E.A., Simonchik Yu.K. <i>Influence of microorganisms of the main trophic groups on the content of bioavailable forms of macro- and microelements in soddy-podzolic sandy loam soil of the Polesie State Radiation-Ecological Reserve</i>	56
Khramchankova V.M. <i>Methodological basis for assessing the photoprotective properties of lichen extracts</i>	62
Shendrik T.V. <i>The first findings of cercariae Brachylaima sp. (Digenea: Brachylaimidae) in terrestrial mollusks on the territory of Belarus</i>	68

INFORMATION TECHNOLOGY

Dolzhenok A.V., Osipenko N.B. <i>Development of an additional service for working in Windows using PowerShell and voice assistant</i>	74
Sukach E.I., Gromyko V.V. <i>On one implementation of a communication platform for exchanging documents with mathematical expressions</i>	80
Shilin L.Yu., Navrotsky A.A. <i>Data encryption system based on phase synchronization devices</i>	84

MATHEMATICS

Borodich R.V., Borodich E.N., Buzlanov A.V., Bliznets I.V. <i>On the intersection of abnormal maximal subgroups not containing a subgroup p-nilpotent radical in groups with operators</i>	90
---	----

Burakovsky V.V., Kazimirov G.N. <i>Symmetrical token local area network with relative priority</i>	94
PHYSICS	
Andrusevich P.P., Red'kov V.M. <i>Internal symmetry of the quantized multi-component Majorana fields</i>	98
Nikityuk Yu.V., Serdyukov A.N., Kupo A.N., Rudenkov A.S., Aushev I.Yu. <i>Optimization of parameters for double-beam laser cleaving of silicate glasses along curved paths</i>	105
Novikova O.V., Tyumenkov G.Yu. <i>Wien approximation in the ultraviolet region of the thermal radiation spectrum of stars</i>	112
Ostrikov V.O., Ostrikov O.M. <i>Calculation of forces acting at non-parallel austenite / martensite interfaces in a ferromagnetic single crystal with shape memory located in a rigid embedding</i>	116
ABSTRACTS	
Ostrovsky A.M. <i>About the discovery of Sarmatian Anoplius (<i>Anoplius samariensis</i>) in the Gomel region</i>	122
Savarin A.A., Levshunova L.A. <i>A case of polydactyly in a Landrace pig</i>	125

Нобелевская премия за расшифровку генома неандертальца

Г.Г. ГОНЧАРЕНКО

Рассмотрены этапы научной деятельности молекулярного генетика лауреата Нобелевской премии за 2022 г. шведского профессора Сванте Пэабо. Охарактеризованы разработанные им подходы и технологии секвенирования ДНК и расшифровки геномов в ходе исследования ископаемых останков животных, мумий и древних людей.

Ключевые слова: древняя ДНК, неандерталец, секвенирование, генный поток, палеогенетика.

The stages of the scientific activity of the molecular geneticist of the Nobel Prize laureate for 2022, Swedish professor Svante Pääbo, are considered. The approaches and technologies developed by him for DNA sequencing and genome decoding during the study of animal fossils, mummies and ancient people are characterized.

Keywords: ancient DNA, neanderthal, sequencing, gene flow, paleogenetics.



Присуждение **Нобелевских премий** традиционно проходит в первой декаде октября каждого года.

Лауреатом престижной премии в области **физиологии и медицины** в 2022 г. стал шведский **молекулярный генетик профессор Сванте Пэабо (Svante Pääbo)**. По решению Нобелевского комитета премия присуждена ему за исследования вымерших гоминид и эволюции человека, а также решающий вклад в разработку методов анализа и восстановления древней ДНК. Сванте Пэабо секвенировал геном неандертальца, а затем денисовского человека и доказал передачу неандертальских

генов от вымерших гоминид к человеку в ходе контактов между ними около 70 тыс. лет назад. Исследования Пэабо явились базовым фундаментом для формирования новой научной дисциплины – **Палеогеномики** [1].

Сванте Пэабо родился 1955-м в Стокгольме. Мать – Карин Пэабо ((Karen Pääbo) лаборант-химик, отец – известный биохимик Бергстрём (Bergstrom).

Студент, аспирант. В 1975-м Сванте поступил в Упсальский университет, где до 1977-го изучал египтологию и историю науки. Затем после окончания медицинской школы Упсальского университета в 1980-м работал врачом. С 1981-го Сванте Пэабо аспирант Упсальского университета, где под руководством профессора Петерсона (Peterson) успешно занимается молекулярной иммунологией и публикуется в ведущих журналах. При этом сохраняет привязанность к Древнему Египту. Друзьям и коллегам признается, что обожает египтологию и молекулярную биологию одновременно. Идея проанализировать ДНК египетских мумий и установить, в каком родстве фараоны друг с другом и с современными людьми, позволяет объединить интересы двух дисциплин. Однако еще никому не удавалось выделить ДНК из мертвых тканей, поскольку в них она стремительно деградирует. Бесплодные попытки найти ДНК в образцах мумий приводили Пэабо в отчаяние [1]. И все же в ушной раковине одной мумии возраста 2400 лет он обнаружил остатки клеток со следами ДНК. В статье, опубликованной в 1985-м, Пэабо подчеркнул, что ДНК в мумиях есть и по ним можно изучать отдельные гены [2]. Но статья осталась незамеченной.

В конце 1984-го в *Nature* появилась публикация сотрудников Уилсона (Wilson), ведущего эволюционного биолога из Беркли. Им удалось выделить ДНК из столетней шкуры квагги, вымершего родственника зебры. Это вдохновило Пэабо. Если уж Уилсон взялся за древнюю ДНК, то молекулярно-генетические исследования мумий будут тем более актуальными. И он отправил свою статью по ДНК мумий также в *Nature* [3].

После публикации статьи Пэабо приглашается с докладом в 1986-м на симпозиум в Колд-Спринг-Харбор – Мекку молекулярных биологов. Здесь он знакомится с Уилсоном и Мюллисом (Mullis), который представил свое открытие полимеразной цепной реакции, ПЦР [4]. Стало ясно, что для изучения древних ДНК можно использовать метод ПЦР, так как он позволяет выделять и размножать фрагменты ДНК, даже если их сохранилось очень мало. На симпозиуме Пэабо принял предложение ехать к Уилсону в постдокторантуру Университета Беркли в 1987-м для исследования ДНК вымерших животных [1].

Стажер-исследователь. В 1986-м он недолго работал в центре молекулярной биологии Цюрихского университета и в Институте изучения рака в Лондоне, где осваивал методы работы с ДНК и пытался выделить ее из материала вымершего сумчатого волка.

Постдокторантура. Весной 1987-го Пэабо переезжает в Беркли и быстро осознает, что оказался в нужном месте в нужное время. Мюллис после открытия ПЦР работал рядом в корпорации «Цэтис». Они существенно модернизировали метод и сконструировали ПЦР-машину – **амплификатор**. Поэтому Пэабо с Уилсоном сразу взяли материал вымершей квагги, запустили процесс ПЦР в амплификаторе и быстро получили отличные фрагменты мтДНК [5]. На амплификаторе можно было повторять процесс и проверять результаты снова.

За три года постдокторантуры Пэабо с коллегами удалось выделить и проанализировать древние мтДНК квагги, кенгуровой крысы, сумчатого волка тилацина и его родственников, образцы индейцев возраста 7000 лет [5], [6], [7]. Им впервые удалось установить эволюционные связи между древними и нынешними популяциями и видами. Были сделаны также важные методические выводы: не в каждом древнем остатке есть ДНК; из-за разложения удается выделять ДНК длиной только 100–200 нуклеотидов [8].

Постдокторантура подходила к концу, и перед Пэабо стал вопрос поиска работы. В Кембридже предлагали доцента, в родной Упсале исследователя-лаборанта. А из Мюнхена декан Дэвид (David) предложил должность профессора в Институте зоологии Мюнхенского университета. Это означало признание научного авторитета Пэабо и огромный карьерный рост. В январе 1990-го он приступил к новой для него работе.

Профессор зоологии. В течение трех лет, пройдя через невероятные трудности и разочарования, Пэабо консолидировал сотрудников и создал *всемирно признанную эталонную лабораторию ДНК-анализа древних и вымерших животных*. Работая с костными останками плейстоценовой лошади, Пэабо и Хёсс (Höss) в 1993-м получили последовательность ее мтДНК и доказали, что можно надежно реконструировать ДНК из костей возрастом 25 тыс. лет. Это была первая полученная последовательность ДНК доледниковых времен [9]. Разработанные ими *методы анализа древней ДНК используют до сих пор практически во всех лабораториях мира*. В 1994-м Хёсс выделил первую последовательность мтДНК сибирского мамонта из образцов четырех особей возрастом от 10 до 50 тыс. лет [10]. Полученные данные позволили не только прояснить родственные связи между мамонтами и индийским и африканским слоном, но и дали возможность проследить историю мамонтов до их вымирания около 4000 лет назад. ***У древней ДНК появилось, наконец, что отпраздновать.***

Технологии анализа древней ДНК оказались приложимы к «охранной генетике», когда в популяции остается ограниченное количество особей исчезающего вида и биоматериалом является только помет. Используя метод «кремниевого» выделения в сочетании с ПЦР Пэабо с учениками показали, что для получения ДНК дикого животного не нужно его убивать или усыплять [11]. С тех пор выделение ДНК из помета стало повсеместной практикой в области генетики редких животных.

И все же несмотря на успехи Пэабо, его не покидало желание заняться человеком. Хотя приходилось все время помнить, что он ***профессорствует на кафедре зоологии***. Поэтому все сконцентрировались на вымерших животных и их ныне живущих родственниках.

В Южной Америке обитают дву- и трехпалые ленивцы, которые живут на деревьях. В Лондонском музее хранится гигантский ленивец милодон, вымерший 10 тыс. лет назад. Используя костный фрагмент милодона, Хёсс собрал цепочку мтДНК длиной более 1000 нуклеотидов и после сравнения с аналогичными фрагментами современных ленивцев доказал, что наземные гиганты ближе к трехпалым, чем дву- и трехпалые между собой. Это однозначно говорило о том, что среди ленивцев дважды возникали древесные формы [12].

Примеры с ленивцами и сумчатыми волками – яркие случаи конвергентной эволюции, они показывают насколько ненадежно судить о родстве по морфологическому сходству [7], [12]. Об этом более точно говорит ДНК, поскольку в ней накапливаются случайные мутации, которые не влияют на морфологические признаки.

К середине 1990-х стало понятно, что можно извлечь древнюю ДНК из коллекционных образцов кожи. Это было показано на кенгуровых крысах, а также летягах, кроликах и многих других видах. В результате в ведущих музеях появились лаборатории по исследованию древней ДНК, где использовали коллекционные образцы. Криминалисты теперь могли анализировать ДНК из образцов с мест преступлений многолетней давности. На основе новых генетических данных были освобождены из тюрем невиновные, генетические улики способствовали быстрой идентификации останков и успешному обнаружению преступников. Зародилась новая область знаний – *молекулярная палеогенетика* [1], [13].

В 1991-м в Альпах нашли мумифицированные останки человека, который жил 5300 лет назад. Заняться анализом ДНК Эци, так назвали ледяного человека, предложили Пэабо. На основе выделенных фрагментов мтДНК они собрали участок в 300 нуклеотидов и установили, что он отличается от такового у европейцев двумя нуклеотидами [14].

В своей монографии «Неандерталец» Пэабо, подводя итоги, отмечает, что к 1996-му он смог предложить новые методы, которые превратили зоологические музеи в генетические банки; началось изучение генетики мамонтов, гигантских ленивцев, примитивных лошадей и других животных ледникового периода. Но не к этому стремилась его душа, он чувствовал, что *неволью превращается в зоолога*. А он хотел по ДНК изучать историю человека, но древняя человеческая ДНК не отличается от современной. И у него *зарождалась идея*, что нужно обратиться к тем, которые жили раньше Эци – *к неандертальцам* [13].

Неандерталец. В этой идее его привлекало то, что неандертальская ДНК должна отличаться от человеческой. К тому же он работал в Германии, где в долине Неандерталь впервые нашли неандертальцев вместе с типовым образцом. В Бонском музее удалось получить кусочек кости эталонного неандертальца. Пэабо доставил образец аспиранту Крингсу (Kriings) для анализа. В октябре 1996-го он получил фрагмент митохондриальной ДНК. К тому времени уже были изучены мтДНК тысяч людей со всего мира, но фрагмент из неандертальской кости не был похож ни на одну из них. Такой еще никто не видел! Они открыли шампанское. Все понимали, что открываются огромные перспективы [1], [13].

Крингс провел ПЦР-амплификацию, используя специальные праймеры, для получения отрезка мтДНК длиной в 61 нуклеотид. После ПЦР всю полученную ДНК из фрагментов в 61 нуклеотид они клонировали в бактериях. Затем, отсеквенировав ДНК из выросших бактериальных колоний, получили 17 с идентичными фрагментами, которые отличались от всех известных. Они повторили ПЦР и клонирование, взяв другой костный образец неандертальца. Получилось 10 колоний с уникальным фрагментом мтДНК. Таким образом, они могли повторять все операции и получать каждый раз ту самую последовательность мтДНК [13].

Следующим шагом была «проходка» вдоль ДНК. Для этого они использовали другие праймеры и получили 123 последовательности мтДНК разной длины. Прикладывая один фрагмент к другому, сложили мозаику в участок длиной в 379 нуклеотидов. При сравнении этого участка неандертальской мтДНК с аналогичными участками современного человека было установлено, что неандертальская мтДНК отличается от каждой из современных в среднем по 28 нуклеотидам. А фрагмент мтДНК современных людей отличается друг от друга в среднем по 7 нуклеотидам. Следовательно, неандертальские различия вчетверо больше современных [15].

Поскольку скорость мутаций в мтДНК у близких видов постоянна, то число различий в нуклеотидах можно пересчитать на количество поколений и установить время дивергенции.

Исходя из полученных данных, определили, что мт-предок всех современных людей жил 100–200 тыс. лет назад. А общий предок, давший начало и неандертальцам, и всем современным людям, существовал около 500 тыс. лет назад [15].

В рождество Пэабо отправился в Альпы на лыжные склоны. Но даже там он в мыслях сочинял статью, где *впервые* будет представлена последовательность мтДНК *неандертальца*. То, что предстояло описать, кружило голову сильнее, чем крутые склоны. Статью послали в журнал *Cell*, который в отличие от *Nature* и *Science* брал длинные статьи. А им хотелось описать все детально и познакомить научное сообщество со скрупулезными методами получения и анализа древней ДНК. Статья была опубликована летом 1997-го [15]. Затем была пресс-конференция. Ее цитировали на первых полосах газет, новость передавали по радио и телевидению. Пэабо до сих пор считает эту статью одной из своих лучших [1], [13].

Директор-соучредитель института. После первого триумфа осенью 1997-го Пенсильванский университет предлагает Пэабо должность профессора с соблазнительным окладом. В это же время Общество научных исследований Макса Планка (MPG) предлагает ему пост директора-соучредителя и большую свободу при организации нового института для исследования в области антропологии. Пэабо настоял на организации его в Лейпциге, где был хороший университет и куда могли приехать ведущие ученые. Базовой парадигмой для всех работ в институте должна быть эволюция, а его название – Институт эволюционной антропологии. В эту концепцию хорошо укладывались неандертальцы и человекообразные обезьяны. Упор будет сделан на изучение древней ДНК, особенно неандертальской, и реконструкцию человеческой истории на базе генетики [13].

В 1998-м его группа переместилась из Мюнхена в Лейпциг. MPG как и обещало, выделило им внушительные *средства, позволившие устроить лабораторию мечты* [1], [13]. Следующая задача просилась сама собой – определить мтДНК еще у двух неандертальцев, найденных в Хорватии и на Кавказе. Они установили, что у трех неандертальцев различались 3,7 % нуклеотидных позиций. Тот же фрагмент мтДНК у 5530 людей со всего мира различался на 3,4 %. По аналогичному фрагменту мтДНК для 359 шимпанзе разница составила 14,8 %, а для 28 горилл – 18,6 %. Таким образом, было установлено, что генетическая изменчивость неандертальцев ниже, чем у обезьян и они, как и люди, произошли от небольших популяций [16].

Данные Пэабо о существенных различиях между неандертальцами и людьми по мтДНК, опубликованные в *Cell*, подтверждали модель происхождения человека ‘из Африки’ в противовес мультирегиональной [15]. Но оставался вопрос о возможной передаче ядерных генов от неандертальцев к людям. Это стимулировало исследование ядерной ДНК.

Ядерная ДНК. Исследования по ней было поручено аспиранту Кесманну (Kaessmann). Они взяли для анализа не кодирующий участок *X-хромосомы* в 10 тыс. нуклеотидов у 60 человек со всего света и показали, что среднее число различающихся нуклеотидов составило 3,7. В том же участке у 30 особей шимпанзе различия составили 13,4 нуклеотида, а у горилл и орангутанов были даже выше. Результаты опубликовали в *Nature Genetics* и *Science*. Где подчеркнули, что изменчивость ядерной ДНК на выбранном участке у человека и обезьян сходна с установленной для мтДНК [17]–[19].

В работу по ядерной ДНК подключили Гринвуда (Greenwood), с которым безуспешно попытались выделить ее из пещерных медведей. И они переключились на замороженных мамонтов. Замораживание замедляет развитие бактерий и процессов, разрушающих ДНК. Кроме того, еще в 1994 г. Хёсс и Пэабо показали, что в мамонтах сохраняется большое количество мтДНК [10]. Они взяли ген 28SpДНК, который кодирует рибосомную РНК, и начали выделять его из зуба мамонта. В каждой клетке после смерти животного остается столько копий этого гена, сколько и мтДНК. Ген удалось амплифицировать, отсеквенировать и установить его нуклеотидную последовательность. Затем они сравнили полученную последовательность 28S с соответствующей у африканских и индийских слонов и установили, что только фрагмент африканских отличался по двум нуклеотидам. Когда датировка зуба показала 14 тыс. лет стало ясно, что *впервые получена ядерная ДНК позднего плейстоцена* [20].

После этого Гринвуд сконструировал праймеры для амплификации фрагмента гена фактора Виллебранда (vWF), кодирующего специализированный белок. Было сюрпризом, когда на семинаре он показал слайды с полосками в геле, амплифицированных фрагментов

гена мамонта. В одной из позиций он обнаружил однонуклеотидный полиморфизм (SNP). В секвенированных 30 клонх у 15 в этой позиции стояло Ц, а у 14 – Т. Таким образом, им впервые удалось обнаружить гетерозиготный ген ледникового периода [13], [20].

Несколько дней царил праздник. Затем они вернулись к пещерным медведям, и в кости возраста 33 тыс. лет после амплификации из нее генов рДНК удалось получить их небольшое количество. Они секвенировали последовательность их нуклеотидов и установили, что у пещерных медведей она идентична таковой у современных. В 1999-м все открытия Гринвуда и Пэабо были опубликованы в добротной статье в *Molecular Biology and Evolution* [20].

В целом они показали, что ядерная ДНК выдерживает более 10 тыс. лет в вечной мерзлоте, но только следы даже самого многочисленного ядерного гена сохраняется в пещерных медведях. Разница между замораживанием и хранением в пещерах была огромной.

Более 30 лет для секвенирования ДНК использовали метод, нобелевского лауреата Фреда Сэнгера (Fred Sanger) [21], [22]. Открытие **пиросеквенирования** положило начало революции, известной как **секвенирование второго поколения**, которая радикально изменила многие направления в биологии. В 2003-м компания 454 Life Sciences, основанная Ротбергом (Roche), начала автоматизировать методы пиросеквенирования.

Прелюдия к геному. В 2005-м отдел в Лейпциге посетил директор Объединенного института генома Рубин (Rubin). Он считал, что будущее за клонированием ДНК в бактериях. Пэабо отправил ему в Беркли экстракты костей пещерных медведей. Команда Рубина провела секвенирование по Сэнгеру для 14 тыс. случайно выбранных клонов и нашла, что 389 (2,7 %) содержали ДНК, принадлежавшие медведям. Суммарно они определили последовательность 26 861 нуклеотида в геноме медведя, используя одну десятую грамма костной ткани. Учитывая, что в геноме 3 млрд. нуклеотидов, исследуемую ткань при анализе придется увеличить в сотню тысяч раз [23].

В это время Ротберг вместе с 454 запустил установку, способную секвенировать сотни тысяч нуклеотидов в день. Пэабо договорился с Ротбергом начать секвенировать на их установках геномы медведей и мамонтов. Грин (Green) сравнил отсеквенированные ими сотни тысяч последовательностей ДНК с геномами собаки и слона и определил, что 73 172 разных фрагментов ДНК от мамонта и 61 667 фрагментов от пещерного медведя. То есть, один эксперимент по новой методике 454, в котором использовали только часть экстракта, дал в десять раз больше информации, чем получили в Беркли. Стало ясно, что пиросеквенирование в десять раз эффективнее, чем бактериальное клонирование. И Пэабо решил провести эксперименты по двум разным методикам *на материале реальной неандертальской ДНК* [13].

Тогда же дипломник Бриггс (Briggs), который мыслил быстрее всех, посчитал, что для секвенирования 3 млрд. нуклеотидов из медвежьего или неандертальского генома понадобится секвенировать 600 млн. бактериальных клонов. После чего сомнения отпали – клонирование по эффективности не отвечало задаче составления неандертальского генома.

В это же время исследованием палео-ДНК занимались и американцы Пойнар (Poinar) и Шустер (Schuster). Они, как и Пэабо, использовали пиросеквенирование и в начале 2006-го из вытяжек мамонтов определили последовательность 28 млн. нуклеотидов [24].

К конференции в Колд-Спринг 2006-го Пэабо получил результаты секвенирования от Ротберга и Рубина. В докладе он представил сравнение двух методик по секвенированию древней ДНК и обрисовал пути по составлению генома неандертальцев методами пиросеквенирования. Он вел доклад от мамонтов и пещерных медведей к неандертальцам и чувствовал безраздельное внимание в зале. Когда он показал последний слайд, где стрелочки указывали расположение тысяч фрагментов неандертальской ДНК, которые они прочитали, зал ахнул. Они составили всего 0,0003 % неандертальского генома, но мировой генетической элите стало ясно, что *теперь возможно прочитать геном целиком* [13].

После доклада он вернулся в номер и бросился на кровать. Да, он сделал неплохую карьеру, у него прекрасная должность, увлекательные проекты, его приглашают читать лекции со всего мира. Что же он так себя подставил? Зачем пообещал прочитать геном неандертальца? Конечно, если получится, это станет величайшим достижением. А если нет? Позор, конец карьеры без вариантов. Ведь он то знал, сколько чудовищных трудностей лежит на пути к реальным результатам. Потребуется большое количество секвенаторов, очень много денег и хорошие образцы костной ткани неандертальцев. Ничего этого не было [13].

Прежде всего Пэабо едет к Ротбергу в Брэнфорд, где обсуждают, что нужно для прочтения неандертальского генома. Они решили применить метод «шотган», который Вентер (Venter) использовал для прочтения генома человека [25]. При этом секвенируются случайные фрагменты генома, затем с помощью программ составляют длинные фрагменты. Стоимость работы – пять миллионов долларов. Но весь годовой бюджет отдела Пэабо был намного меньше. На помощь вновь пришел профессор Йекль (Jeckl). Он обсудил проект с президентом общества Макса Планка, и они согласились выделить эту сумму.

Тем временем команда Рубина составила бактериальную библиотеку из всего неандертальского экстракта и отсековировала ДНК. Результат насчитывал 65 тыс. нуклеотидов. У Ротберга было использовано 7 % экстракта и прочитано около миллиона нуклеотидов. Методики прямого секвенирования оказались в двести раз эффективнее. Они пришли к очевидным разногласиям. Методы у них были разные, результаты значительно отличались. Поэтому решили, что одну статью напишет команда Рубина и пошлет ее в *Science*, а другую – команды Пэабо и Ротберга и пошлют в *Nature*. Так они с Рубиным стали соперниками [13].

Неандертальский геном. В июле 2006-го при подписании контракта с 454 в Лейпциге была организована пресс-конференция. Подчеркивалось, что удалось соединить методы анализа древней ДНК, разработанные за много лет группой Пэабо с новейшими технологиями, предоставленными компанией 454, и в результате *начато секвенирование неандертальского генома*. Все прошло эффективно! Трансляция по всему миру. Они объявили, что берутся за два года прочитать 3 млрд. нуклеотидов неандертальца [13].

Две статьи, посвященные первым результатам секвенирования неандертальского генома, вышли в *Nature* и *Science* 16 и 17 ноября [26], [27]. Пресса подняла ажиотаж. Но Пэабо было не до того. Они же обещали отсековировать 3 миллиарда нуклеотидов за два года. И в статье было подчеркнуто, что для этого необходимо 20 гр. костного материала, 6 тыс. запусков аппаратуры 454 и прогресс в скорости секвенирования [27].

У Пэабо не было 20 гр. хорошего костного материала. Поэтому он предпринимает все усилия для получения неандертальских костей из находок в Испании, Германии и России. Однако их анализ показал, что в большинстве костей ДНК не было и даже в лучших содержалось от 0,06 до 0,2 % ядерной ДНК. Особенно трудно достался материал из Хорватии, где затем в трёх костях обнаружили 1, а в знаменитой Vi-80 из Виндии 3 % ядерной ДНК. Но ее было абсолютно недостаточно для секвенирования полного генома.

Это заставило команду Пэабо направить все усилия на разработку более эффективных методов выделения ДНК. Замена щелочного метода разделения нитей на температурный позволило на 90 % уменьшить потери выделенной ДНК. Кроме того они установили, что в некоторых участках кости ДНК было в десять раз больше, чем в других. В костных экстрактах остается более 90 % бактериальной ДНК, и использование ими 8 рестриктаз, которые ее расщепляют, позволило получать 20 % неандертальской ДНК вместо четырех [28]. Теперь стало возможным получить из костей 3 млрд. нуклеотидов.

К 2008-му команда 454 проделала 147 запусков из образцов Vi-80 и получила 39 млн. отсековированных фрагментов. Поэтому решили реконструировать только митохондриальный геном неандертальца. Грин из 39 млн. идентифицировал 8341 мт-фрагмент неандертальца и получил полную последовательность мтДНК в 16 565 нуклеотидов. Они также выявили отличия мт-ДНК неандертальца от человека по 133 позициям [29].

Шел второй год проекта, а до результатов с 3 млрд. нуклеотидов было далеко. В 2007-м компанию 454 поглотил гигант Roche и Пэабо обратился к Solexa. У них амплификация производилась на стеклянных шариках, к которым прикреплялись фрагменты ДНК, где каждая образовывала кластер с миллионом копий. Кластеры секвенировались с помощью праймеров, ДНК-полимеразы и флуоресцентных нуклеотидов. В Solexa обещали чтение не тысяч нитей, как в 454, а нескольких миллионов. Затем компания *Illumina перекупила Solexa* и Пэабо договорился протестировать работу Illumina на неандертальской ДНК.

К лету 2008-го у них были и кости и экстракты для получения 3 млрд. нуклеотидов, но нужно было перевести программы на Illumina. Сильной стороной 454 было считывание длинных фрагментов, а им нужно было читать много коротких и как можно быстрее. И тогда в добавок к своему Пэабо купил еще четырех секвенатора Illumina, с которыми планировал доделать геном к концу года. Поэтому сотрудничество с 454 пришлось завершить.

В это время отдел Пэабо посетил директор Института Брода Лэндер (Lander) и предложил помощь в секвенировании на Illumina. Пэабо отсеквенировал часть материала на своей Illumina и определил миллиард фрагментов, достаточных для прочтения всего генома. Затем образцы послали в Институт Брода для секвенирования. При анализе их данных оказалось, что последовательности были такими как и на Illumina Пэабо. Это вдохновляло [13].

В июне к ним приехал редактор Science для обсуждения итоговой статьи. Журнал издается Американским обществом научных достижений (AAAS) в Чикаго, и Пэабо пригласили для доклада в феврале 2009-го. В нем он сосредоточился на трудностях при выделении ДНК. Отразил сложности в разработке программ для построения генома. Затронул и самого неандертальца. Например, мутация в гене на 8-й хромосоме у людей уменьшает размер мозга. Считалось, что мутантный вариант попал к нам от неандертальцев. Но в неандертальском геноме его не было. Что указывало на отсутствие неандертальского вклада в геном европейцев и соответствовало данным, полученным ими ранее по мтДНК [15].

Возвратившись из Чикаго, он подвел итоги. Они получили всю последовательность ДНК, но нужно было перестроить программы для Illumina. И тогда можно будет установить, насколько люди и неандертальцы отличаются, когда они разделились, скрещивались ли они?

Консорциум. Чтобы найти ответы, им понадобилось гораздо больше людей. Назрела необходимость организовать *нечто вроде консорциума*. Прежде всего *нужны были популяционные генетики*. Они изучают вариации ДНК в популяциях и могут сказать, когда те разошлись и существовал ли между ними обмен генами. Особенно ему были нужны Рейх (Reich), профессор из Гарварда, популяционный генетик с неординарным мышлением. С ним и Паттерсон (Patterson), знаменитый криптограф. Он хотел пригласить и Слаткина (Slatkin) профессора из Беркли, который сделал прекрасную карьеру в математической биологии.

Главный вопрос, интересный всем участникам консорциума – *имеется ли неандертальский вклад в геноме европейца*. В их статье 1997-го про мтДНК неандертальца подчеркнуто, что свидетельств их наследия у современных людей нет. И только анализ ядерного генома может дать более точный ответ [15].

Еще в конце 2006-го Малликин (Mullekin) отсеквенировал геномы нескольких европейцев и африканцев. Он выделил в геномах те позиции, в которых у них стоят разные нуклеотиды. Это называется однонуклеотидным полиморфизмом (SNP) или СНИПом. Задача стояла узнать, есть ли в геноме человека неандертальские СНИПы. Они сравнили по СНИПам различия между геномами европейцев и африканцев и установили, что среди европейцев 62 % общих СНИПов, а у европейца с африканцем – 38. При *сравнении* 269 СНИПов неандертальцев с таковыми европейцев и африканцев оказалось, что с европейцами у них 134 общих СНИПа, а с африканцами – 135. Это означало, что геном неандертальца одинаково (50 на 50) близок и европейцам и африканцам [13].

Затем Рэйх сравнил все СНИПы современного человека с соответствующими у шимпанзе. Отсюда он мог определить, какие из них *предковые*, а какие получены уже у людей. Чем раньше разошлась неандертальская и человеческая линии, тем меньше должно быть у неандертальцев СНИПов, выявленных у людей. Рэйх, используя 951 африканский СНИП, высчитал, что у европейцев таковых присутствует 31,9 %, а у неандертальцев – 17,1. Это дало оценки времени отделения неандертальцев от африканцев в 300 тыс. лет, а африканцев от европейцев 100–200 тыс. лет. Все сходилось, и результат радовал [13].

В феврале 2009-го пришел имейл от Рэйха. Он установил, что неандертальская последовательность схожа с европейской на 51,3 %. От 50 на 50 почти не отличается, но при их большой выборке данных даже четверть процента являлась бы достоверным различием. Повидимому, все же неандертальцы скрещивались с предками европейцев. Но вдруг ошибка? Решили на конференции AAAS в Чикаго эту тему не затрагивать.

После Чикаго в Хорватии состоялась встреча участников консорциума, где им предстояло оценить успехи и утвердить план дальнейшей работы. Ответить на главный вопрос, насколько неандертальский геном отличается от человеческого, мешали ошибки, которых при секвенировании в неандертальских ДНК получалось в пять раз больше, чем в человеческих. Нашли элегантное решение не включать в *базовый* подсчет те СНИПы, по которым не-

андертальцы отличались от обезьян, а люди нет, а учитывать только те, где человеческие отличались от обезьяньих. Для этого проверили все СНИПы, по которым люди отличались от обезьян, и, если у неандертальцев в них присутствовал человеческий СНИП, значит, мутация старая и произошла до того, как неандерталец и человек разделились, а если у неандертальцев СНИП как у обезьян, значит мутация у людей новая и произошла после разделения линии человек-неандерталец. В результате установленная доля обезьяньих мутаций у неандертальцев, отнесенная к общему их числу, составила 12,8 % [13].

Все понимали, что пришла пора самим секвенировать геномы. Только так можно быть уверенным, что все нуклеотидные последовательности проанализированы одинаковым образом. Решили секвенировать по одному геному представителей из Европы, Новой Гвинеи, Китая, а также Западной и Южной Африки. Анализ пяти геномов провели за несколько недель. Теперь, с Illumina, отсеквенировать несколько геномов оказалась под силу даже небольшой группе. Не то, что два года назад.

Генный поток. В июле Пэабо получил сообщения от Рэйха и Патерсона. Те просчитали все 10 возможных попарных сравнений для пяти геномов. По их расчетам у неандертальцев с африканскими бушменами оказалось 49,9 % общих СНИПов, а с йоруба – 50,1. Поскольку неандертальцы никогда не заходили в Африку, то сходство с ними и должно быть одинаковым. При проведении попарных сравнений между французом, китайцем и папуасом различия получились на 49,8–50,6 %. Иными словами сходство между современными представителями разных рас, кроме африканцев, составило около 50 %. В то же время у неандертальцев с французом оказалось 52,4 % общих СНИПов, с китайцем – 52,6, а с папуасом – 52,1. Следовательно, в неафриканских геномах имеется небольшой 2-х процентный неандертальский вклад. Пэабо перечитал имейл. Ошибки вроде нет [13].

Обсуждения открытий Рэйха и Патерсона продолжались всю неделю. Одни согласились, что неандертальцы скрещивались с людьми. Другие нет. Все помнили их статью 1997-го, где говорилось об отсутствии неандертальского вклада в мтДНК людей [15]. Чтобы убедить мир, нужно было провести независимое от СНИПов исследование.

Ранее профессор Нильсен (Nilsen) из Беркли обнаружил 17 участков генома, где изменчивость у неафриканского населения была выше, чем у африканского. Пэабо переслал ему неандертальские последовательности ДНК, соответствующие этим участкам, и тот установил, что в 13 из 15 участков неандертальцы имели последовательности ДНК, которые встречались у европейцев, но не у африканцев. Более тщательный анализ с использованием 12 участков длиной около 100 тыс. нуклеотидов выявил неандертальские варианты в 10 из них. Это можно объяснить только неандертальской добавкой в геном европейцев [1], [13].

Следующий вопрос был очевидным: *как неандертальская ДНК оказалась не только у европейцев, но и у китайцев и папуасов?* Ведь их никогда не находили на территории Китая и Новой Гвинеи. Отсюда следует, что предки китайцев и папуасов встречались с неандертальцами западнее их нынешнего обитания.

Пэабо и члены консорциума, анализируя совокупность полученных генетических и палеонтологических данных, пришли к *ближневосточному сценарию*. По которому неандертальские предки произошли в Африке, затем 300–400 тыс. лет назад двинулись в Евразию. Также в Африке через 200 тыс. лет появились и ранние люди, сапиенсы. В популяциях неандертальцев и сапиенсов за время тысяч лет раздельного существования накопилось много генетических различий. Мигрируя из Африки на север, волна сапиенсов в результате долгого совместно проживания и неизбежных контактов с неандертальцами в районе Ближнего Востока частично *приобрела их генетическую изменчивость*. Затем гибридные популяции сапиенсов за 50 тыс. лет заняли каждый уголок планеты, *включая Китай и Новую Гвинею*, изобрели новые технологии и отправились в космос. И если у этого прорыва есть генетическая основа, то ее можно найти, сравнив геномы неандертальцев и людей [13].

Эта мечта не давала Пэабо покоя. К лету 2009-го они откартировали все фрагменты неандертальского генома. Затем начали составлять каталог генетических изменений, которые произошли в геноме людей после разделения с неандертальцами. При сравнении с неандертальским геномом число модифицированных позиций у людей составило около 100 тыс. Это

и есть *ответ на вопрос: что делает человека человеком?* Если вернуть обратно 100 тыс. нуклеотидов, то получится общий предок неандертальца и человека. Пэабо надеялся, что с изучения каталога начнется поиск генов, определяющих человеческие разум и поведение.

Триумф. Научный результат редко бывает окончательным. Однако необходимо уметь остановиться, подвести итоги и предъявить миру результаты. В феврале 2010-го они, наконец, завершили итоговую статью и отправили ее в Science. Статья и 174 страницы приложения вышли в свет 7 мая 2010-го [30].

С публикацией начался ажиотаж в печати. Но Пэабо уехал на конференцию в Колд-Спринг. Он испытал огромное удовлетворение, делая доклад о достижениях в том зале, где четыре года назад объявлял о намерении открыть проект. После него выступил Маклин (MacLlin), дипломник из Стэнфорда. Он выявил 583 участка ДНК, присутствующих у обезьян, но утраченных у человека, и определил, какие гены там располагались. Один кодировал белок, расположенный в *шипообразных* выростах на пенисе обезьян, обеспечивающих быструю эякуляцию. У человека их нет, что, возможно, позволяет получать удовольствие от длительного соития. Он обнаружил, что и у неандертальцев этого гена нет. Еще один утраченный ген кодирует белок, связанный с ростом мозга у людей. После публикации прошла неделя, а Маклин уже проверил, какие из потерянных генов есть у неандертальцев, а каких нет. Именно так Пэабо и представлял себе использование их работы [13].

Из всех публикаций Пэабо неандертальский геном вызвал самую сильную реакцию в научной среде. Положительно отзывались почти все, но лучше всех написал авторитетный палеонтолог Хоукс из Висконсина: «Эта группа ученых сделала царский подарок человечеству. Теперь мы видим ключевые генетические изменения, сделавшие из нас людей». Геном заинтересовал многих читателей и даже христиан-фундаменталистов [1], [13]. Были сделаны и интересные открытия. Главный комплекс гистосовместимости, ГКГС, кодирует трансплантационные белки. Питер Парэм взял участки неандертальской ДНК, которые соответствовали генам ГКГС. Один из них был обнаружен у европейцев, азиатов и неандертальцев, но отсутствовал у африканцев! Как было показано, неандертальцы передали европейцам половину вариантов этого гена, а китайцам – 72 %. Такое увеличение разнообразия в гене свидетельствует о том, что он помог переселенцам выжить. По-видимому, неандертальцы, прожив на евразийских территориях тысячи лет, выработали в генах ГКГС адаптации к местным болезням, отсутствовавшим в Африке и древние сапиенсы, скрещиваясь с неандертальцами, получили эти адаптации в готовом виде [31].

В декабре 2010-го пришло сообщение, что их работа получила премию AAAS в 25 тыс. долларов за лучший научный труд в Science. Деньги решили направить на организацию встречи консорциума в 2011-м, где планировали наметить новые направления исследований.

Сибирская загадка. Еще в 2007-м Пэабо с сибирским палеонтологом Деревянко (Derevienko) опубликовали статью в *Nature*, где расширили ареал неандертальцев на 2000 км восточнее. Это было сделано на основе анализа неандертальской мтДНК, выделенной из косточек, найденных на Алтае в пещере Окладникова [32].

В начале 2010-го они провели сиквенс мтДНК еще одной косточки, но из Денисовой пещеры на Алтае. Результаты сравнения показали, что неандертальцы отличались от людей по 202 нуклеотидам, а *денисовец* по 385. Откалибровав скорость накопления мутаций, получили время отделения денисовца около миллиона лет. Значит, косточка не принадлежала ни неандертальцу, ни человеку. Но у них был только ее кусочек, недостаточный для анализа ядерной ДНК, а в Новосибирске была ее большая часть.

Пэабо срочно организовал визит в Сибирь и узнал, что бесценную косточку отдали конкуренту Рубину в Беркли. Вернувшись в Лейпциг, они стремительно оформили свои результаты в статью для *Nature* с названием «Полный митохондриальный геном неизвестного гоминида из Южной Сибири». В ней *впервые новая форма* вымерших людей была описана на основании *последовательности ДНК*. Первоначально новую форму назвали *Homo altaiensis*, однако по рекомендации рецензента название исключили. Статья вышла в *Nature* в апреле 2010-го [33]. В последствии Пэабо не раз мысленно благодарил рецензента.

При анализе ядерной ДНК из остатков косточки не нашли фрагментов У-хромосом так, что «Мисс Икс», как они ее назвали, оказалась девочкой. По СНИПам мисс икс и неандерталец были более близки между собой, чем с сапиенсом. Встал вопрос, почему денисовская

мтДНК сильно отличается от неандертальской, а ядерный геном нет. Может быть, у мисс икс в предках были неандертальцы и архаичная человеческая форма. В любом случае, стало ясно, что популяция, к которой принадлежала мисс икс, отделилась от неандертальцев до того, как те повстречали сапиенсов. Эту популяцию Пэабо предложил назвать «денисовцы».

Кроме того у мисс икс оказалось больше одинаковых СНИПов с папуасами, чем с китайцами, европейцами и африканцами. Затем с помощью генетических карт неандертальцев и денисовцев они установили, что примерно 2,5 % генофонда неафриканцев унаследовано от неандертальцев, а более поздний вклад денисовцев привнес в генофонд папуасов 4,8 %. В их ДНК присутствует небольшой и неандертальский компонент. Следовательно, для сапиенсов, осваивающих новые пространства, скрещивание с архаичными формами было нередким явлением. Статью с результатами в августе отправили в *Nature* и после всех этапов рецензирования она вышла 23 декабря 2010-го [34].

В те декабрьские дни Пэабо чувствовал полное удовлетворение, какое не испытывал за всю свою научную жизнь. Увлечение в студенческие годы, переросшее в проект из области научной фантастики, *триумфально завершено*. Он и не мечтал о таких достижениях [1], [13].

Палеогеномная революция. С разработанными методами выделения ДНК и секвенаторами нового поколения статьи по палеогеномике публикуются одна за другой. В своем обзоре «Древняя ДНК и история человека», опубликованном в PNAS в 2016-м, профессор Слаткин привел сотни статей по реконструкции геномов ископаемых людей со всех континентов и назвал этот период «палеогеномной революцией» [35]. Несколько самых важных открытий показывают, какой огромный научный потенциал имеет палеогеномика в целом.

На основе анализа ДНК из косточки возраста 45 тыс. лет, найденной в Сибирском Ишиме, группа Пэабо в 2014-м установила, что он принадлежит сапиенсу. В его геноме 2 % неандертальской ДНК, но нет денисовской и он такой же, как у европейских охотников и азиатов. Значит, популяция сапиенсов, обитавшая в Сибири 45 тыс. лет назад, сформировалась раньше, чем разделились предки азиатов и европейцев. Так как неандертальские фрагменты в геноме ишимца оказались длиннее чем, чем у современных сапиенсов из-за большего количества рекомбинаций, установили число поколений и время 50–60 тыс. лет назад, когда сапиенсы, покинувшие Африку, скрещивались на Ближнем Востоке с неандертальцами. Затем одни популяции сапиенсов мигрировали в Азию, а другие в Европу. И эта картина древних миграций установлена благодаря молекулам ДНК из косточки [36].

В ходе анализа распределения неандертальских фрагментов в хромосомах современных людей с разных континентов установлено, что неандертальские вставки реже встречаются в функциональных участках генома и в генах, работающих в семенниках, чем в нейтральных участках. Значит, отбор *выбраковывал вредные неандертальские примеси у человека* [37].

Используя современные базы данных по медицинской генетике, исследователи установили *связь между 1500 неандертальскими СНИПами и риском развития пятидесяти патологий*. Наиболее значимые результаты получились по депрессии, аффективным расстройствам и заболеваниям кожи [38].

Другой пример – древний ген EPAS1, кодирующий транскрипционный фактор, который регулирует давление и работу сердечной мышцы. У жителей Тибета, испытывающих недостаток кислорода, работают особые аллели этого гена. Очевидно, что увеличенная их частота в популяции является адаптацией к высокогорным условиям. За пределами Тибета эти аллели крайне редки, но они найдены у денисовца. Значит, тибетцы сохранили наследие денисовских людей, доставшееся им от древних потомков денисовцев и сапиенсов [39].

Эти примеры наглядно показывают, что палеогеномная революция, инициированная благодаря исследованиям Пэабо, открывает новые горизонты. Только вдохновенный и самоотверженный человек мог совершить такой колоссальный научный прорыв. Создать научное направление, вызывающее интерес всех мыслящих людей. ***Нобелевская премия молекулярному генетику Пэабо*** закономерна и несомненно ***укрепила авторитет науки***.

Обзорная работа частично проводилась в рамках задания «Оценка состояния генофондов ценных видов шмелей Юго-Востока Беларуси на основе методов ДНК-анализа» ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 гг.

Литература

1. Гончаренко, Г. Г. Триумф молекулярной палеогенетики и профессора Пääбо / Г. Г. Гончаренко // Кто зажигает звезды на небосклоне науки. – Гомель, 2023. – 136 с.
2. Pääbo, S. Preservation of DNA in ancient Egyptian mummies / S. Pääbo // Journal of Archaeological Sciences. – 1985. – V. 12. – P. 411–417.
3. Pääbo, S. Molecular cloning of ancient Egyptian mummy DNA / S. Pääbo // Nature. – 1985. – V. 314. – P. 644–645.
4. Mullis, K. B. Specific synthesis of DNA in vitro a Polymerase Catalysed Chain Reaction / K. B. Mullis, F. A. Falloona // Methods in Enzymology. – 1987. – V. 155. – P. 335–349.
5. Pääbo, S. Polymerase chain reaction reveals cloning artifacts / S. Pääbo, A. Wilson // Nature. – 1988. – V. 334. – P. 387–388.
6. Pääbo, S. Mitochondrial-DNA sequences from a 7,000-year-old brain / S. Pääbo, J. Gifford, A. Wilson // Nucleic Acids Research. – 1988. – V. 16. – P. 9775–9787.
7. Thomas, R. DNA phylogeny of the extinct marsupial wolf / R. Thomas, W. Schaffner, A. Wilson, S. Pääbo // Nature. – 1989. – V. 340. – P. 465–467.
8. Pääbo, S. Ancient DNA – Extraction, characterization, molecular cloning, and enzymatic amplification / S. Pääbo // PNAS. – 1989. – V. 86. – P. 1939–1943.
9. Höss, M. DNA extraction from Pleistocene bones by a silica-based purification method / M. Höss, S. Pääbo // Nucleic Acids Research. – 1993. – V. 21 (16). – P. 3913–3914.
10. Höss, M. Mammoth DNA sequences / M. Höss, S. Pääbo // Nature. – 1994. – V. 370. – P. 333.
11. Höss, M. Excrement analysis by PCR / M. Höss, M. Kohn, S. Pääbo, F. Knauer, W. Schröder // Nature. – 1992. – V. 359. – P. 199.
12. Höss, M. Molecular phylogeny of the extinct ground sloth *Myiodon darwinii* / M. Höss, A. Dilling, A. Currant, S. Pääbo // PNAS. – 1996. – V. 93. – P. 181–185.
13. Pääbo, S. Neanderthal Men. In Search of Lost Genomes / S. Pääbo // Basic Books, A Member of the Perseus Books Group. – New York, 2014. – 296 p.
14. Handt, O. Molecular genetic analyses of the Tyrolean Ice Man / O. Handt, M. Richards, M. Trommsdorff, C. Kilger, J. Simanainen [et al.] // Science. – 1994. – V. 264. – P. 1775–1778.
15. Krings, M. Neanderthal DNA sequences and the origin of modern humans / M. Krings, A. Stone, R. Schmitz [et al.] // Cell. – 1997. – V. 90. – P. 19–30.
16. Krings, M. A view of Neanderthal genetic diversity / M. Krings, C. Capelli, F. Tschentscher [et al.] // Nature genetics. – 2000. – V. 26. – P. 144–146.
17. Kaessmann, H. DNA sequence variation in non-coding region of low recombination on the human chromosome / H. Kaessmann, F. Heisig, F. Haeseler S. Pääbo / Nature genetics. – 1999. – V. 22. – P. 78–81.
18. Kaessmann, H. Extensive nuclear DNA sequence diversity among chimpanzees / H. Kaessmann, V. Wiebe, S. Paabo // Science. – 1999. – V. 286. – P. 1159–1162.
19. Kaessmann, H. Great ape DNA sequences reveal a reduced diversity and an expansion in humans / H. Kaessmann, V. Wiebe, G. Weiss, S. Pääbo // Nature genetics. – 2001. – V. 27. – P. 155–156.
20. Greenwood, A. Nuclear DNA sequences from late Pleistocene megafauna / A. Greenwood, C. Capelli, G. Possnert, S. Pääbo // Nuclear Molecular Biology and Evolution. – 1999. – V. 16. – P. 1466–1473.
21. Sanger, F. DNA sequencing with chain-terminating inhibitors / F. Sanger, S. Nicklen, A. Coulson // PNAS. – 1977. – V. 74. – P. 5463–5467.
22. Гончаренко, Г. Г. Сэнгеровская эпоха ДНК-секвенирования / Г. Г. Гончаренко // Известия ГГУ им Ф. Скорины. – 2022. – № 3 (132). – С. 128–130.
23. Noonan, J. Genomic sequencing of Pleistocene cave bears / J. Noonan, M. Hofreiter, D. Smith, J. Priest, [et al.] // Science. – 2005. – V. 309. – P. 597–599.
24. Poinar, H. Metagenomics to paleogenomics : large-scale sequencing of mammoth DNA / H. Poinar, C. Schwarz, J. Qi [et al.] // Science. – 2006. – V. 311. – P. 392–394.
25. Venter, J. The sequence of the human genome / J. Venter, M. Adams, E. Myers, R. Ural [et al.] // Science. – 2001. – V. 291. – P. 1304–1351.
26. Noonan, J. Sequencing and analysis of Neanderthal genomic DNA / J. Noonan, G. Coop, S. Kudaravalli [et al.] // Science. – 2006. – V. 314. – P. 1113–1118.
27. Green, R. Analysis of one million base pairs of Neanderthal DNA / R. Green, J. Krause, S. Ptak [et al.] // Nature. – 2006. – V. 444. – P. 330–336.
28. Maricic, T. Optimization of 454 sequencing library preparation from small amounts of DNA permits sequence determination of both DNA strands / T. Maricic, S. Paabo // Biotechniques. – 2009. – V. 46. – P. 51–57.

29. Green, R. A complete Neandertal mitochondrial genome sequence determined by high-throughput sequencing / R. Green, A. Malaspina, J. Krause [et al.] // *Cell*. – 2008. – V. 134. – P. 416–426.
30. Green, R. A draft sequence of the Neandertal genome / R. Green, J. Krause, A. Briggs [et al.] // *Science*. – 2010. – V. 328. – P. 710–722.
31. Abi-Rached, L. The shaping of modern human immune systems by multiregional admixture with archaic humans / L. Abi-Rached, M. Jobin, S. Kulkarni [et al.] // *Science*. – 2011. – V. 334. – P. 89–94.
32. Krause, J. Neanderthals in central Asia and Siberia / J. Krause, L. Orlando, D. Serre [et al.] // *Nature*. – 2007. – V. 449. – P. 902–904.
33. Krause, J. The complete mitochondrial DNA genome of an unknown hominin from southern Siberia / J. Krause, J. Good, B. Viola [et al.] // *Nature*. – 2010. – V. 464. – P. 894–897.
34. Reich, D. Genetic history of an archaic hominin group from Denisova Cave in Siberia / D. Reich, R. Green, M. Kircher [et al.] // *Nature*. – 2010. – V. 468. – P. 1053–1060.
35. Slatkin, M. Ancient DNA and human history / M. Slatkin, F. Rasimo // *PNAS*. – 2016. – V. 113. – P. 6380–6387.
36. Fu, Q. Genome sequence of a 45,000-year-old modern human from western Siberia / Q. Fu, H. Li, P. Moorjani [et al.] // *Nature*. – 2014. – V. 514. – P. 445–449.
37. Sankararaman, S. Genomic landscape of Neanderthal ancestry in present-day humans / S. Sankararaman, S. Mallick, M. Dannemann [et al.] // *Nature*. – 2014. – V. 507. – P. 354–357.
38. Simonti, C. The phenotypic legacy of admixture between modern humans and Neanderthals / C. Simonti, B. Vernot, L. Bastarache [et al.] // *Science*. – 2016. – V. 351. – P. 737–741.
39. Huerta-Sánchez, E. Altitude adaptation in Tibetans caused by introgression of Denisovan-like DNA / E. Sánchez, X. Jin, Asan, Z. Bianba [et al.] // *Nature*. – 2014. – V. 512. – P. 194–197.

Цитогенетическое действие радиационного облучения на ихтиофауну водных объектов Полесского радиационно-экологического заповедника

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

В статье представлены результаты анализа зависимости спонтанной частоты микроядер и дозы внутреннего облучения от инкорпорированных радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr и в эритроцитах пресноводных видов рыб с разным типом пищевого поведения, обитающих в водных объектах с разным гидрологическим режимом на территории Полесского радиационно-экологического заповедника. Сильная статистическая зависимость установлена между дозовыми значениями и цитогенетическим индексом ($r = 0,88$, $p < 0,05$), которые наблюдаются у вида *Esox lucius* L. проточных водных объектах Полесского радиационно-экологического заповедника. Значения дозы внутреннего облучения и цитогенетический индекс имеют достоверные различия у разных видов рыб, обитающих в водных объектах с разным гидрологическим режимом.

Ключевые слова: доза облучения, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, цитогенетический показатель.

The article presents the results of the analysis of the dependence of spontaneous frequency of micronuclei and internal radiation doses on incorporated radionuclides of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr and in red blood cells of freshwater fish species with different types of eating behavior living in water bodies with different hydrological regime on the territory of the Polesky Radiation and Ecological Reserve. A strong statistical relationship is established between the dose values and the cytogenetic index ($r = 0.88$, $p < 0.05$) are observed in the *Esox lucius* L. species of flowing water bodies of the Polesky Radiation and Ecological Reserve. Internal exposure dose values and cytogenetic index have significant differences in different fish species living in water bodies with different hydrological regimes.

Keywords: radiation dose, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, cytogenetic index.

Введение. В свете формирования эоцентрического подхода радиационной защиты и выработки безопасных уровней радиационного воздействия Юго-Восточный регион Республики Беларусь представляет собой уникальную территорию для проведения долгосрочных исследований действия радиационного фактора на биоту. В этой связи на территории Полесского радиационно-экологического заповедника созданы условия и ведется работа по радиоэкологическому мониторингу объектов наземной и водной среды. Среди объектов мониторинга определенный научный интерес занимает мониторинг водных объектов проточных, малопроточных и непроточных водоемов зоны отчуждения, расположенных в границах заповедника. Мониторинг биоты водных объектов заповедника представляет собой комплексное исследование содержания радиоактивных изотопов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr чернобыльского происхождения в воде, донных отложениях, растительности; изучаются процессы поступления, накопления, распределения и формирование доз внешнего и внутреннего облучения разных объектов биоты [1].

Среди большого разнообразия объектов биоты водных экосистем значительный интерес имеют аборигенные виды рыб, которые занимают разные трофические уровни в биогеоценозе. В результате многолетних исследований установлено, что у особей 5 наиболее типичных видов рыб карась (*Carassius carassius* L.), окунь (*Perca fluviatilis* L.), плотва (*Rutilus rutilus* L.), лещ (*Abramis brama* L.), щука (*Esox lucius* L.) имеет место аккумуляция в органах и тканях радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr. Ранее установлено [2], что особи, обитающие в непроточных водоемах зоны отчуждения, отличаются высокой удельной активностью и вариацией значений удельной активности радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr. В отношении обозначенных видов в условиях непроточных водоемов в большинстве случаев имеет место устойчивая аккумулятивная последовательность, соответствующая трофической цепочке биогеоценоза.

Хищные виды рыб и рыбы со смешанным типом питания, занимающие верхний трофический уровень, отличаются высокой накопительной способностью; перифитофаги отличаются средним уровнем накопления радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr; представители бентосной их-

тиофауны накапливают радионуклиды ^{137}Cs и ^{90}Sr в наименьшей степени. Следует заметить, данная последовательность может существенно искажаться в зависимости от суммы факторов, обуславливающих конкретные условия локации биогеоценоза.

В результате длительного поступления, накопления и распределения в тканях организма радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr формируется доза внутреннего облучения, которая способствует возникновению цитогенетических изменений. Одним из наиболее выразительных и доступных изменений для обнаружения и исследования на клеточном уровне являются нарушения клеточного деления, обусловленные поражением веретена деления и абберации хромосом, которое проявляется в клетках крови. Хромосомные абберации могут возникать как результат радиационного воздействия на клетки в пре- и синтетической фазы до начала репликации. Абберации сохраняются при клеточном делении, не элиминируются со временем и накапливаются в результате длительного радиационного воздействия, поэтому могут служить в качестве индикатора радиационно-индуцированных эффектов [3].

Таким образом, цель работы состояла в изучении связи между частотой микроядер в эритроцитах рыб с разным типом питания, обитающих в водных объектах с разным гидрологическим режимом Полесского радиационно-экологического заповедника и дозой внутреннего облучения от инкорпорированных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr .

Материалы и методы исследования. В качестве материала исследования использовали данные проб донного грунта, воды, удельной активности ^{137}Cs в мышечной ткани, ^{90}Sr в костной ткани, образцы крови рыб с разным типом пищевого поведения. На основании данных удельной активности инкорпорированных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr производили оценку суммарной дозы облучения; в ходе гематологического анализа образцов крови методом световой микроскопии определяли частоту микроядер на 1000 эритроцитов крови рыб следующих видов: карась (*Carassius auratus gibelio* Bloch.), лещ (*Abramis brama* L.), окунь (*Perca fluviatilis* L.), плотва (*Rutilus rutilus* L.) обыкновенная щука (*Esox lucius* L.). Изъятие рыб производили в летний и осенний периоды в течение 2018–2021 гг.; за время проведения исследований изъято 776 экземпляров разных видов пресноводной ихтиофауны. Сбор материала осуществляли на семи участках: замкнутых непроточных водных объектов – озера Вьюры, Жартай, Лядо, Персток, Семеница и проточных водных объектов – русло р. Несвич, Николаевский старик и Старое русло р. Припять.

Река Припять, правый приток Днепра, протяженность 775 км, площадь водосборного бассейна превышает 114 тысяч км², является важным водным объектом Чернобыльской зоны отчуждения. Река пересекает зону отчуждения с севера на юго-запад и на границе 30-ти километровой зоны впадает в Киевское водохранилище. Это равнинная река, заболоченность берегов которой не превышает 15 %. В районе размещения Чернобыльской АЭС русло Припяти искусственно изменено, обустроен судоходный канал протяженностью 11 км. Русло реки проложено в обход водоема-охладителя, технологического водоема, созданного для нужд ЧАЭС. В этом месте река Припять проходит в 200–400 метрах от водоема-охладителя, который отделен от реки искусственной дамбой. Здесь средняя ширина реки колеблется от 100 до 160 м, а средняя глубина составляет 3–4 м. При общей протяженности реки в 780 км в пределах зоны отчуждения длина реки Припять около 50 километров – от деревни Довляды до места ее впадения в Киевское водохранилище. Площадь водосбора составляет около 2000 км².

Озеро Семеница (51°37'14" СШ и 29°47'53" ВД) находится в 34 км на юго-запад от города Хойники и в 1,4 км на юг от населенного пункта Хвощевка. Озеро старичного типа, относится к бассейну реки Припять, является полупроточным водоемом – соединено с рекой Припять. Площадь зеркала 0,21 км², длина около 2,3 км, наибольшая ширина примерно 0,17 км, длина береговой линии 7,8 км. Николаевский старик (51°31'4.02" СШ и 29°54'25.91" ВД) относится к бассейну реки Припять, является полупроточным водоемом. Местность холмистая со сложным рельефом. Берега песчаные, высокие, поросшие кустарником, местами лесом. Площадь зеркала около 0,78 км², длина 4,16 км, наибольшая ширина 0,19 км, длина береговой линии около 12,6 км.

В качестве орудий лова использовались сети трехстенные «Нептун» длина 30 м, высота 1,8 м, размер ячеи 30 мм (2 шт.), 40 мм (2 шт.), 50 мм (2 шт.), 65 мм (2 шт.), 70 мм (2 шт.). При проведении лова рыб одновременно устанавливалось от двух до восьми сетей с разным размером ячеи. Определение видов и анализ биологических показателей рыб проводили общепринятыми в ихтиологических исследованиях методами [4].

Измерение удельной активности образцов проводили в лаборатории спектрометрии и радиохимии Полесского государственного радиационно-экологического заповедника с использованием γ - β -спектрометра МКС-АТ1315. Анализ препаратов крови проводили в лаборатории кафедры зоологии, физиологии и генетики Учреждения образования «Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины» согласно методике МУ № 13-4-2 / 1487 1999. Для каждой особи готовили по два препарата, препараты высушивали, фиксировали и окрашивали по Романовскому [5]. Микроскопический анализ проводили на световом микроскопе OPTITECH XSZ-139 (Ningbo Instrument Co., Ltd China, Китай).

На основании полученных данных общепринятыми методами вариационной статистики определяли основные параметры распределения. Для оценки достоверности различий использовали критерий Стьюдента для уровня статистической значимости $p \leq 0,05$, для оценки статистической зависимости методику корреляционного анализа. Статистическая обработка данных проводилась с помощью пакета прикладных программ Statistica 7.0.

Результаты исследования и их обсуждение. Данные спектрометрического анализа проб донного грунта и воды, представленные в таблице 1, позволяют оценить различия радиационного загрязнения водных объектов с разным гидрологическим режимом.

Таблица 1 – Радиоактивное загрязнение водных объектов

Показатель	Проточный водный объект		Непроточный водный объект	
	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr
Плотность загрязнения донного грунта, кБк/м ²	695,0	43,0	899,0	82,0
Содержание радионуклида в воде, Бк/л	2,79	3,99	2,25	1,18

Из таблицы 1 видно, что плотность загрязнения от радионуклидов ^{137}Cs в донном грунте непроточных водных объектов в 1,29 раза выше, чем в проточных водных объектах; плотность загрязнения от радионуклидов ^{90}Sr в донном грунте непроточных водных объектов в 1,91 раза выше, чем в проточных водных объектах.

Отсюда можно сделать вывод, что в отношении выноса радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr из донных отложений более эффективными являются проточные водные объекты. Содержание ^{137}Cs в проточных водных объектах не более чем на 20 % выше, чем в непроточном водоеме, в тоже время содержание ^{90}Sr в проточных объектах на 70 % больше, чем в непроточных водных объектах.

В результате радиоспектрометрического анализа мышечной и костной ткани рыб разных видов получены средние значения удельной активности радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr для водных объектов с различающимся гидрологическим режимом (таблица 2).

Из таблицы 2 видно, что достоверные различия удельной активности ^{137}Cs в мышечной ткани рыб, обитающих в водных объектах с разным гидрологическим режимом, наблюдаются у леща и окуня ($p < 0,05$). Среднее удельное содержание радионуклидов ^{137}Cs у леща, обитающего в непроточных водных объектах, в 1,6 раза больше, чем у леща полупроточных водных объектах и в 2,9 раза больше, чем у леща проточных водных объектах.

Таблица 2 – Удельная активность радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr , Бк/кг

Вид	Нуклид	Водный объект		
		Проточный	Полупроточный	Непроточный
Карась (n = 24)	^{137}Cs	47,4 ± 9,3	78,6 ± 29,7	47,1 ± 19,2
	^{90}Sr	148,5 ± 37,4	155,0 ± 58,6	116,5 ± 47,6
Лещ (n = 54)	^{137}Cs	75,7 ± 11,8	123,4 ± 20,7	41,7 ± 7,5
	^{90}Sr	123,7 ± 16,6	225,7 ± 10,8	202,4 ± 64,4
Окунь (n = 134)	^{137}Cs	144,2 ± 15,4	237,7 ± 25,9	106,5 ± 10,0
	^{90}Sr	112,3 ± 3,1	96,7 ± 16,0	98,8 ± 13,2
Плотва (n = 331)	^{137}Cs	103,8 ± 17,2	135,9 ± 12,7	470,9 ± 79,5
	^{90}Sr	76,5 ± 14,3	43,4 ± 8,8	451,4 ± 35,5
Щука (n = 233)	^{137}Cs	698,5 ± 96,9	518,6 ± 95,5	347,3 ± 57,5
	^{90}Sr	535,3 ± 32,7	188,2 ± 10,2	1817,7 ± 471,1

Среднее удельное содержание радионуклидов ^{137}Cs у окуня, обитающего в полупроточных водных объектах, в 1,7 раза больше, чем у окуня, обитающего в проточных водных объектах, и в 2,2 раза больше, чем у окуня, обитающего в непроточных водных объектах. Среднее удельное содержание радионуклидов ^{90}Sr в костной ткани имеет достоверные различия у плотвы и щуки, обитающих в водных объектах с разным гидрологическим режимом ($p < 0,05$). Среднее удельное содержание радионуклидов ^{90}Sr у плотвы проточных водных объектах в 2,8 раза больше, чем у плотвы, обитающей в полупроточных водных объектах и в 1,2 раза больше, чем у плотвы, обитающей в непроточных водных объектах.

В таблице 3 представлены данные средние годовые дозы внутреннего облучения от радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr у рыб с разным типом пищевого поведения.

Таблица 3 – Дозы внутреннего облучения, мГр/сут

Вид	Тип	Водный объект		
		Проточный	Полупроточный	Непроточный
Карась	Бентофаг	$2,46 \pm 0,61$	$2,70 \pm 1,02$	$1,98 \pm 0,81$
Лещ	Бентофаг	$2,22 \pm 0,30$	$3,98 \pm 0,26$	$3,25 \pm 1,01$
Окунь	Зоофаг	$2,36 \pm 0,12$	$2,55 \pm 0,36$	$1,98 \pm 0,25$
Плотва	Пери/зоофаг	$1,63 \pm 0,29$	$1,28 \pm 0,19$	$4,62 \pm 0,54$
Щука	Зоофаг	$1,28 \pm 0,94$	$5,21 \pm 0,59$	$8,97 \pm 0,73$

Из таблицы 3 видно, что у рыб с разным типом пищевого поведения, обитающих в водных объектах с разным гидрологическим режимом, наблюдаются достоверные различия доз внутреннего облучения. Среди видов рыб наибольшие дозы внутреннего облучения имеют щука, плотва и линь, обитающие в непроточных водных объектах. Среди перечисленных видов у щуки как крупного зоофага средняя доза внутреннего облучения в 2,7 раза превышает дозу облучения бентофагов и в 1,9 раза дозу облучения перифагов.

В таблице 4 представлены данные частоты микроядер в эритроцитах у рыб разных видов и типов пищевого поведения, отловленных на водных объектах с разным гидрологическим режимом и уровнем радиоактивного загрязнения.

Из таблицы 4 видно, что максимальная частота микроядер наблюдается у щуки, обитающей в непроточных водных объектах Полесского радиационно-экологического заповедника; следует отметить, что в непроточных водных объектах цитогенетический показатель достоверно больше, чем в проточных и полупроточных водных объектах ($p < 0,05$).

Таблица 4 – Частота микроядер у рыб с разным типом пищевого поведения, ‰

Вид	Тип	Водный объект		
		Проточный	Полупроточный	Непроточный
Карась	Бентофаг	$1,62 \pm 0,25$	$1,33 \pm 0,26$	$2,35 \pm 0,15$
Лещ	Бентофаг	$1,16 \pm 0,27$	$0,92 \pm 0,23$	$1,41 \pm 0,25$
Окунь	Зоофаг	$1,67 \pm 0,12$	$1,61 \pm 0,10$	$2,12 \pm 0,12$
Плотва	Пери/зоофаг	$1,01 \pm 0,18$	$1,33 \pm 0,12$	$1,35 \pm 0,25$
Щука	Зоофаг	$2,30 \pm 0,19$	$2,67 \pm 0,28$	$3,68 \pm 0,32$

Полученный результат хорошо согласуется с данными аккумулятивной способности радионуклидов у этого вида рыб [6]. Минимальные показатели частоты микроядер наблюдаются у плотвы и леща, для рыб этих видов не установлено достоверного различия частоты микроядер относительного гидрологического режима водного объекта, в котором они обитают ($p > 0,05$). Методом корреляционного анализа оценена статистическая связь между значениями дозы облучения и цитогенетическим показателем частоты аберраций в эритроцитах рыб с разным типом пищевого поведения, обитающих в водных объектах с разным гидрологическим режимом. В результате анализа установлено, что для проточных объектов имеет место сильная положительная статистическая зависимость, $r = 0,88$ ($p < 0,05$), для полупроточных и непроточных водных объектов статистическая зависимость средней силы $r = 0,57$ ($p < 0,05$) и $r = 0,67$ ($p < 0,05$) соответственно.

Заключение. Между дозой внутреннего облучения от инкорпорированных в организме пресноводных видов рыб с разным типом пищевого поведения радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr и спонтанной частотой микроядер в эритроцитах наблюдается статистическая зависимость сильной и средней силы ($p < 0,05$). Наиболее выраженная зависимость между дозовыми значениями и цитогенетическим индексом ($r = 0,88$, $p < 0,05$) наблюдаются в проточных водных объектах Полесского радиационно-экологического заповедника. Значения дозы внутреннего облучения и цитогенетический индекс имеют достоверные различия у разных видов рыб, обитающих в водных объектах с разным гидрологическим режимом. Среди рыб с разным типом пищевого поведения наибольшие значения доз внутреннего облучения и значения цитогенетического индекса наблюдаются у вида *Esox lucius* L. $8,97 \pm 0,73$ мГр/сут; $3,68 \pm 0,32$ ‰, обитающего в непроточных водных объектах Полесского радиационно-экологического заповедника.

Литература

1. Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки : рекомендации Р 52.18.820-2015 : утв. 17.04.2015 г. : введ. 01.09.2015. – Обнинск, 2015 – 65 с.
2. Иванцов, Д. Н. Зависимость накопления ^{137}Cs от промысловой длины хищных видов рыб / Д. Н. Иванцов, А. В. Гулаков, Д. Н. Дроздов // Трансграничное сотрудничество в области экологической безопасности и охраны окружающей среды : VI Международная науч.-практ. конф., Гомель, 2–3 июня 2022 г. : сб. матер. / М-во обр. Республики Беларусь, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол.: А. П. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2022. – С. 38–42.
3. Последствия радиоактивного загрязнения реки Течи : учеб. пособ. для студ. вузов / под ред. А. В. Аклеева. – Челябинск : Книга, 2016. – 400 с.
4. Жуков, П. И. Справочник по экологии пресноводных рыб / П. И. Жуков. – Минск : Наука и техника, 1988. – 310 с.
5. Методические указания по проведению гематологического обследования рыб [Электронный ресурс] : утв. 02.02.1999 г., №13-4-2/1487. – Режим доступа : <https://e-ecolog.ru/docs/pQbF13m1UU6Pwog1f85Wo>. – Дата доступа : 20.11.2023.
6. Гудков, Д. И. Радионуклиды в озерных экосистемах Красненской поймы р. Припять : содержание и распространение в биотических и абиотических компонентах / Д. И. Гудков [и др.] // Доп. АН України. – 2005. – № 5 – С. 187–193.

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²Полесский государственный радиозэкологический заповедник

Поступила в редакцию 24.11.2023

Оценка миграции ^{137}Cs в звене почва–растение пойменного луга реки Сож после катастрофы на ЧАЭС

Н.М. ДАЙНЕКО, С.Ф. ТИМОФЕЕВ

Основная часть запаса ^{137}Cs в почве находится в горизонтах 0–10 см. Происходит миграция радионуклида по профилю почвы. Растительный покров представлен малопоедаемыми видами разнотравья и осоками. Злаковая группа немногочисленная, бобовая группа встречается редко. По содержанию радиоцезия более 80 % проб травостоя соответствовали нормативным значениям.

Ключевые слова: луговые растения, радионуклиды, коэффициент накопления, удельная активность ^{137}Cs , пойменный луг, почва.

The main part of the radionuclide reserve in the soil is located in the 0–10 cm horizons. The migration of the radionuclide takes place along the soil profile. The vegetation cover is represented by poorly eaten species of herbs and sedges. The cereal group is not numerous, the legume group is rare. In terms of radiocesium content, more than 80 % of grass samples corresponded to standard values.

Keywords: meadow plants, radionuclides, accumulation coefficient, specific activity of ^{137}Cs , floodplain meadow, soil.

Введение. Пойменные луга являются наиболее ценными естественными кормовыми угодьями. Существенное влияние на продуктивность и качество травяных кормов в условиях поймы оказывает ботанический состав луговых ассоциаций, тип почвы, хозяйственный режим использования, а также изменение климата.

В последнее время отмечается существенная динамичность луговых сообществ. Происходят колебания обилия отдельных видов луговых трав, а также смена субассоциаций и ассоциаций [1]–[2]. Развитие экосистем в ряде случаев характеризуется процессами сукцессий и флуктуаций. По мнению О.А. Аненхонова, необходимо разграничивать понятия «флуктуация» и «сукцессия» для оценки последствий климатогенных изменений растительности [3]. А.С. Комаров считает, что динамика растительности и почвы взаимосвязаны, и она определяется особенностями биологического круговорота элементов питания [4]. Ф. Клементс [5] был первым, кто рассмотрел динамику растительности с позиций возникновения обратных связей с ее абиотическим окружением, в первую очередь с почвой. Концепция Клементса означает «что бы происходило, если бы ничто не мешало». Все это означает, что в зависимости от происходящих процессов будет существенно изменяться и радиоэкологическая ситуация на пойменных лугах.

Для оценки динамики радиоэкологической ситуации на пойменных лугах необходимо формирование соответствующих баз данных для последующего моделирования. Это позволит выполнять долгосрочный прогноз изменения радиоэкологической ситуации. В связи с этим соответствующие работы проводят как на территории Российской Федерации, так и на территории Республики Беларусь [6]–[10].

Целью исследования являлась оценка миграции ^{137}Cs в звене почва–растение в отдаленный период ликвидации последствий катастрофы на ЧАЭС.

Объекты и методика исследования. Объектом исследований служили почвенные пробы и растительные образцы наземной фитомассы луговых растений, отобранные в вегетационные периоды 2022–2023 гг. в фазу колошения видов доминантов в пойме р. Сож на луговых ассоциациях вблизи населенного пункта Отор Чечерского района Гомельской области.

Радиологический анализ почвенных проб и растительных образцов выполнялся радиометрическим методом с использованием бета-гамма-спектрометра «МКС АТ1315».

Пойменный луг расположен вдоль правого берега р. Сож между н.п. Красный Дворец и Ипполитовка Чечерского района. Длина около 4000 м. Ширина в наиболее узкой части 130 м, наиболее широкой части около 1800 м. Поперечный профиль пойменного луга нахо-

дится в следующих пределах. Координаты начала профиля $52^{\circ}57'28.19$ северной широты и $30^{\circ}55'49.07$ восточной долготы. Окончание профиля $52^{\circ}57'11.01$ северной широты и $30^{\circ}55'49.47$ восточной долготы. Высота надпойменной террасы 125 м. Самое низкое место 119 м. Перепад высот около 6 м. Максимальный уклон не превышает 3 %. Территория н.п. Отор находится в зоне радиоактивного загрязнения 5–15 Ки/км². Ландшафтно-экологический профиль был заложен на отметках 121–119 м, то есть на наиболее низких элементах рельефа. Объекты обследования формировали, начиная от русла р. Сож по направлению к н.п. Отор. Количество объектов исследований составляло от 16 в 2022 г. до 9 в 2023 г. Отбор проб почвы производили специальным пробоотборником диаметром 83 мм по горизонтам через 5 см до глубины 20 см.

Результаты исследований. В условиях 2022 г. наибольшее содержание радионуклида было выявлено в слое 0–10 см. Амплитуда варьирования параметра составляла от 266 до 5145 Бк/кг. Для слоя 10–20 см эти параметры составили соответственно 39 и 2502 Бк/кг. Среднее содержание радионуклида в почве варьировало от 423 Бк/кг до 3823 Бк/кг. В пересчете на плотность радиоактивного загрязнения эти величины составили 3 и 26 Ки/км².

Установлено, что в большинстве проб основное количество радионуклида, более 80 %, находилось в слое 0–10 см. В слое 10–20 см выявлено от 3 до 30 % радионуклида.

В условиях 2023 г. содержание радионуклида в почве составляло от 416 до 4066 Бк/кг, то есть различия достигали одного порядка. Исследованиями не установлено какой-либо закономерности по изменению удельной активности ^{137}Cs в почве по маршруту профиля за исключением почвы объекта, расположенного на наиболее низкой и заболоченной части луга, где была выявлена максимальная удельная активность радионуклида.

В ходе исследований оценивали распределение радионуклида по профилю почвы. В горизонтах почвы 0–5 см сосредоточено от 25 до 44 % общего запаса радионуклида при среднем значении около 35 %. Для горизонта 5–10 см эти значения составили соответственно 38–59 и 50 %. Для слоя 10–15 см показатели были 2,5–34,6 и 13,5 %. В четвертом слое были минимальные значения радионуклида. В среднем около 2 % (рисунок 1).

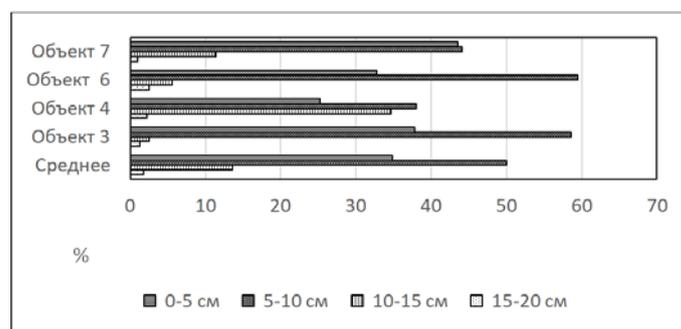


Рисунок 1 – Распределение радионуклида по горизонтам почвы объектов окрестностей н.п. Отор Чечерского района, 2023 г.

Таким образом, на пойменных лугах продолжается миграция радионуклида по почвенному профилю. В слоях 0–5 и 5–10 см сосредоточено примерно одинаковое количество радионуклида. На заливном луге в окрестностях н.п. Отор основное количество радионуклида продолжает находиться в слое 0–10 см. В немалой степени это связано не только с фиксацией и старением радионуклида, но и отсутствием отвальной обработки почвы.

Основой травостоя пойменных лугов является видовое разнообразие луговых трав. Сроки формирования травостоя, его качество зависят от режима затопления. Подразумевается не только продолжительность затопления, но и рельеф речной долины. Установлено, что более продолжительное затопление пойменного луга было в 2023 г. Речная долина имеет достаточно ровную поверхность с уступами, параллельными течению реки Сож.

Изучение флористического состава показало, что исследуемые виды растений относятся к 15 видам, 11 родам и 8 семействам.

Выявлена существенная деградация травостоя пойменного луга. Количество видов трав на объектах варьировали от 2 до 5. Подтверждением этого являются и результаты анализа агроботанического состава травостоя. Так в 2023 г. из 26 отобранных проб 12 – это разнотравье, 9 – осоки, 5 видов – злаки. Бобовый компонент отсутствует. Виды разнотравья характеризуются низким кормовым достоинством.

На большинстве объектов основой является разнотравье. На объекте 2 зафиксировано пять видов разнотравья, на объекте 3 доминируют злаки, на объекте 4 зафиксированы два вида разнотравья и один вид осоки. Наиболее частым сочетанием является разнотравье и осоки.

В условиях 2022 г. содержание радиоцезия в травостое варьировало от 40 до 986 Бк/кг при среднем значении 457 Бк/кг. Превышения нормативов (1300 Бк/кг) по данному параметру не установлено.

В условиях 2023 г. выявлены более значительные различия по количеству радиоцезия в травостое. Содержание радиоцезия в травостое составляло от 146 до 3485 Бк/кг (рисунок 2). Это может быть связано с более продолжительным затоплением луга.

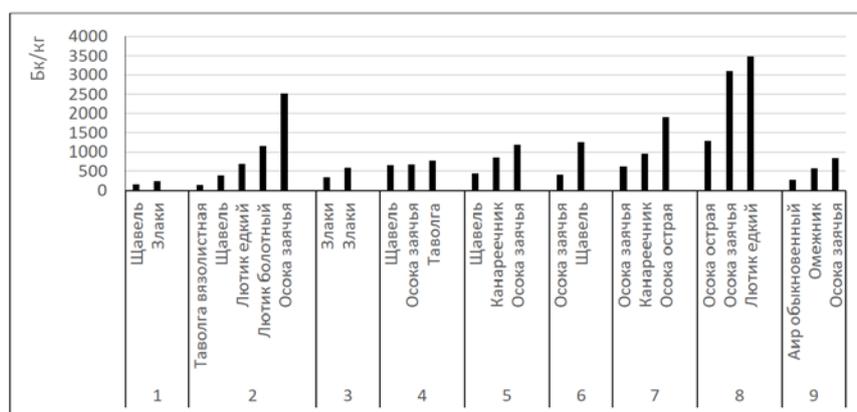


Рисунок 2 – Содержание радиоцезия в травостое пойменного луга по объектам

Установлено, что по мере удаления от русла реки и понижения рельефа происходит увеличение средних значений содержания радиоцезия в травостое объектов (рисунок 3). Для более корректной оценки полученных результатов количественные показатели отсортировали в порядке увеличения значений (рисунок 4).

В результате ранжирования по данному параметру получены следующие результаты. По содержанию в растениях радионуклида до 500 Бк/кг выделены 8 видов. Из них 5 видов это разнотравье, 2 вида злаки и 1 вид осока.

В группе от 500 до 1000 Бк/кг выделены 10 видов. Это 4 вида разнотравья и по 3 вида злаков и осок.

В группе 1000–1300 Бк/кг выделены два вида разнотравья и два вида осоковых. От 1300 до 2000 Бк/кг выделен один вид осоки.

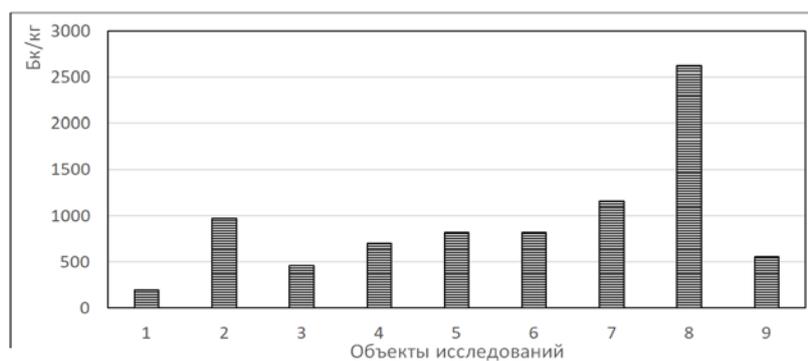


Рисунок 3 – Среднее содержание радиоцезия в травостое объектов

Самой многочисленной была первая группа. В нее вошло 12 видов растений. Преобладали растения группы разнотравья – 7 проб, осоки – 3 пробы, злаки – 2 пробы. Вторая и третья группа содержали по 5 проб. Во второй группе преобладало разнотравье. Виды растений со значениями КН более 2 были немногочисленные. Наибольшие значения КН выявлены для осоковых и разнотравья. Было выделено 5 групп. 0,1–0,5; 0,6–1,0; 1,1–1,5; 2–3, более 3 Бк/кг:Бк/кг.

Заключение. Таким образом, почвенный покров полигона характеризуется относительно равномерным содержанием радионуклида за исключением одного объекта. Это может быть связано с нахождением в наиболее низкой, болотистой части профиля. Основная часть запаса радионуклида находится в горизонтах 0–10 см. Имеет место миграция радионуклида по профилю почвы.

Растительный покров пойменного луга характеризуется деградированным состоянием, связанным с интенсивной нагрузкой и отсутствием в течение ряда лет затопления. Растительный покров представлен в основном малопоедаемыми видами разнотравья и осоками. Злаковая группа немногочисленная, бобовая группа встречается редко.

По содержанию радиоцезия более 80 % проб травостоя соответствовали нормативным значениям. Около 50 % проб травостоя имели значения КН до 1,00 Бк/кг:Бк/кг.

Литература

1. География почв / Г. В. Добровольский, И. С. Урусевская. – М. : Колос, 2004. – 460 с.
2. Дайнеко, Н. М. Состав и структура пойменных лугов бассейна р. Сож : монография / Н. М. Дайнеко, С. Ф. Тимофеев. – Чернигов : Десна Полиграф, 2020. – 208 с.
3. Аненхонов, О. А. Климатогенные изменения растительных сообществ : флуктуации или сукцессии? / О. А. Аненхонов // Растительный мир азиатской России. – 2010. – № 2 (6). – С. 1–6.
4. Комаров, А. С. Модели сукцессии растительности и динамики почв при климатических изменениях / А. С. Комаров // Компьютерные исследования и моделирование – 2009. – Т. 1, № 4. – С. 405–413.
5. Clements, F. E. Plant succession : an analysis of the development of vegetation / F. E. Clements. – Washington : Carnegie Institution of Washington, 1916. – 664 p.
6. Крупномасштабное агрохимическое и радиологическое обследование почв сельскохозяйственных угодий Беларуси : методические указания / Науч. ред. академик ААНРБ И. М. Богдевич. – Минск : Бел. изд. Тов-во «Хата», 2001. – 60 с.
7. Сотникова, Н. А. База данных по технологиям ведения растениеводства на радиоактивно загрязненных территориях, составленная по результатам научных исследований / Н. А. Сотникова, А. В. Панов, Д. Н. Курбаков // Агрохимический вестник. – 2015. – № 2. – С. 15–18.
8. Прудников, П. В. Агрохимическое и агроэкологическое состояние почв Брянской области / П. В. Прудников, С. В. Карпеченко, А. А. Новиков [и др.]. – Брянск : Изд-во ГУП «Клинцовская городская типография», 2007. – 608 с.
9. Панов, А. В. Оценка факторов, влияющих на изменение плотности загрязнения ^{137}Cs сельскохозяйственных угодий / А. В. Панов, Е. Г. Иванова, В. М. Соломатин [и др.] // Доклады РАСХН. – 2011. – № 2. – С. 28–31.
10. Дайнеко, Н. М. Накопление ^{137}Cs экологическими группами прибрежно-водной растительности пойменных лугов реки Сож / Н. М. Дайнеко, С. Ф. Тимофеев // Радиационная гигиена. – 2023. – № 16 (4). – С. 44–54.

Вариант методики ретроспективного моделирования годовых доз биоэффектов солнечного УФ излучения

Н.В. Дорожко, Е.И. Сидоркина, Л.Н. Турышев, А.Г. Светашев

Разработана и применена методика ретроспективного анализа доз биоэффектов приземного солнечного УФ излучения. Отмечена перспективность предложенного подхода модельной оценки, которая в сочетании с данными о прозрачности водных слоев в УФ диапазоне 285–400 нм позволит распространить данные оценки на водные системы природных и техногенных водоемов Беларуси, а также Антарктического региона.

Ключевые слова: ретроспективное моделирование, дозы, биоэффет, излучение.

A method for retrospective analysis of doses of bioeffects of surface solar UV radiation has been developed. The proposed approach of the model assessment is shown to be promising, which, in combination with the data on the transparency of water layers in the UV range of 285–400 nm, will make it possible to extend the assessment data to the water systems of natural and man-made water bodies of Belarus, as well as the Antarctic region.

Keywords: retrospective modeling, doses, bioeffect, radiation.

При проведении климатических исследований воздействия солнечного УФ излучения на биологические и экологические системы представляет интерес сопоставление и анализ данных за большие периоды времени.

В работе представлен вариант методики численного моделирования мощностей доз основных биоэффектов, позволяющий проводить как ретроспективные, так и прогнозные исследования УФ облученности для локальных пунктов наблюдения. Методика может быть использована для исследования обширных территорий и позволяет проводить валидацию по спутниковым данным.

На рисунке 1 изображена блок-схема алгоритма ретроспективного численного моделирования месячных и годовых доз основных биоэффектов приземного солнечного ультрафиолетового излучения, согласно использованной методике.

В основе методики заложен оптимальный метод расчета суточных доз биоэффекта эритемы, разработанный в НИИЦ МО БГУ и апробированный в процессе многолетних инструментальных исследований УФ облученности поверхности и водных сред на территории Республики Беларусь и в Антарктическом регионе при проведении сезонных Белорусских антарктических экспедиций [1]–[3].

Расчёт сезонных и годовых эритемных доз в рамках основного базового алгоритма, разработанного на основе пакета LibRadtran 2.0 [4] с использованием наземных и спутниковых данных, требует много времени, таким образом, для климато-биологических исследований возникает задача оптимизации расчетов.



Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма численного моделирования доз биоэффектов приземного солнечного УФ излучения

В национальном научно-исследовательском центре мониторинга озоносферы БГУ Ю.И. Атрашевским был разработан вариант оптимизации расчетов, однако он требовал современных доработок, которые указаны в новой версии, применяемой в данном исследовании.

При расчете необходимо учитывать соотношение суточной дозы биоэффекта эритемы к показателю ультрафиолетового индекса (коэффициент K), это позволяет упростить расчет.

$$K = \frac{S}{UVI}, \quad (1)$$

где S – интегральная суточная эритемная доза ($\text{Дж}/\text{м}^2$), UVI – показатель ультрафиолетового индекса.

В таком случае за показатель УФ индекса принимается мощность эритемной дозы ($\text{Вт}/\text{м}^2$) в полдень, умноженная на 40. Аналитические выражения для спектров действия основных биоэффектов УФ излучения взяты в соответствии с [5].

При наличии графика суточного хода мощности эритемной дозы для каждого дня года коэффициент K будет определяться как отношение площади под графиком к значению дозы в максимуме, умноженному на 40.

В период с 22 июня по 22 декабря Земля находится на минимальном и максимальном расстояниях от Солнца, а значит орбита симметрична. Поскольку годичная кривая также симметричная, то достаточно взять для анализа эти два периода.

Для построения кривой рассчитывались значения коэффициента K для 22-ого дня месяцев: июнь, июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь и декабрь. Для каждого из семи выбранных дней строились показатели отношения солнечного зенитного угла от времени суток. Важным моментом при этом являлось определение продолжительности и разбивка этого показателя на 10 равновеликих интервалов, а также для каждого из 11 временных значений просчитывалась величина зенитного угла.

Для каждого зенитного угла на основе полного базового алгоритма были рассчитаны интегральная мощность дозы УФ-А + УФ-Б (280–400 нм) и мощности доз биоэффекта эритемы с использованием специально разработанной программы libSpec.exe.

Коэффициент K рассчитывался как отношение площади под графиком к значению дозы в максимуме, умноженному на 40.

Рассчитанная зависимость для 22 июня и 22 декабря отображена на рисунке 2.

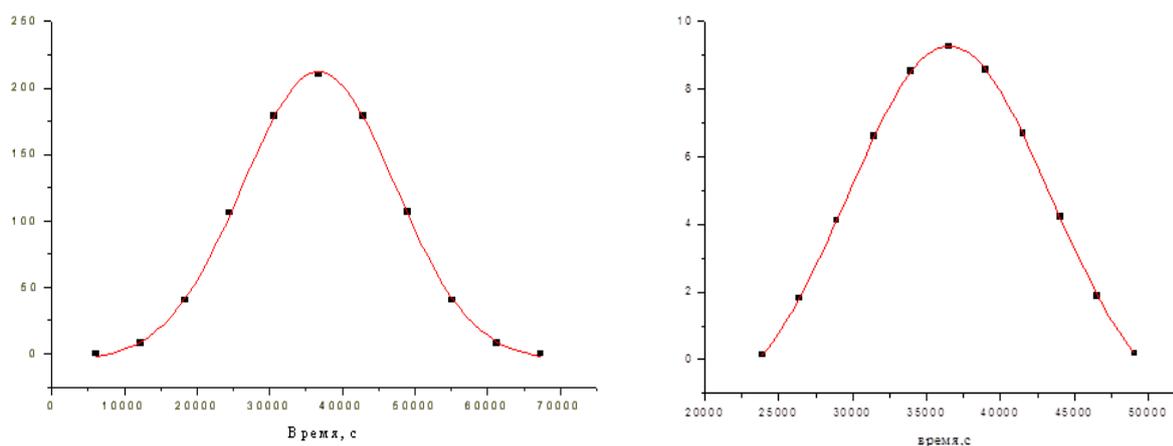


Рисунок 2 – Соотношение мощности эритемной дозы ($\text{мВт}/\text{м}^2$) к времени суток для 22 июня (слева) и 22 декабря (справа)

При этом видно, что максимальное значение коэффициента K в июне относительно немного смещается по времени.

На рисунке 3 показан расчет коэффициента K для семи выбранных дней. Ярko прослеживается снижение показателя в более холодные месяцы.

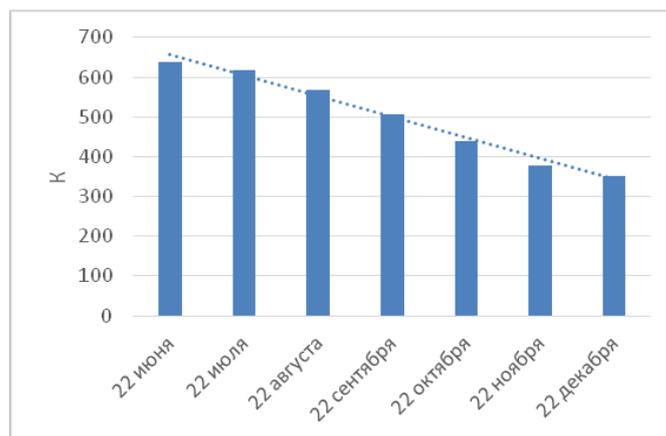


Рисунок 3 – Расчет К для семи выбранных дней по каждому месяцу

При наличии показателей ультрафиолетового индекса в максимуме, с использованием коэффициента К, появляется возможность рассчитывать суточную эритемную дозу, что существенно упрощает процесс и сокращает время проведения расчетов. Для всех основных биологических эффектов солнечного излучения также можно рассчитать схожие коэффициенты.

На рисунке 4 приведено отношение коэффициента К к номеру дня в году с учетом симметрии графика.

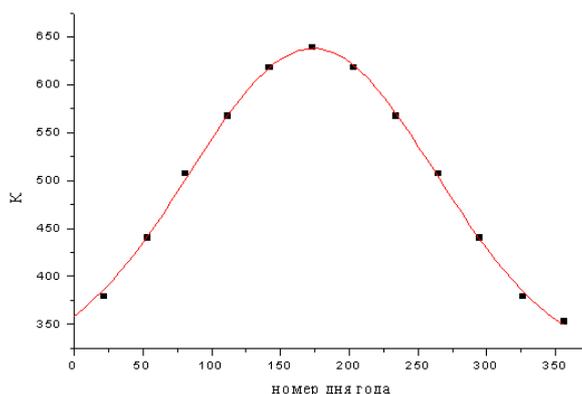


Рисунок 4 – Отношение коэффициента К к номеру дня в году

Выполнен ретроспективный расчет УФ индексов и доз УФ облученности поверхности на оз. Нарочь за 2006 г. и выполнена оценка годовых доз УФ облученности за период 1997–2008 гг. Данные расчетов сопоставлялись с результатами инструментальных наблюдений из архива НИИЦ МО БГУ. В 2006 г. мониторинг приземного излучения проводился на Нарочанской Биологической Станции им. Г.Г. Винберга БГУ с помощью разработанного в НИИЦ МО БГУ ультрафиолетового спектрометра ПИОН-УФ [6]. В автоматическом режиме круглосуточно с интервалом 3 мин. регистрировались спектры распределения спектральной плотности освещенности (СПЭО) поверхности приземным солнечным УФ излучением в диапазоне длин волн 290–450 нм. По спектрам рассчитывались дозы основных биоэффектов и значения УФ индекса. Параллельно определялись значения общего содержания озона в вертикальном столбе атмосферы (ОСО).

Расчет показателей проводился для пункта наблюдения с координатами: 54.9 N, 26.7 E. За варьируемые параметры приняты:

- общее содержание озона в столбе атмосферы (ОСО), ЕД;
- балл облачности (октава по шкале 1–8);
- альbedo подстилающей поверхности (снег, лед, мокрый лед, вода).

Практически во все периоды, за исключением зимних месяцев, использовалось альbedo водной поверхности. По метеорологической дальности видимости производилась оценка аэрозольной составляющей. Данные среднедневного содержания значения ОСО, полученные из архивов наземных измерений НИИЦ МО БГУ и спутниковых систем ОМІ.

Метеорологические параметры для ст. Нарочь получены из архива сайта РУГМЦ pogoda.by. Выбор 2006 г. обусловлен репрезентативностью полученных данных.

Фактор облачности характеризуется следующими показателями:

- 0 – ясно; 1 – малооблачно (1–2 балла);
- 3 – небольшая облачность (3–4 балла);
- 6 – переменная облачность (5–7 баллов);
- 7 – облачно с прояснениями (8–9 баллов);
- 9 – сплошная облачность (10 баллов).

При расчете проводился пересчет в шкалу октав 1–8.

Также значительными параметрами в модели послужили показатели горизонтальной метеорологической дальности видимости, с целью учета аэрозольного ослабления.

По выбранным параметрам проводился расчет УФ индексов для двух случаев: чистая и облачная атмосфера на время 10:00 GMT. Дополнительно рассчитывались мощности дозы облученности прямым и диффузно рассеянным вниз и вверх излучением Солнца в диапазоне 290–400 нм. Далее по значениям ультрафиолетового излучения выполнялся оценочный расчет дневных доз УФ облученности.

Расчетные максимальные значения УФ индекса ≥ 8 согласуются с результатами, полученными экспериментально для Нарочанского региона в другие годы. Возможно, объяснить это можно влиянием более высокого альbedo водной поверхности и более прозрачной атмосферы на рассматриваемой территории по сравнению с Минским мегаполисом.

Следующим этапом было определение годового распределения суточных доз биоэффекта эритема с использованием результатов модельного расчета показателей УФ индекса.

Далее было выполнено интегрирование полученных распределений и рассчитаны суммарные годовые дозы биоэффекта эритема для модели с учетом и без учета влияния облачности. Показатели составили 556 и 434 кДж соответственно.

Следует отметить, что полученные значения хорошо соотносятся со значениями спектрорадиометра ПИОН-УФ при экспериментальном измерении в 2006 г. – 482 кДж.

Полученные результаты позволили провести ретроспективную оценку годовых доз биоэффекта эритемы за период с 1979 по 2008 гг.

Точность ретроспекции существенным образом зависит от возможности использования и точности экспериментальных либо оценочных данных, таких как ОСО, балл облачности, дальность видимости, альbedo и др.

Применение «климатических норм» вместо экспериментальных параметров показало значительное снижение точности ретроспективной оценки (особенно на конкретную дату). Некоторое затруднение вызывает определение «климатические нормы» практически для каждого географического пункта индивидуально из-за пространственной и временной изменчивости параметров.

Ретроспективная оценка суммарных годовых доз эффекта эритемы по результатам численного моделирования представлено на рисунке 5. Выражено изменение показателя и его рост по годам.

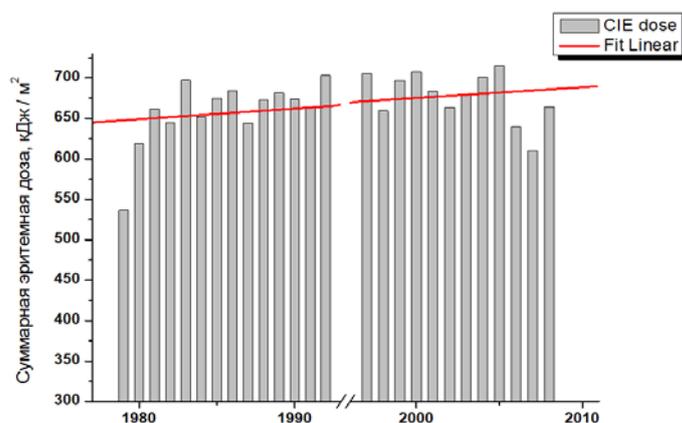


Рисунок 5 – Ретроспективная оценки суммарных годовых доз эффекта эритема по результатам численного моделирования

Появилась возможность провести оценку распределения доз УФ излучения по глубине водоема с использованием результатов численного моделирования и ретроспективной оценки облученности приземным солнечным излучением поверхности водоемов, а также данных об УФ прозрачности водных сред, полученных экспериментально погружаемым фотометром.

Таким образом, проведенные предварительные расчеты показали перспективность подхода и его дальнейшего применения. Целесообразно применять отдельные приложения для улучшения качества расчетов.

Статья выполнена в рамках ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда», подпрограммы «Радиация и биологические системы», НИР «Динамика структурно-функционального состояния наземных и водных экосистем в условиях изменения климата и техногенного воздействия»

Литература

1. Дорожко, Н. В. Оценка общей и ультрафиолетовой облученности поверхности озер по данным наземных наблюдений, на примере озер Нарочанской группы / Н. В. Дорожко, В. Я. Венчиков, В. С. Демин [и др.] // ActaGeographicaSilesiana. – 2020. – № 14/1 (37). – С. 5–12.
2. Darozhka, N. Simulating irradiance of water layers of natural reservoirs by solar radiation in various spectral ranges [Electronic resource] / N. Darozhka, V. Diomin, I. Bruchkouski [et al.] // EGU General Assembly Conference Abstracts. – Mode of access : <http://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-21899>. – Date of access : 01.06.2020.
3. Красовский, А. Н. Алгоритмы и программное обеспечение для численного моделирования доз облученности водных слоев природных водоемов солнечным излучением различных спектральных диапазонов / А. Н. Красовский, Л. Н. Турышев, А. Г. Светашев [и др.] // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению : сб. докладов Междунар. науч. конф. памяти выдающегося русского ученого Ю.Б. Виноградова, Санкт-Петербург, 23–31 октября 2020 г. ; под ред. О. М. Макарьевой, А. А. Землянковой. – СПб., 2020. – С. 106–110.
4. Mayer, B. Libradtran [Electronic resource] / B. Mayer, U. Hamann, C. Emde, A. Kylling. – Mode of access : <http://www.libradtran.org>. – Date of access : 05.02.2008.
5. NSF Polar Programs UV Spectroradiometer Network 1995–1997 Operations Report. – Biospherical Instr. Inc., 1998.
6. Турышев, Л. Н. Спектрорадиометр для мониторинга приземного ультрафиолетового солнечного излучения / Л. Н. Турышев, Ю. И. Атрашевский, В. Н. Денисенко [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2005. – Т. 72, № 2. – С. 262–270.

Особенности вертикального распределения ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am в почвах ближней зоны Чернобыльской АЭС

С.А. КАЛИНИЧЕНКО, В.В. ГОЛОВЕШКИН, С.А. ТАГАЙ

Исследовано вертикальное распределение ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am в почвенном профиле лесных фитоценозов и залежи на территории белорусского сектора ближней зоны ЧАЭС за период 2013–2023 гг. Установлены количественные характеристики миграции радионуклидов в профиле почвы – доля распределения по слоям (%), глубина проникновения центра запаса (см), скорость вертикальной миграции (см/год). Наибольшим содержанием радионуклидов во всех фитоценозах характеризуется слой почвы 0–5 см. Отмечено, что концентрация ^{90}Sr в 5–10 см слое почвы березняка уже превышает содержание данного радионуклида в слое 0–5 см, а в слое 10–30 см отмечается до 20 % ^{90}Sr . В слой почвы 30–100 см всех фитоценозов мигрировало около 8 % ^{137}Cs и 13 % ^{90}Sr , при этом ^{241}Am в этих слоях не обнаружен. Результаты показали, что на особенности вертикального распределения и параметры миграции радионуклидов по профилю почв существенное влияние оказывает режим увлажнения почв в фитоценозах. Подвижность радионуклидов возрастает с увеличением степени гидроморфности почв: автоморфные < полугидроморфные < гидроморфные.

Ключевые слова: радионуклиды, вертикальная миграция, фитоценоз, лесная подстилка, залежь, зона отчуждения ЧАЭС

The vertical distribution of ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am in the soil profile of forest phytocenoses and fallow lands on the territory of the Belarusian sector of the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant for the period of 2013–2023 was studied. The quantitative characteristics of the radionuclides migration in the soil profile have been established – the proportion of distribution over layers (%), the depth of penetration of the storage center (cm), the speed of vertical migration (cm/year). The highest content of radionuclides in all phytocenoses is characterized by the 0–5 cm soil layer. It is noted that the concentration of ^{90}Sr in the 5–10 cm layer of birch forest soil already exceeds the content of this radionuclide in the 0–5 cm layer, and in the 10–30 cm layer up to 20 % of ^{90}Sr is observed. About 8 % of ^{137}Cs and 13 % of ^{90}Sr migrated to the 30–100 cm soil layer of all phytocenoses, while ^{241}Am was not detected in these layers. The results showed that the characteristics of the vertical distribution and migration parameters of radionuclides along the soil profile are significantly influenced by the soil moisture regime in phytocenoses. The mobility of radionuclides increases with increasing degree of soil hydromorphism: automorphic < semihydromorphic < hydromorphic.

Keywords: radionuclides, vertical migration, phytocenose, forest floor, fallow lands, exclusion zone of the CNPP.

Введение. В зону крупномасштабного радиоактивного загрязнения после аварии на Чернобыльской АЭС попали значительные территории Среднерусской возвышенности и Полесской низменности. Наиболее высокие уровни загрязнения были сконцентрированы в радиусе 30 км от ЧАЭС, а также на отдельных участках радиуса 300 км на территории северо-северо-восточного следа выпадений (Гомельская, Могилевская и Брянская области). К настоящему времени уже проведено большое количество исследований по изучению миграции радионуклидов после атмосферных выпадений от ядерных испытаний и аварий на предприятиях ядерного топливного цикла. Опубликован ряд работ по оценке количественных параметров миграции радионуклидов по профилю почв различных типов. Было выявлено определяющее влияние на подвижность радионуклидов основных почвенных свойств, среди которых наиболее важными являются содержание илистой фракции, органического вещества, ёмкость катионного обмена, реакция почвенного раствора, режим увлажнения и др. [1]–[9]. Для загрязнённых после аварии на ЧАЭС территорий Беларуси, России и Украины были установлены наиболее высокие скорости миграции радионуклидов в торфяных почвах и почвах лёгкого гранулометрического состава [4]–[6].

Несмотря на проведённые многочисленные исследования, уникальный по масштабу и составу характер долговременного радиоактивного загрязнения оставляет открытые вопросы о закономерностях и динамике перераспределения радионуклидов в различных ландшафтно-

экологических и почвенно-климатических условиях. Территория Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ), расположенного на юго-востоке Беларуси, является специальным полигоном для мониторинговых наблюдений, которые с течением времени позволяют дать всестороннюю оценку особенностей миграционных процессов в загрязнённом радиоактивными веществами почвенном покрове.

Материалы и методы исследований. Объектами исследования являлись почвы на пробных площадках ПГРЭЗ в пяти типичных фитоценозах, характеризующиеся различной степенью увлажнения и уровнем радиоактивного загрязнения. Закладка пробных площадок производилась в соответствии с ТКП 498-2013 (02080) «Радиационный мониторинг лесного фонда. Закладка постоянного пункта наблюдения. Порядок проведения». Все фитоценозы расположены на территории зоны отчуждения ПГРЭЗ на расстоянии 10–12 км от ЧАЭС. Географические координаты и высотное расположение площадок наблюдения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Координаты пробных площадок и их высотное расположение

Название объекта	Фитоценоз	Географические координаты		Высотное расположение, м.
		С.Ш.	В.Д.	
Березовый лес	Ф-1	51°30,825′	030°01,294′	110
Черноольховый лес	Ф-2	51°31,165′	030°00,812′	111
Дубовый лес	Ф-3	51°30,644′	030°02,276′	108
Залежные земли	Ф-4	51°31,139′	030°01,44′	112
Сосновый лес	Ф-5	51°30,781′	030°01,140′	121

Фитоценоз 1 (Ф-1) – березняк, средний возраст деревьев 40–50 лет: расположен в закрытой ложбине, где в весенний период грунтовые воды поднимаются до глубины 15 см от поверхности почвы. Почва дерново-подзолистая супесчаная с расположенным под подстилкой оторфованным гумусовым горизонтом (5–15 см).

Фитоценоз 2 (Ф-2) – черноольшаник, средний возраст деревьев 50–60 лет: расположен на берегу ручья. Почва аллювиальная дерново-глеявая на суглинистом аллювии с оторфованным гумусовым горизонтом. В черноольшанике в весенний период уровень грунтовых вод составляет 25 см.

Фитоценоз 3 (Ф-3) – дубрава, средний возраст деревьев 50–60 лет: расположена на берегу искусственного затопления, образованного в результате перекрытия Погонянского канала. Грунтовые воды в дубраве поднимаются до глубины 40 см. Почва дерново-подзолистая супесчаная глеевая.

Фитоценоз 4 (Ф-4) – залежь: представлена суходольным лугом. Почва дерново-подзолистая супесчаная, слабоподзоленная. Глубина залегания грунтовых вод около 150 см.

Фитоценоз 5 (Ф-5) – сосняк, средний возраст деревьев 50–60 лет: почва дерново-подзолистая песчаная. Глубина залегания грунтовых вод – 250 см.

По условиям увлажнения березняк Ф-1 и черноольшаник Ф-2 – расположены на гидроморфной почве, дубрава Ф-3 – на полугидроморфной, залежь Ф-4 и сосняк Ф-5 – на автоморфной почве.

Отбор проб почвы проводился по почвенному разрезу послойно на глубину 100 см: верхний слой 0–10 см с интервалом 1 см, далее – с интервалом 5 см (10–30 см) и 10 см (30–100 см). Образцы подстилки отбирались по схеме 50 × 50 см. В лабораторных условиях пробы подстилочного слоя и почвы высушивали при температуре 20–25 °С. По окончании пробоподготовки образцы помещали в сосуды «Маринелли» (объём 1 л) или «денты» (0,1 л) для последующего определения радионуклидов.

Определение удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в пробах проводили инструментальным методом на γ - β -спектрометре «МКС-АТ1315» (Атомтех, Беларусь) с блоком детектирования для регистрации γ -излучения на основе сцинтилляционного кристалла NaI (ТГ) размерами $\varnothing 63 \times 63$ мм с погрешностью измерений не более 20 %. Для регистрации β -излучения использовался органический сцинтиллятор на основе полистирола, активированного паратерфинилом, размерами $\varnothing 128 \times 9$ мм. Измерения ^{241}Am проводили на γ -спектрометре

«Canberra» (Canberra Industries, Inc., USA) с детектором из особо чистого германия с композитным углеродным окном с регистрацией γ -излучения в диапазоне энергий 20–2000 кэВ с погрешностью не более 25 %.

Для оценки параметров вертикальной миграции радионуклидов в почвах использовался расчётный показатель центра запаса радионуклида, который характеризует глубины, ниже и выше которых залегает 50 % от общего содержания радионуклида в профиле и рассчитывался по следующей формуле:

$$\text{Центр запаса радионуклида (см)} = \frac{\sum(A_i \times L_i)}{\sum(A_i)},$$

где A_i – плотность загрязнения i -го слоя почвы (кБк/м²); L_i – глубина залегания i -го слоя почвы от поверхности (см).

Среднее значение плотности загрязнения почвы в пределах реперной сети составляло для ¹³⁷Cs – 3417,4 кБк/м², с интервалом от 1990,9 до 5127,7 кБк/м², для ⁹⁰Sr – 815,3 кБк/м², с интервалом от 90,1 до 1417,9 кБк/м², для ²⁴¹Am – 70,9 кБк/м², с интервалом от 40,1 до 98,1 кБк/м².

Результаты исследований и их обсуждение. Динамика вертикальной миграции радионуклидов ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am в профиле почвы на площадках наблюдений за период наблюдений 2013–2023 гг. представлена на рисунках 1–5. За 100 % принято общее содержание в верхнем 100 см слое почвы.

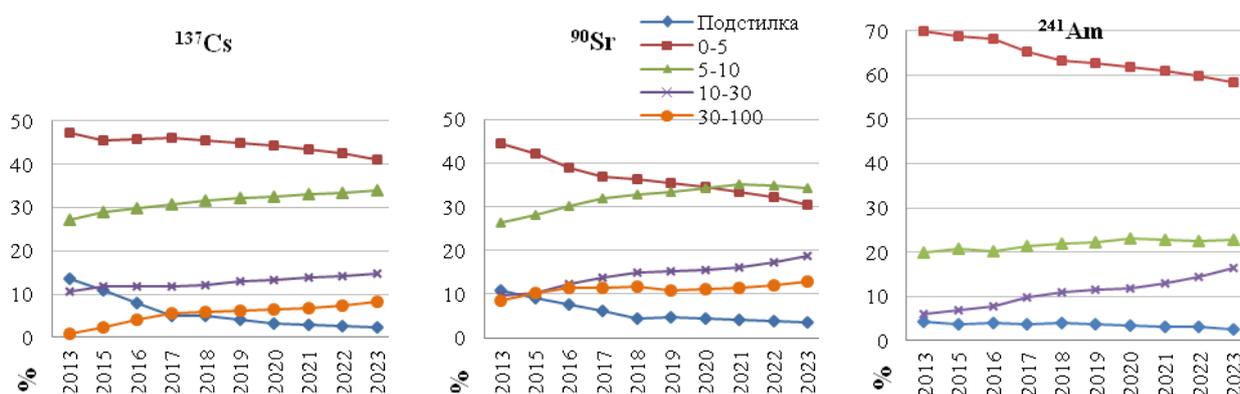


Рисунок 1 – Динамика вертикального распределения радионуклидов ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am в профиле почвы на площадке березового леса Ф-1

Общей особенностью вертикального перемещения радионуклидов в лесных почвах является то, что в их органогенном слое (подстилке) и минеральной толще перераспределение радионуклидов протекает с различной интенсивностью и определяется доминированием различных процессов. Подстилка лесных почв является биогеохимическим барьером на пути вертикальной миграции радионуклидов, от удерживающей способности которого зависит содержание нуклидов в минеральной части почвы. В подстилке перемещение радиоактивных элементов вглубь почвенного профиля происходит, в основном, за счёт ежегодного поступления на поверхность почвы относительно более чистого растительного опада, в то время как в минеральной толще только в результате протекания миграционных процессов [10]. На период 2023 г. в органогенном слое подстилки почв лесных фитоценозов Ф-1, Ф-2, Ф-3, Ф-5 сосредоточено 2,4–13,7 % ¹³⁷Cs, 1,1–11,1 % ⁹⁰Sr и 1,3–10,1 % ²⁴¹Am (рисунки 1–5). Исследования показали, что подстилка соснового леса Ф-5 (рисунок 5) аккумулирует до сих пор более 10 % радионуклидов. Это объясняется тем, что в сосновых насаждениях формируется мощный слой подстилки (4,0 см), которая медленно во времени минерализуется и относительно небольшая часть радионуклидов мигрирует в почвенные слои.

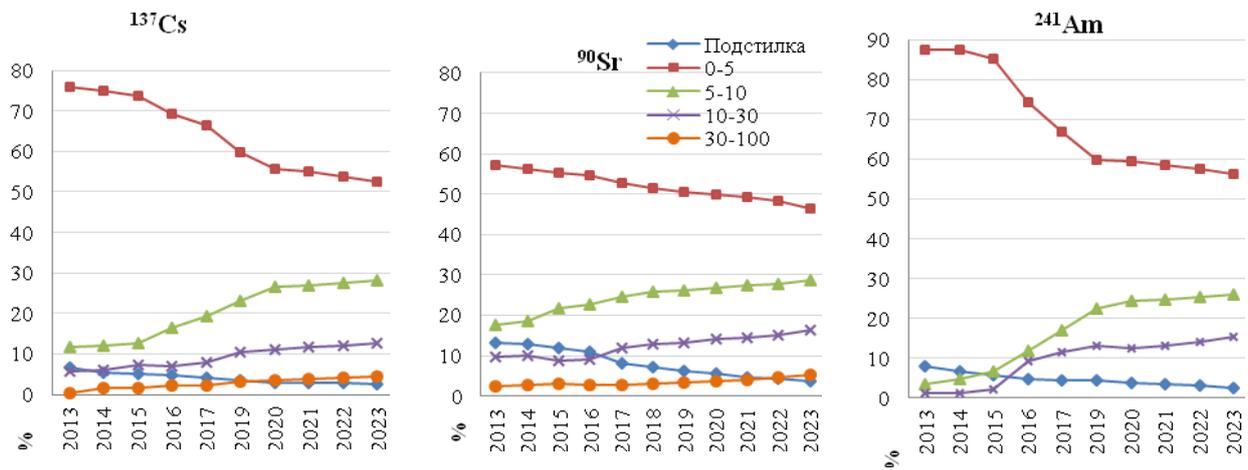


Рисунок 2 – Динамика вертикального распределения радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am в профиле почвы на площадке черноольхового леса Ф-2

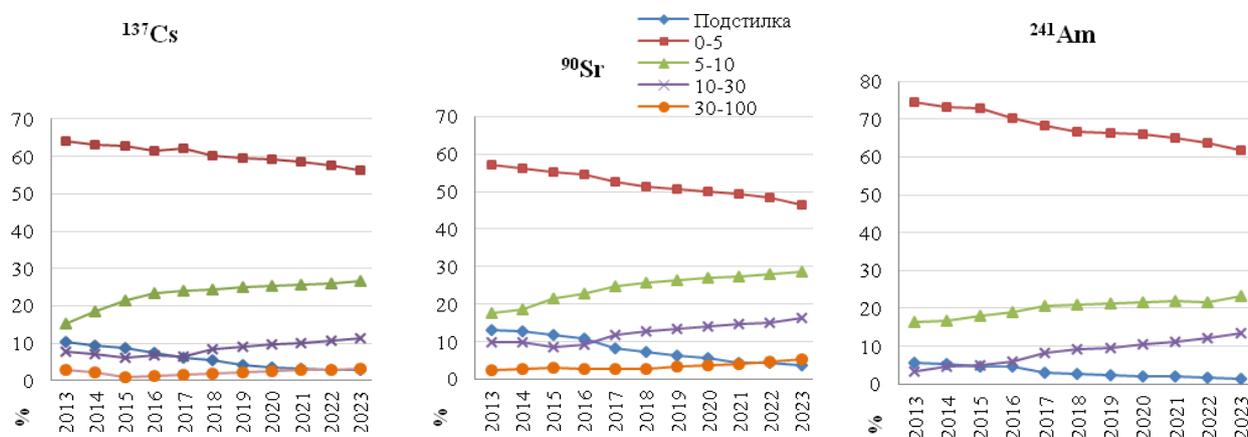


Рисунок 3 – Динамика вертикального распределения радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am в профиле почвы на площадке дубового леса Ф-3

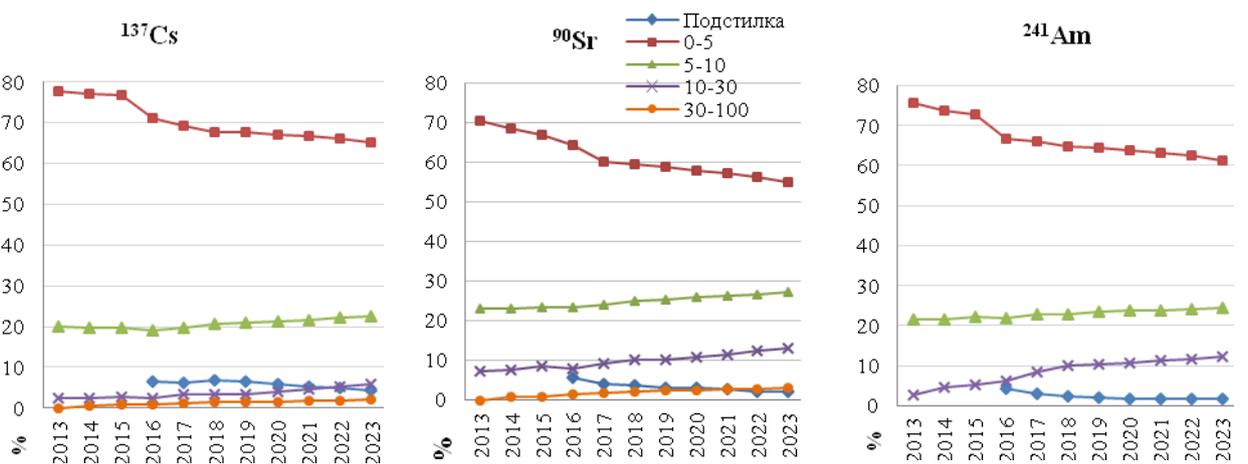


Рисунок 4 – Динамика вертикального распределения радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am в профиле почвы на площадке залежи Ф-4

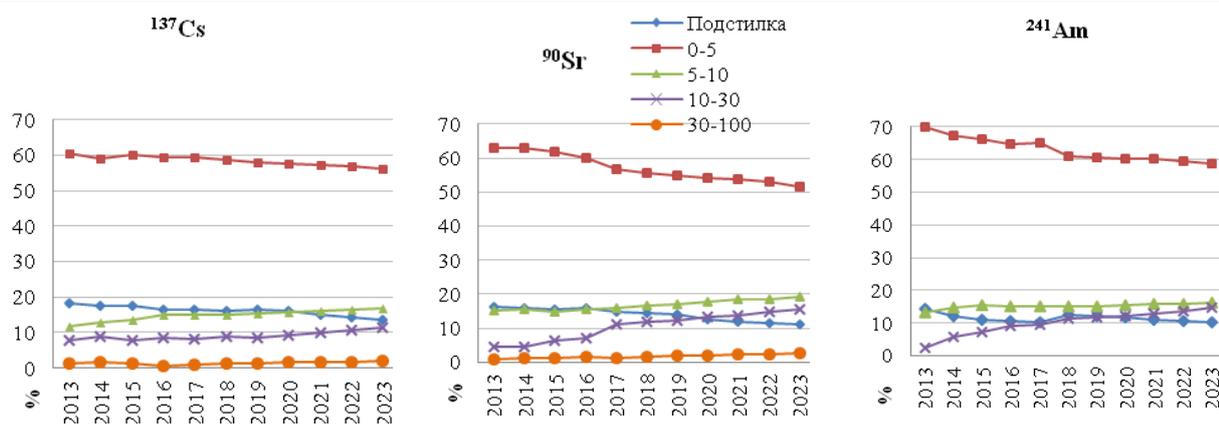


Рисунок 5 – Динамика вертикального распределения радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am в профиле почвы на площадке соснового леса Ф-5

В верхнем 5-см слое минеральной части почвы всех фитоценозов сосредоточена основная доля ^{137}Cs (41,0–65,3 %) и ^{241}Am (56,3–61,6 %), а в 10-см слое содержится от 4,9 до 82,0 % ^{90}Sr . На данный период времени особенностью профильного распределения радионуклидов в почве березняка Ф-1 является сближение уровней содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в слоях 0–5 см и 5–10 см (рисунок 1). Концентрация ^{90}Sr в 5–10 см слое почвы березняка уже превышает содержание этого радионуклида в слое 0–5 см, а в слое 10–30 см отмечается до 20 % ^{90}Sr . В почвах всех фитоценозов в слой 30–100 см мигрировало не более 8,2 % ^{137}Cs и 12,9 % ^{90}Sr , причем ^{241}Am в этих слоях не обнаружен.

Результаты расчёта центров запаса радионуклидов в почвах пробных площадок с различным режимом увлажнения представлены в таблице 2. Данный параметр – медиана распределения, характеризует половину запаса радионуклида и соответствующую ей отметку глубины почвенного профиля, наилучшим образом применим для оценки интенсивности вертикальной миграции радионуклидов за период, прошедший после выпадений. В профиле автоморфных почв Ф-4 (залежь) и Ф-5 (сосняк) центр запаса ^{137}Cs не вышел за пределы 8 см, тогда как в гидроморфной почве половина содержания этого радионуклида уже достигла глубины 12 см в Ф-1 (березняк) и 9 см в Ф-2 (черноольшаник).

Таблица 2 – Глубина проникновения 50 % запаса радионуклидов в почвах с различным режимом увлажнения

Тип почвы	Глубина слоя, см		
	^{137}Cs	^{90}Sr	^{241}Am
Гидроморфные Ф-1, Ф-2	9,58–12,51	15,08–20,06	7,54–7,67
Полугидроморфные Ф-3	8,68	10,83	7,19
Автоморфные Ф-4, Ф-5	6,84–7,64	8,89–9,31	6,73–6,76

Большой подвижностью обладает ^{90}Sr , что усиливается в условиях избыточного увлажнения почв. Глубина проникновения 50 % ^{90}Sr в почвах с избыточным увлажнением находилась в пределах 10–20 см, тогда как в автоморфных почвах центр запаса еще не вышел за пределы 10 см. Положение центров запаса ^{241}Am варьировало в относительно узком диапазоне 6–8 см в профилях почв всех фитоценозов. Известно, что на период 2010 г. в почвенном профиле сосняков на территории ПГРЭЗ центр запаса ^{241}Am не выходил за пределы 3 см [11]. Результаты настоящего исследования свидетельствуют, что к 2023 г. уже состоялся 2-х кратный сдвиг медианного содержания америция до глубины 6–7 см вниз вертикального профиля автоморфной почвы сосновых фитоценозов.

В таблице 3 отображены данные по скорости вертикальной миграции радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am по профилю почв реперных площадок фитоценозов.

Подвижность радионуклидов заметно возрастает с увеличением степени гидроморфности почв: автоморфные < полугидроморфные < гидроморфные. Скорость миграции медианного содержания ^{137}Cs составила для автоморфных почв 0,31–0,35 см/год, для полугидроморфных – 0,43 см/год и гидроморфных почв 0,54–0,57 см/год. Следует отметить, что скорость вертикальной миграции ^{90}Sr в 1,2–1,5 раз превышает скорость миграции ^{137}Cs и состав-

ляют 0,45–0,48 см/год, 0,60 и 0,71–0,75 см/год соответственно. ^{241}Am проявляет более низкие мобильные параметры. В дальнейшем необходимо учитывать постоянное увеличение со временем удельной активности долгоживущего ^{241}Am ($T_{1/2} = 432,2$ г.) в почве вследствие физического распада материнского ^{241}Pu ($T_{1/2} = 15,16$ г.), что может отразиться на характеристиках вертикального распределения америция.

Таблица 3 – Скорость вертикальной миграции радионуклидов (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am) по профилю почв, см/год

Тип почвы	Скорость миграции, см/год		
	^{137}Cs	^{90}Sr	^{241}Am
Гидроморфные Ф-1, Ф-2	0,54–0,57	0,71–0,75	0,36–0,40
Полугидроморфные Ф-3	0,43	0,60	0,34
Автоморфные Ф-4, Ф-5	0,31–0,35	0,45–0,48	0,24–0,26

Для исследования влияния атмосферных осадков на параметры вертикальной миграции были использованы два расчетных показателя – сумма осадков и их интенсивность. В качестве климатической характеристики интенсивности осадков применялась плотность осадков, которая вычисляется как среднее количество осадков в день выпадений. В ходе проведенного корреляционного анализа данных за 2021 г. с учетом годовой суммы 505,7 мм и их плотности 0,19 мм доказано, что величина скорости вертикальной миграции радионуклидов в почвах зависит от суммы атмосферных осадков. Расчетный коэффициент линейной корреляции Пирсона составлял 0,66 для ^{137}Cs и 0,61 для ^{90}Sr при уровне значимости менее 0,05 и критическом значении корреляции Пирсона 0,58 для ^{137}Cs и ^{90}Sr . Для ^{241}Am коэффициент линейной корреляции Пирсона составлял 0,59 при уровне значимости менее 0,05 и критическом значении корреляции Пирсона 0,50. Степень корреляционной связи для всех радионуклидов средняя ($r > 0,50–0,69$). Результаты корреляционного анализа показали, что плотность осадков также оказывала определенное влияние на параметры миграции радионуклидов в почве. Коэффициент линейной корреляции Пирсона составлял 0,87 для ^{137}Cs , 0,75 для ^{90}Sr и 0,55 для ^{241}Am при уровне значимости менее 0,05 и критических значениях корреляции Пирсона 0,81, 0,71 и 0,63 соответственно.

Заключение. Анализ распределения ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am в вертикальных профилях почвенных горизонтов на реперных площадках различных фитоценозов (березовый, черноольховый, дубовый, сосновый лес и залежь), расположенных на территории ПГРЭЗ, показал, что наибольшим содержанием радионуклидов до сих пор характеризуется слой 0–5 см. Отмечено, что в профиле почвы березняка на период 2023 г. доля ^{90}Sr в слое 5–10 см уже превышает таковую долю в слое 0–5 см. Общей закономерностью для всех почв пунктов наблюдения является полное отсутствие ^{241}Am в слоях почв глубже 30 см. Положение центров запаса радионуклидов в почвенных разрезах находилось на уровне 6,84–12,51 см – ^{137}Cs , 8,89–20,06 см – ^{90}Sr и 6,73–7,67 см – ^{241}Am . Установлено, что на особенности вертикального распределения и параметры миграции радионуклидов по профилю почв существенное влияние оказывает режим увлажнения почв в фитоценозах. Подвижность радионуклидов возрастает с увеличением степени гидроморфности почв: автоморфные < полугидроморфные < гидроморфные. В почвах с избыточным увлажнением глубина проникновения радионуклидов более высокая и зависит от степени насыщенности влагой, что усиливает процессы диффузионного и конвективного переноса.

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела радиационно-экологического мониторинга и лаборатории спектрометрии и радиохимии научного отдела ПГРЭЗ за участие в выполнении отбора проб на территории зоны отчуждения и аналитических определений.

Литература

1. Силантьев, А. Н. Вертикальная миграция в почве радионуклидов, выпавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС / А. Н. Силантьев, И. Г. Шкуратова, Ц. И. Бобовникова // Атомная энергия. – 1989. – Т. 66, № 3. – С. 194–197.
2. Анисимов, В. С. Вертикальная миграция ^{137}Cs чернобыльских выпадений в различных ландшафтах / В. С. Анисимов, В. К. Кузнецов, А. И. Санжаров // Радиационная биология, радиоэкология. – 2021. – Т. 61, № 3. – С. 286–300.

3. Рамзаев, В. П. Вертикальное распределение ^{137}Cs в дерново-подзолистой песчаной почве на лугах и в лесах Брянской области в 2015–2016 гг. / В. П. Рамзаев, А. Н. Барковский, К. В. Варфоломеева // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 3. – С. 27–41.
4. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС : биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий / Под ред. чл.-корр. РАН Н. И. Санжаровой и проф. С. В. Фесенко. – М. : РАН, 2018. – 278 с.
5. Подоляк, А. Г. Влияние вертикальной миграции и форм нахождения ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах на их биологическую доступность на примере естественных лугов Белорусского полесья / А. Г. Подоляк // Агрохимия. – 2007. – №2. – С. 72–82.
6. Кузнецов, В. К. Динамика распределения ^{137}Cs в почвенном профиле целинных черноземов / В. К. Кузнецов, С. И. Спиридонов, В. В. Иванов [и др.] // Агрохим. вестн. – 2020. – № 4. – С. 12–15.
7. Ivanov, Y. A. Migration of ^{137}Cs and ^{90}Sr from Chernobyl fallout in Ukrainian, Belarussian and Russian soils / Y. A. Ivanov, N. Lewyckij, S. E. Levchuk [et al.] // J. Environ. Radioact. – 1997. – № 35. – P. 1–21.
8. Krstic, D. Verticale profile of ^{137}Cs in soil / D. Krstic, D. Nikezi, N. Stevanovi, M. Jeli // Appl. Radiat. Isotopes. – 2004. – № 6. – P. 1487–1492.
9. Arapis, G. Effective migration velocity of ^{137}Cs and ^{90}Sr as a function of the type of soils in Belarus / G. Arapis, E. Petrayev, E. Shagalova, O. Zhukova [et al.] // J. Environ. Radioact. – 1997. – № 34. – P. 171–185.
10. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС : состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации / В. А. Ипатьев, В. Ф. Багинский, И. М. Булавик [и др.] ; под общ. ред. В. А. Ипатьева. – Гомель : Институт леса НАН Беларуси, 1999. – 454 с.
11. Тагай, С. А. Распределение ^{241}Am в профиле почвы зоны отчуждения ЧАЭС в условиях затопления территории / С. А. Тагай // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2010. – № 3 (60). – С. 139–145.

Полесский государственный
радиационно-экологический заповедник

Поступила в редакцию 15.04.2024

Обмен ионов тяжелых металлов в микоризном корневом окончании системы «*Picea abies* – эктомикоризные грибы»

П.Ю. КОЛМАКОВ, Д.Д. ЖЕРНОСЕКОВ

В микоризных корневых окончаниях системы «*Picea abies* – эктомикоризные грибы» поступление тяжелых металлов претерпевает изменения, которые связаны с особенностями проникновения грибного компонента в осевой цилиндр и радиального транспорта сахаров к периферии, к мантии грибного компонента. Выяснено, что основной путь поступления ионов металлов в стель осуществляется по симпласту неметаболическим путем. Формирование анатомо-морфологического комплекса «*Picea abies* – эктомикоризные грибы» под действием молекулярно-генетических механизмов регуляции гомеостаза способствует распространению ели обыкновенной на гораздо большей территории, чем можно было бы ожидать на самом деле.

Ключевые слова: *Picea abies*, эктомикоризные грибы, трансцеллюлярный, апопластный, симпластный транспорт, анатомо-морфологический комплекс.

In the mycorrhizal root tip of the «*Picea abies* – ectomycorrhizal fungi» system the intake of heavy metals undergoes changes that are associated with the peculiarities of the penetration of the fungal component into the axial cylinder and the radial transport of sugars to the periphery, to the mantle of the fungal component. It was found out that the main route of metal ions entering the stele is carried out through the symplast in a non-metabolic way. The formation of the «*Picea abies* – ectomycorrhizal fungi» anatomical and morphological complex under the influence of molecular genetic mechanisms of homeostasis regulation leads to the spread of *Picea abies* over a much larger area than one would actually expect.

Keywords: *Picea abies*, ectomycorrhizal fungi, transcellular, apoplastic, symplastic transport, anatomical and morphological complex.

Введение. Соединения тяжелых металлов относятся к наиболее опасным распространенным веществам, загрязняющим биосферу [1]. Настоящее время требует изучения биологического значения металлов в физиологических и биохимических процессах в растительных организмах как живых конгломератах.

Для прогнозирования роли тяжелых металлов в обменных процессах необходимо рассматривать их формы в почвенных горизонтах, подвижность, способность преодоления биологических барьеров, значимость геохимических процессов. Для таких исследований лучше всего использовать «модельные системы» с объектами, обладающими определенным набором биологических характеристик, для объяснения протекающих физиологических явлений. Такой модельной системой в наших исследованиях является система «*Picea abies* – эктомикоризные грибы – тяжелые металлы».

Свинец – распространенный в природе тяжелый металл с широким диапазоном содержания в почвах [2]. Слабая подвижность и накопление этого металла в почвенном профиле коррелирует со значениями pH в почвенных горизонтах [3]. Наиболее распространенной в природе является двухвалентная форма [4]. Значение pH является одним из основных условий, определяющих состав и форму свинца [5]. Так, например, при pH 3 концентрация свободного иона Pb^{2+} составляет около 70 % [6]. Поглощение свинца осуществляется по нескольким механизмам в зависимости от pH среды и концентрации элемента [7].

Picea abies – одна из основных лесообразующих древесных пород на территории Беларуси с зональными чертами в своем распространении, имеющая большое значение в садоводстве, озеленении и строительной отрасли [8]. В различные геологические эпохи ареал ели европейской претерпевал значительные изменения вплоть до своей дезъюнкции и образования генетически разнородных форм и подвидов. Вероятно, в период горообразования и иссушения климата возникли виды и формы голосеменных, обладающие механизмами гомеостаза, которые позволили им просуществовать до наших дней.

Материал и методы исследования. Целью нашей работы являлось изучение особенностей обмена тяжелых металлов и роли соединений свинца в формировании и развитии консортивных связей в модельной системе «*Picea abies* – эктомикоризные грибы» в подзоне дубово-темнохвойных подтаежных лесов. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи: на основе предложенной модели выявить основные пути проникновения ионов тяжелых металлов в анатомические структуры микоризного корневого окончания; на примере ионов свинца определить возможные механизмы влияния соединений тяжелых металлов на формирование и функционирование консортивных связей в природе.

Объекты исследований. Модельный комплекс (ассоциация, конгломерат): агариикоидные базидиомицеты из эколого-трофической группы «микоризообразователи» (микобионт, грибной компонент), *Picea abies* (фитобионт, растительный компонент) и тяжелые металлы.

Анализы образцов почвенных горизонтов выполнены по стандартным методикам в химико-экологической лаборатории учреждения образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» [9]. Характеристика пробных площадей и измерение биомассы тонких корней представлены в более ранних научных работах [10].

Результаты исследований. *Образование хелатных комплексов и трансмембранный потенциал.* Из растительного компонента в ризосферу попадают соединения (органические кислоты, аминокислоты, фенолы, пептиды, ферменты (редуктазы), которые связывают ионы тяжелых металлов и осаждают их на поверхности корневых окончаний [11]. На поверхностях мембран происходит хелатирование Pb^{2+} с лигандами. Образующиеся хелатные комплексы могут быть различными в зависимости от соотношения заряда лиганда (белковых молекул) и иона металла. Таким образом, происходит регуляция электростатического напряжения и последующего открытия или закрытия ионных каналов, образованных трансмембранными белковыми молекулами.

В пользу формирования на поверхности микоризных корневых окончаний хелатных комплексов различных групп свидетельствуют следующие факты: высокая устойчивость комплексов к различной кислотности среды; в свободном состоянии металлам не свойственна биологическая активность; меньшая токсичность по сравнению с другими формами соединений; хорошая биодоступность как для растительного, так и для грибного компонентов.

В кислой почвенной среде образование соединений с ионами металлов на поверхности корневых окончаний становится наиболее вероятным событием. Таким образом, увеличивается электростатическое напряжение на мембране, стимулируется ионный обмен (активный транспорт) и происходит формирование различных типов связи через кислород, углерод в присутствии органического вещества с образованием комплексов с фенольными радикалами в области суберинизации в корневом окончании.

Результаты химического анализа почвенных горизонтов из пробных площадей приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты химического анализа почвенных горизонтов

Пробная площадка	Почв. гориз.	Результаты химических анализов							
		рН	органич. в-во %	медь мг/кг	цинк мг/кг	железо мг/кг	марганец мг/кг	кадмий мг/кг	свинец мг/кг
фоновая ПП1	Ad	4,01	81,53	4,4822	62,8086	176,0690	7230,460	0,2149	10,7807
фоновая ПП1	A1	7,09	5,12	10,0219	25,2167	12036,61	2754,091	0,0777	11,8242
фоновая ПП1	A2B	3,47	4,59	0,7761	1,4278	11406,66	17,1649	–	6,9349
импактн. ПП2	A1	3,50	33,73	1,8829	11,1475	5285,907	1879,991	–	12,2706
импактн. ПП2	A2B	6,74	8,14	15,2814	39,1961	11096,40	3189,522	0,0664	14,5419

В почвенных горизонтах с наибольшей средней биомассой тонких корней рН стремится к стабильному значению 3 и к содержанию ионов свинца, примерно, 11 мг/кг. Из таблицы 1 видно, что подобной закономерности с ионами других тяжелых металлов не наблюдается. Данный факт предполагает наличие молекулярного механизма обмена ионов свинца в модельной системе «*Picea abies* – эктомикоризные грибы».

Метаболический (активный) транспорт тяжелых металлов. В метаболическом транспорте ионов металлов через мембраны в клетках растений принимают участие большое количество специфических белков-переносчиков, относящихся к различным семействам. Наиболее изученные семейства: ZIP (zinc-iron-regulated transporter), ABC (ATP-binding cassette), OPT (oligopeptide transporters), P1B-АТФ-азы, CDF (cation diffusion facilitator); NRAMP (natural resistance associated macrophage protein); CTR (copper transporter family) и CAХ (cation exchanger) [12].

На мембранах с нейтральными и кислыми фосфатазами, в коре микоризного корневого окончания, возникает АТФ-азная активность, которая инициируется экспрессией генов микоризинов при микоризации [13]. Под действием катионов металлов АТФ-азы меняют конформацию своих активных центров, что сопровождается гидролизом АТФ. В этом процессе важную роль играют кислые фосфатазы (активны при рН ниже 7), а высвободившийся фосфат-ион фиксируется при помощи аденилаткиназы на субстрате (белке-переносчике) мембранного комплекса пелотона [14]. В результате высвобождается энергия, которая затрачивается на транспорт ионов тяжелых металлов.

Фосфатная группа молекулы АТФ имеет хорошее сродство к ионам металла и обладает хелатирующими способностями, в то время как пуриновому азотистому основанию присущи амфотерные свойства. Разность потенциалов, скорее всего, создается при помощи потенциал-чувствительных каналов с пуриновыми рецепторами (АТФ-активируемые). Хелатирующая фосфатная группа обладает высоким сродством к ионам двухвалентных металлов, что влияет на взаимодействие АТФ с белками-переносчиками и на сродство с доменом аденилаткиназы.

Сама АТФ-азная активность связана с работой белков-переносчиков как трансмембранных транспортеров через катионные каналы (АТФ-активируемые), из семейства P_{1B} – АТФ-аз подсемейства НМА (*heavy metal ATPase*) [15]. Консервативный мотив гена AtНМА4 (подкласс Zn/Co/Cd/Pb НМА) контролирует механизм для поддержания постоянной концентрации ионов металлов в физиологических пределах в растительном компоненте. Работа фермента АТФ-азы подсемейства НМА (*heavy metal ATPase*) способствует поддержанию гомеостаза в растительном компоненте и кодируется мотивом AtНМА4 (подкласс Zn/Co/Cd/Pb НМА), максимальная экспрессия которого наблюдается в корневых окончаниях [16].

Активация мотива AtНМА4 (подкласс Zn/Co/Cd/Pb НМА) стимулируется повышенным уровнем концентрации Zn²⁺ и Mn²⁺ [16]. В пользу данного утверждения свидетельствуют результаты анализов почвенных профилей в таблице 1 в позициях с наибольшим содержанием органических веществ (т.е. микоризных корневых окончаний).

Метаболический активный транспорт влияет на степень суберинизации первичной коры микоризных корневых окончаний. Экспрессия мотива AtНМА4 осуществляется под действием возрастающей концентрации Zn²⁺ и Mn²⁺ на внутренней стороне мембран. На фоне этого процесса происходит образование субериновых пластинок между плазматической мембраной и первичной клеточной стенкой. Это не влияет на апопластный транспорт, который блокируется лигнифицированными поясками Каспари в эндодерме [17]. Механизм поддержания постоянной концентрации ионов металлов в физиологических пределах в растительном компоненте контролирует суберинизацию первичной коры на константном уровне.

Нарушение активного трансцеллюлярного транспорта ведет к изменению степени суберинизации первичной коры микоризного корневого окончания при возникновении дефицита Zn²⁺ и Mn²⁺.

Возможный механизм поддержания обмена суберина на определенном уровне представлен на рисунке 1.

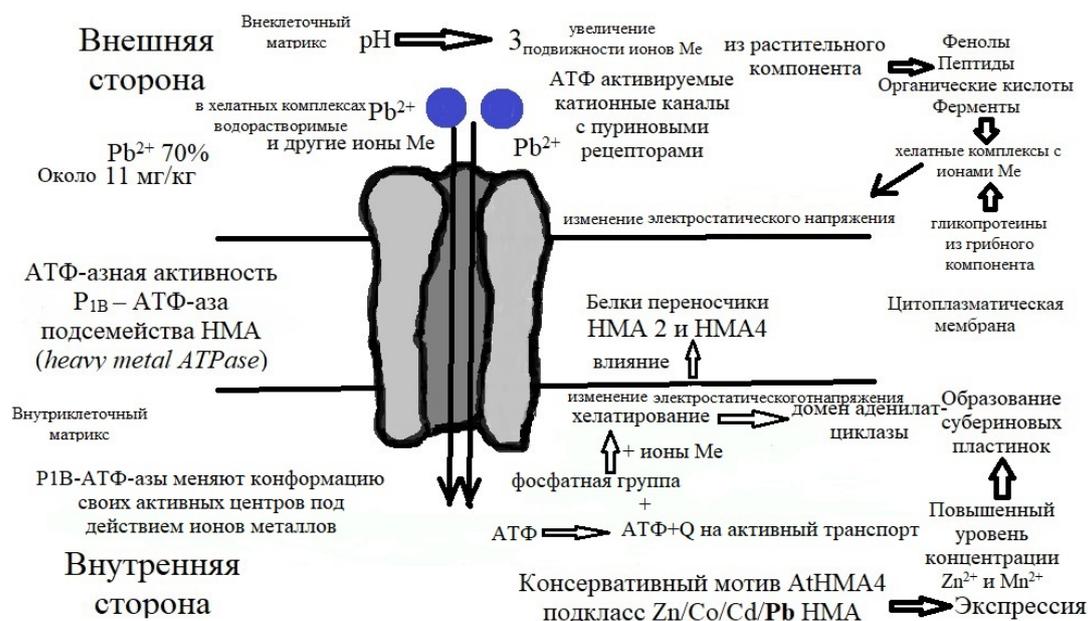


Рисунок 1 – Метаболический (активный) транспорт тяжелых металлов в микоризных корневых окончаниях

Неметаболический (пассивный) транспорт тяжелых металлов. В микоризных корневых окончаниях поступление соединений тяжелых металлов претерпевает изменения, которые связаны с особенностями проникновения грибного компонента в осевой цилиндр и радиального транспорта сахаров к периферии, к мантии (чехлу) грибного компонента. Радиальный реверсный поток углеводов из осевого цилиндра к периферии грибного компонента делает классический апопластный транспорт в стель невозможным в микоризном корневом окончании.

Радиальный транспорт сахаров из осевого цилиндра микоризного корневого окончания к периферии, к мантии, выделение сахаров и гликопротеина гифами в ризосферу усиливает эффект внешнего хелатирования тяжелых металлов, обеспечивая механизм металлоустойчивости. Результатом описанных процессов является структурное разнообразие органоминеральных чехлов на поверхности корневых окончаний [18].

Включение механизма суберинизации клеток первичной коры микоризного корневого окончания происходит под действием N-ацетилглюкозамина (мономера хитина грибного компонента) и накопления Zn^{2+} и Mn^{2+} внутри мембранного комплекса пелотонов. Симпластный путь проникновения ионов металлов в стель в ксилемный ток становится всё еще доступным даже при формировании в эндодерме лигнифицированных поясков Каспари [17], наряду с реверсом сахаров по апопластному пути. Проникновение ионов тяжелых металлов в условиях увеличивающейся суберинизации в стель возможно только симпластным путем.

В связанном трансцеллюлярном транспорте тяжелых металлов через плазмалемму клеток участвуют белки переносчики НМА 2 и НМА4 [19], [20]. Метаболический транспорт зависит от заложения суберинных пластинок в виде вторичных клеточных стенок вокруг эндодермальных клеток, образуя диффузионный барьер [21]. Нужно отметить, что специфических транспортеров тяжелых металлов для растительного компонента не выявлено [12].

На рисунках 2 и 3 показаны функциональные мессенджеры консортивных взаимоотношений (пелотоны в фоновой и импактной зонах). Виды радиального транспорта в микоризных корневых окончаниях ели обыкновенной представлены на рисунках 4 и 5.

Реверсный апопластный транспорт сахаров из осевого цилиндра растительного компонента грибным компонентом не только влияет на степень суберинизации клеток коры, но и способствует накоплению гликопротеинов в грибных чехлах, формируя их структурное морфологическое разнообразие. Выделяемый грибным компонентом гликопротеин связывает частички почвенного грунта и гифы в единое целое – чехлы микоризных корневых окончаний.

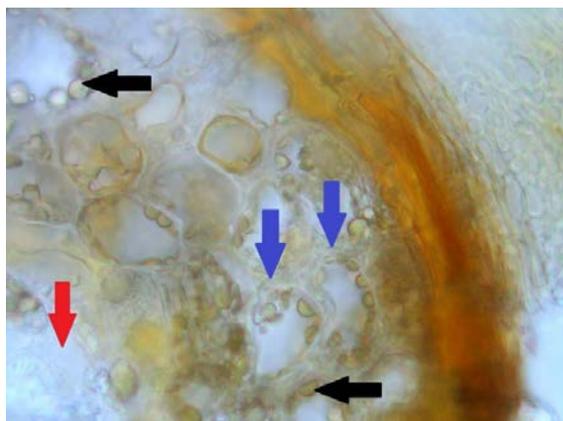


Рисунок 2 – Поперечный срез микоризного корневого окончания *Picea abies* (L.) Karst. Образец № 20-29-06-2016 /Simple 1/ фоновая зона
Примечание: черная стрелка – функциональный мессенджер пелотон; красная стрелка – пропускная клетка в эндодерме; синяя стрелка – апопластный реверс сахаров к мантии.

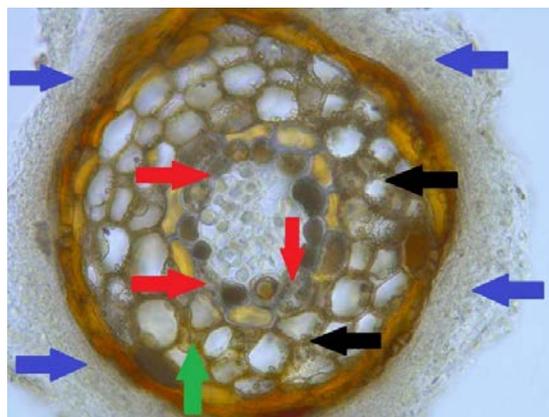


Рисунок 3 – Поперечный срез микоризного корневого окончания *Picea abies* (L.) Karst. Образец № 41-01-09-2016 /Simple 3/ импактная зона
Примечание: черная стрелка – скопление функциональных мессенджеров; красная стрелка – пропускная клетка в эндодерме; синяя стрелка – процесс формирования многослойной мантии под действием апопластного реверса; зеленая стрелка – формирование тотальной суберинизации под действием N-ацетилглюкозамина.

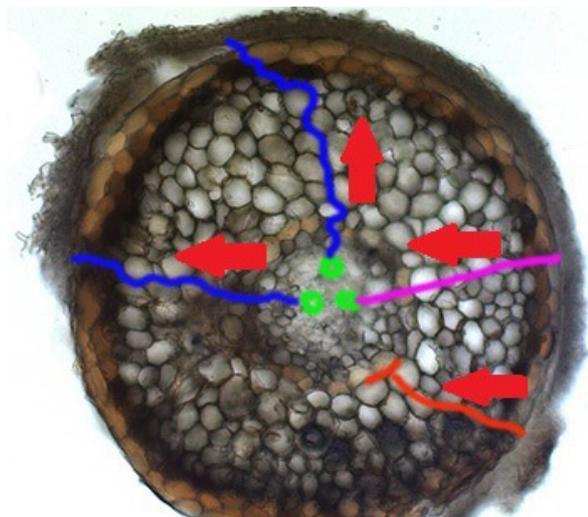


Рисунок 4 – Микроскопия светлого поля. Образец № 11-07-10-2016 /Simple 2/ фоновая зона
Поперечный срез микоризного корневого окончания *Picea abies* (L.) Karst.

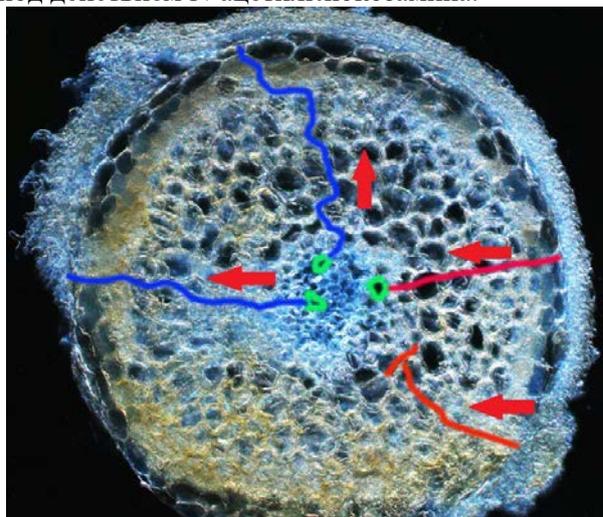


Рисунок 5 – Микроскопия темного поля. Образец № 11-07-10-2016 /Simple 2/ фоновая зона
Поперечный срез микоризного корневого окончания *Picea abies* (L.) Karst.

Примечание: красная стрелка – направление транспорта веществ; синяя линия – апопластный реверс сахаров к мантии; лиловая линия – симпластный транспорт веществ; красная линия – метаболический активный транспорт.

Реверсный ток сахаров к мантии ведет к накоплению полиуроновых кислот, что является вкладом в формирование внешних структур анатомического строения функциональной микоризной единицы наряду с выделяемым гликопротеином гифами грибного компонента. Полиуроновые кислоты как биополимеры влияют наравне с гликопротеином на структуру мантии, препятствуя иссушению функциональной микоризной единицы в период длительных засух из-за стабилизации воды в почвенном профиле в области наибольшей концентрации микоризных корневых окончаний.

Авторы научных статей указывают на факт накопления ионов тяжелых металлов в корневых системах и связь этого процесса с уменьшением биомассы, размеров корневых окончаний, исчезновением волосков, уменьшением размеров стели [22], [23]. В основном свинец

аккумулируется клеточными стенками клеток микоризных корневых окончаний, где связывается с полиуроновыми кислотами полисахаридов, глюканами, хитином и хитозаном с образованием хелатных комплексов [24].

Заключение. Нами показано, что обмен тяжелых металлов, радиальный транспорт в микоризных корневых окончаниях системы «*Picea abies* – эктомикоризные грибы» претерпевают изменения.

Выяснено, что основной путь поступления ионов металлов в стель осуществляется по симпласту неметаболическим путем, поскольку плазмодесмы не претерпевают существенной дифференциации в суберинизированных микоризных окончаниях ели обыкновенной.

На представленных в работе анатомических срезах микоризных корневых окончаний обнаружено, что апопластный путь поступления ионов металлов тормозится радиальным током сахаров от центрального цилиндра к мантии, что вызывает эффект «пищевого» стресса, влияющего на степень суберинизации близлежащих клеток мезодермы растительного компонента. Реверс сахаров осуществляется грибным компонентом из флоремы осевого цилиндра через пропускные клетки эндодермы в мантию.

Трансцеллюлярное (метаболическое) поступление ионов тяжелых металлов во внутриклеточное пространство первичной коры микоризного корневого окончания осуществляется через функциональные единицы – пелотоны. Этот процесс контролируется экспрессией специфических генов, АТФ-азной активностью, накоплением хелатных комплексов на поверхности мембранных мессенджеров через изменения изоэлектрической составляющей ионных каналов. Формирование субериновых ламелей тормозит трансцеллюлярный транспорт, что может быть блокировано создаваемым дефицитом Fe^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} внутри клеток первичной коры в определенных секторах микоризного корневого окончания через формирование и работу хелатных комплексов по разные стороны мембранных комплексов пелотона.

Формирование анатомо-морфологического комплекса «*Picea abies* – эктомикоризные грибы» под действием молекулярно-генетических механизмов регуляции гомеостаза способствует распространению ели обыкновенной на гораздо большей территории, чем можно было бы ожидать на самом деле.

Литература

1. Гончарук, В. В. Физико-химические аспекты проблемы загрязнения почв и гидросферы тяжелыми металлами / В. В. Гончарук, Н. М. Соболева, А. А. Носонович // Химия в интересах устойчивого развития. – 2003. – Т. 11, № 6. – С. 795–809.
2. Путилина, В. С. Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами / В. С. Путилина, И.В. Галицкая, Т.И. Юганова. – Новосибирск : ГПНТБ СО РАН, 2016. – 123 с.
3. Ильин, В. Б. Тяжелые металлы в системе почва–растение / В. Б. Ильин // Почвоведение. – 2007. – № 9. – С. 1112–1119.
4. Путилина, В. С. Влияние органического вещества на миграцию тяжелых металлов на участках складирования твердых бытовых отходов : аналит. обзор / В. С. Путилина, И. В. Галицкая, Т. И. Юганова ; ГПНТБ СО РАН; ИГЭ РАН. – Новосибирск, 2005. – С. 91–98.
5. Водяницкий, Ю. Н. Биогеохимия тяжелых металлов в загрязненных переувлажненных почвах (аналитический обзор) / Ю. Н. Водяницкий, И. О. Плеханова // Почвоведение. – 2014. – № 3. – С. 273–282.
6. Rey-Castro, C. Effective affinity distribution for the binding of metal ions to a generic fulvic acid in natural waters / C. Rey-Castro, S. Mongin, C. Huidobro, C. David, J. Salvador, J. L. Garcés, J. Galceran, F. Mas, J. Puy // Environ. Sci. & Technol. – 2009. – Vol. 43, № 19. – P. 7184–7191.
7. Dillard, J. G. X-ray photoelectron spectroscopic (XPS) surface characterization of cobalt on the surface of kaolinite / J. G. Dillard, M. H. Koppelman // J. of Colloid & Interface Sci. – 1982. – Vol. 87, № 1. – P. 46–55.
8. Ермохин, М. В. Современная динамика южной границы сплошного распространения ели (*Picea abies* Karst.) в Беларуси / М. В. Ермохин, А. В. Пугачевский // Весці Нацыянальнай акадэмі Беларусі. – 2009. – № 1. – С. 51–55.
9. Алексеев, Ю. В. Тяжелые металлы в почвах и растениях / Ю. В. Алексеев. – М., 1987. – 140 с.
10. Колмаков, П. Ю. Разнообразие и распределение тонких корней *Picea abies* (L.) Karst. по почвенному профилю в природных и антропогенных экосистемах Белорусского Поозерья / П. Ю. Колмаков, А. С. Кисова // Веснік ВДУ. – 2018. – № 2 (99). – С. 41–49.

11. Орлов, Д. С. Микроэлементы в почвах и животных организмах / Д. С. Орлов // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 1. – С. 61–68.
12. Титов, А. Ф. Тяжелые металлы и растения / А. Ф. Титов, Н. М. Казнина, В. В. Таланова. – Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2014. – 194 с.
13. Sakamoto, K. Transcriptome analysis of soybean (*Glycine max*) root genes differentially expressed in rhizobial, arbuscular mycorrhizal, and dual symbiosis / K. Sakamoto, N. Ogiwara, T. Kaji [et al.] // *Journal of Plant Research*. – 2019. – V. 132. – P. 541–568.
14. Peterson, R. L. Exploring structural definitions of mycorrhizas, with emphasis on nutrient-exchange interfaces / R. L. Peterson, H. B. Massicotte // *Can J. Bot.* – 2004. – Vol. 82. – P. 1074–1088.
15. Казнина, Н. М. Физиолого-биохимические и молекулярно-генетические механизмы устойчивости растений семейства *Poaceae* к тяжелым металлам : дис. ... д-ра биол. наук : 03.01.05 / Н. М. Казнина. – Петрозаводск, 2016. – 358 с.
16. Mills, R. F. Functional expression of AtHMA4, a P-1B-type ATPase of the Zn/Co/Cd/Pb subclass / R. F. Mills, G. C. Krijger, P. J. Baccarini, J. L. Hall, L. E. Williams // *The Plant Journal*. – 2003. – V. 35 (2). – P. 164–176.
17. Barberon, M. Adaptation of root function by nutrient-induced plasticity of endodermal differentiation / M. Barberon, J. E. M. Vermeer, D. De Bellis [et al.] // *Sell*. – 2016. – № 164. – P. 447–459.
18. Колмаков, П. Ю. Анатомические взаимодействия разнородных организмов при развитии консорциев / П. Ю. Колмаков, Е. В. Антонова // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 74-й Региональной научно-практической конференции преподавателей, научных сотрудников и аспирантов, Витебск, 18 февраля 2022 г. – Витебск : ВГУ им. П.М. Машерова, 2022. – С. 67–69.
19. Hussain, D. ATPase heavy metal transporters with roles in essential zinc homeostasis in *Arabidopsis* / D. Hussain, M. J. Haydon, Y. Wang [et al.] // *Plant Cell*. – 2004. – V. 16. – P. 1327–1339.
20. Verret, F. Overexpression of AtHMA4 enhanced root-to-shoot translocation of zinc and cadmium and plant tolerance / F. Verret, A. Gravot, P. Auroy [et al.] // *FEBS Lett*. – 2004. – V. 576. – P. 306–312.
21. Shukla, V. Suberin plasticity to developmental and exogenous cues is regulated by a set of MYB transcription factors / V. Shukla, H. Jian-Pu, C. Fabienne [et al.] // *Plant Biology*. – 2021. – Vol. 118, № 39. P. 1–11.
22. Liu, H. Influence of iron plaque on uptake and accumulation of Cd by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings grown in soil / H. Liu, J. Zhang, P. Christie, F. Zhang // *Science of The Total Environment*. – 2008. – V. 394. – P. 361–368.
23. Колмаков, П. Ю. Проникновение грибного компонента в корневые окончания *Picea abies* (L.) Karst. / П. Ю. Колмаков, Е. В. Антонова // *Вестник ВДУ*. – 2017. – № 4 (97). – С. 40–47.
24. Sharp, R. G. A review of the applications of chitin and its derivatives in agriculture to modify plant-microbial interactions and improve crop yields / R. G. Sharp // *Agronomy*. – 2013. – № 3. – P. 757–793.

Влияние микробных удобрений на взаимоотношения основных эколого-трофических групп почвенных микроорганизмов в посевах ярового ячменя в условиях засухи

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

В полевом опыте получены доказательства, что при обработке микробными препаратами («Гордебак», «Полибакт», «Ресойлер») на стадии «кущения» посевов ярового ячменя, культивированного на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, соотношения численности представителей основных эколого-трофических групп микроорганизмов на этапах превращения свежей органической массы, промежуточного и специфического органического вещества, зависят от влажности почвы.

Ключевые слова: почвенные ассоциации микроорганизмов, эколого-трофические группы микроорганизмов, биопрепараты «Гордебак», «Полибакт», инокулянт Ресойлер.

In the field experiment the evidence was obtained that at treatment with microbial preparations («Gordebak», «Polybakt», «Resoiler») at the stage of «tillering» of spring barley crops cultivated on sod-podzolic light loamy soil, the ratios of the number of representatives of the main ecological and trophic groups of microorganisms at the stages of transformation of fresh organic matter, intermediate and specific organic matter depend on soil moisture.

Keywords: associations of soil microorganism, ecological and trophic groups of microorganisms, Hordebak and Polybakt biopreparations, Resoiler inoculant.

Введение. Для получения конкурентноспособной органической продукции, которая действует оздоровлению населения и сохранению окружающей среды, в растениеводстве важным является применение микробных удобрений [1]. Исследование озвученной проблемы активно развивается в республике Беларусь. В частности, Институтом микробиологии НАН Беларуси разработан биологический препарат «Гордебак», а совместно с РУП «Институт почвоведения и агрохимии НАН Беларуси» – «Полибакт», Республиканским научным дочерним унитарным предприятием «Институт защиты растений» разработан инокулянт «Ресойлер».

Основу препаратов «Полибакт» [2] и «Гордебак» [3] составляют штаммы азотфиксирующих и фосфатмобилизующих бактерий; соответственно, титр – не менее $1,0 \times 10^9$ и $5,0 \times 10^9$ КОЕ/мл. Инокулянт «Ресойлер» в качестве действующего вещества содержит *Trichoderma* sp. L-3, КОЕ не менее 5,4 млрд./мл; *Trichoderma* sp. L-6, КОЕ не менее 5,9 млрд./мл; содержание биомассы – не менее 20 г/л [4]. Установлено, что препарат «Полибакт» восстанавливает микробиоценоз почвы и повышает урожайность сельскохозяйственных культур, что было выявлено на пожнивных остатках соломы и в посевах льна [5]. «Гордебак» нашел применение для предпосевной обработки семян и вегетирующих растений пивоваренного ячменя, поскольку использование препарата равнозначно дополнительному внесению 15–20 % минерального азота и 20 % фосфора на гектар [1], также доказано, что он увеличивает урожайность маслосемян рапса на 16,5–27,2 % [6]. Установлено, что препарат «Ресойлер» способствует поддержанию стабильности агробиоценозов, повышает доступность элементов питания для растений, способствуя увеличению их продуктивности на 10–15 % [7]. Инокулянт позволяет получить экологически чистую продукцию и снизить пестицидную нагрузку на агробиоценозы [8].

Цель данной работы – микробиологическое исследование применения микробных удобрений на взаимоотношения основных эколого-трофических групп почвенных микроорганизмов в посевах ярового ячменя в условиях засухи на стадии кущения и колошения.

Методы исследования. Исследования выполняли в весенне-летний период 2023 г. на землях агрокомбината «Южный» вблизи н.п. Калинино Гомельского района Гомельской области. Объектом исследований являлась биологическая активность агрономически полезных групп при обработке микробными биопрепаратами «Полибакт», «Гордебак», «Ресойлер» посевов ярового ячменя сорта «Фэст».

Определена следующая агрохимическая характеристика дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы: рН в КС1 – 6,1; фосфор – 288 мг/кг; калий – 295 мг/кг.

Площадь опытных участков составляла 5 м², размещение рендомизировано: повторность опытов – 4-х кратная. Норма расхода микробного биопрепарата «Полибакт» составляла 100–200 мл на 20 л воды на 100 м² почвы, биопрепарата «Гордебак» – 1,9 л препарата (91 л рабочей жидкости) на 1000 растений, микробного биопрепарата «Ресойлер» – 5 л/га. Проводили прикорневую подкормку растений по всходам в фазе «кущения».

Отбор почвенных образцов в посевах ярового ячменя осуществляли в период «кущения» и в фазу «колошения» [9]. Микробиологическую индикацию почвы выполняли согласно общепринятым в почвенной микробиологии методам [10].

В опыте представлены следующие варианты:

– контроль начальный – отбор почвы выполняли 17.05.2023 г. на стадии «кущения» ячменя, почва без обработки посевов микробными биопрепаратами;

– контроль (исходный, необработанный) – отбор почвы выполняли на стадии «колошения» ячменя в сроки: 8 июня, 20 июня, 28 июня, почва без обработки посевов микробными биопрепаратами;

– Гордебак, Полибакт, Ресойлер – отбор почвы выполняли на стадии «колошения» ячменя в сроки: 8 июня, 20 июня, 28 июня, обработка посевов микробными биопрепаратами, соответственно, «Гордебак», «Полибакт», «Ресойлер».

Для оценки влияния тестируемых биопрепаратов на микрофлору почвы использовали чашечный метод Коха, с помощью которого определяли численность аммонифицирующих, амилитических, олигокарбофильных, автохтонных микроорганизмов на селективных питательных средах: мясопептонном агаре (МПА), крахмало-аммиачном агаре (КАА), нитритном (НА) и голодном (ГА) агарах, соответственно. Все посеы проводили в трехкратной повторности. Численность бактерий определяли в колониеобразующих единицах (КОЕ), пересчитывали на 1 г абсолютно сухой почвы. Влажность почвы определяли термостатно-весовым методом согласно ГОСТу [11]. Расчет эколого-трофических индексов и коэффициентов выполняли по [12].

Оценку состава и спектра микробного сообщества осуществляли по коэффициенту минерализации и иммобилизации (КАА/МПА), индексу олиготрофности (ГА/МПА), коэффициенту педотрофности (НА/МПА) [12]. Глубину и интенсивность превращения азотсодержащих соединений при участии микробонаселения почвы в тестируемых образцах анализировали по коэффициенту трансформации органического вещества $P_m = (МПА + КАА) \times (МПА/КАА)$ [13].

Для статистической обработки данных, построения таблиц и диаграмм использовали Excel 2010 (Microsoft, USA) с расчетом выборочной средней арифметической и стандартной ошибки среднего. Для сравнения изучаемых показателей между опытными и контрольными группами применили t-критерий Стьюдента. Нулевую гипотезу отклоняли при уровне статистической значимости $p < 0,05$ [14].

Результаты исследования и их обсуждение. Май в 2023 г. начался с холодной первой декады при температуре воздуха ниже климатической нормы на 3,0 °С. Вторая и третья декады были теплыми с положительной аномалией 1,4 и 1,0 °С соответственно. В отношении количества выпавших осадков установлен их недобор, на протяжении всех трех декад мая наблюдали значительный дефицит осадков, менее 20 % нормы [15]. Июнь характеризовался более прохладной первой декадой с температурой воздуха на 0,8 °С ниже нормы. Вторая и третья декады были теплыми с положительной аномалией равной 1,1 и 1,7 °С соответственно. На протяжении первой и второй декад установлен недобор осадков: выпало 31 и 68 % декадной нормы соответственно. В третьей декаде выпало 36,8 мм, что составляет 142 % от климатической нормы [16]. На основании существенного недостатка почвенной влаги в мае и в первые две декады июня можно предположить негативное влияние засухи на рост микроорганизмов почвы в анализируемый период времени.

Соответственно климатическим характеристикам мая и июня менялась и влажность почвы. В первой декаде июня отмечена низкая влажность почвы, от 3,0 до 5,1 % в исследуемых образцах почвы, что существенно ниже, чем значение показателя в контрольном образце почвы, отобранном в мае (14,2 %) (таблица 1). Во второй декаде ввиду отсутствия осадков, отмечена тенденция к дальнейшему снижению значения коэффициента влажности почвы до 1,3–2,6 % (таблица 1). Для третьей декады июня характерно существенное возрастание коэффициента влажности почвы до оптимальных параметров 20,9–22,9 %.

Таблица 1 – Значение коэффициента влажности почвы (%)

Контроль начальный (отбор почвы 17.05.23)	Сроки отбора почвы	Контроль	Гордебак	Полибакт	Ресойлер
14,2	08.06.23	4,8	3,0	5,1	4,8
14,2	20.06.23	2,6	1,3	1,4	1,8
14,2	28.06.23	20,9	21,3	22,4	22,9

Проанализируем влияние тестируемых биопрепаратов на численность основных групп почвенных микроорганизмов в образцах, отобранных по трем декадам июня (таблицы 2–4).

В первой декаде июня численность микроорганизмов существенно возрастает по сравнению с данными начального контроля в 2 и более раз в контрольном и трех опытных образцах почвы для представителей олигокарбофильной группы и в варианте применения Полибакта в отношении амилотической группы микроорганизмов (таблица 2). Однако следует подчеркнуть, что не установлено какого-либо эффекта биопрепаратов на изменение численности микроорганизмов по сравнению со своим исходным контролем.

Таблица 2 – Численность микроорганизмов почвы, КОЕ/г абс.сух. почвы $\times 10^6$

Группа микроорганизмов	Контроль начальный	Отбор почвы 08.06.23			
		контроль	Гордебак	Полибакт	Ресойлер
аммонифицирующие	24,3 \pm 2,2	24,2 \pm 1,1	19,7 \pm 4,2	22,3 \pm 2,1	25,9 \pm 2,2
амилотические	20,8 \pm 2,4	31,1 \pm 5,1	35,9 \pm 7,1	42,1 \pm 8,2 ²	35,1 \pm 7,4
олигокарбофильные	11,9 \pm 1,3	21,5 \pm 5,1 ²	22,9 \pm 5,1 ²	27,5 \pm 6,1 ²	24,4 \pm 2,4 ²
автохтонные. олиготрофы	43,1 \pm 4,5	42,6 \pm 7,2	31,3 \pm 6,1	40,3 \pm 7,4	38,5 \pm 7,6
Пм	54,0	43,0	30,5	34,1	45,0

Примечание: статистически достоверно при $p < 0,05$ по сравнению с ¹контролем; ²контролем начальным (отбор почвы 17.05.23).

Во второй декаде июня, при сохранившемся значительном недостатке влаги в почве, поддерживается тенденция к повышению численности микроорганизмов в 2,0 раза по сравнению со значением начального контроля для группы олигокарбофильных бактерий при обработке Гордебакком и Полибактом, и в 3,0 раза – при обработке Ресойлером (таблица 3).

Выявлено существенное увеличение численности микроорганизмов по сравнению с начальным контролем амилотической группы в 1,5 раза в вариантах, соответственно, контроль и при обработке Гордебакком, и в 2,8 раза – при обработке Ресойлером. Установлено достоверное уменьшение численности микроорганизмов автохтонной экологической ниши в 1,4–1,6 раза в вариантах исходного контроля и при обработке тремя тестируемыми биопрепаратами (таблица 3).

Необходимо подчеркнуть, что во второй декаде июня отмечен по сравнению с контрольной (исходной) выборкой эффект действия инокулянта Ресойлер, который выразился как существенное увеличение численности микроорганизмов в 1,8 раза в отношении представителей амилотической группы и в 2,0 раза в отношении олигокарбофильной группы. Также отмечено снижение в 2,0 раза численности микроорганизмов амилотической группы в варианте обработки Полибактом (таблица 3).

Таблица 3 – Численность микроорганизмов почвы, КОЕ/г абс.сух. почвы $\times 10^6$

Группа микроорганизмов	Контроль начальный	Отбор почвы 20.06.23			
		контроль	Гордебак	Полибакт	Ресойлер
аммонифицирующие	24,3 \pm 2,2	21,8 \pm 2,1	24,8 \pm 2,2	16,2 \pm 1,3 ²	22,0 \pm 2,2
амилотические	20,8 \pm 2,4	30,7 \pm 3,1 ²	31,9 \pm 3,1 ²	15,6 \pm 1,2 ¹	56,50 \pm 5,4 ^{1,2}
олигокарбофильные	11,9 \pm 1,3	17,1 \pm 2,1	21,6 \pm 2,2 ²	24,2 \pm 2,7 ²	33,9 \pm 3,4 ^{1,2}
автохтонные. олиготрофы	43,1 \pm 4,5	26,8 \pm 2,7 ²	28,4 \pm 2,9 ²	28,1 \pm 2,9 ²	31,1 \pm 3,1 ²
Пм	54,0	37,3	44,3	33,0	30,6

Примечание: статистически достоверно при $p < 0,05$ по сравнению с ¹контролем; ²контролем начальным (отбор почвы 17.05.23).

В третьей декаде июня в результате обильного выпадения осадков установлено повышение влажности почвы до 20,9–22,9 % в тестируемых образцах (таблица 1). Было выявлено влияние трех биопрепаратов на численность микроорганизмов для представителей олигокарбофильной группы, что выразилось в снижении значений в 1,6–2,7 раза по сравнению с исходным контролем (таблица 4), а для олиготрофов наблюдали увеличение численности микроорганизмов в 1,5–2,1 раза.

Таблица 4 – Численность микроорганизмов почвы, КОЕ/г абс.сух. почвы $\times 10^6$

Группа микроорганизмов	Контроль начальный	Отбор почвы 28.06.23			
		контроль	Гордебак	Полибакт	Ресойлер
аммонифицирующие	24,3 \pm 2,2	24,4 \pm 2,5	23,0 \pm 2,4	19,9 \pm 2,1	21,5 \pm 2,2
амилолитические	20,8 \pm 2,4	47,6 \pm 5,1 ²	38,8 \pm 4,1 ²	43,5 \pm 4,5 ²	43,2 \pm 4,4 ²
олигокарбофильные	11,9 \pm 1,3	40,3 \pm 5,1 ²	14,5 \pm 1,5 ¹	16,7 \pm 1,8 ¹	24,5 \pm 2,5 ^{1,2}
автохтонные. олиготрофы	43,1 \pm 4,5	20,2 \pm 2,2 ²	29,6 \pm 3,1 ¹	43,0 \pm 4,4 ¹	33,8 \pm 3,6 ¹
Пм	54,0	36,8	36,5	29,2	32,3

Примечание: статистически достоверно при $p < 0,05$ по сравнению с ¹контролем; ²контролем начальным (отбор почвы 17.05.23).

Таким образом, если анализировать изменение численности микроорганизмов в зависимости от влажности почвы при обработке тестируемыми биопрепаратами, то следует отметить, что из основных групп зимогенной экологической ниши практически не было изменений среди представителей аммонифицирующих микроорганизмов, которые участвуют в разложении азотсодержащего органического вещества почвы. Первичные этапы превращения углеводов соединений почвы происходят более интенсивно по сравнению с отобранными в мае контрольными образцами при участии представителей амилолитической группы как в исходном контрольном, так и в трех опытных образцах при отборе на протяжении трех декад июня. Отмечено достоверное усиление активности амилолитических микроорганизмов при обработке инокулянтом Ресойлером и снижение их активности в варианте обработки биопрепаратом Полибактом.

Установлено существенное влияние микробиологических препаратов на представителей олиготрофной микробной ниши, в частности, олигокарбофильной микрофлоры, которая участвует в глубокой минерализации органического вещества почвы и начале его гумификации. И если во второй декаде июня в варианте обработки Ресойлером отмечено возрастание указанного процесса, то в третьей декаде при оптимальной влажности почвы отмечали подавление процессов преобразования промежуточного вещества.

В первой декаде июня не выявлено изменение численности микроорганизмов автохтонной экологической ниши, которые разлагают и трансформируют специфическое органическое вещество. Процесс протекает с интенсивностью, зафиксированной ранее в отобранном в мае образце почвы. Во второй декаде июня преобразование на конечных этапах почвенного органического вещества снижается по сравнению с майским образцом. Однако уже в третьей декаде в образцах почвы, обработанных тестируемыми препаратами, установлено возрастание процессов поликонденсации и полимеризации.

Анализ значений коэффициента трансформации органического вещества показывает, что в образце, отобранном в мае, значение равно 54,0, а для трех декад июня характерна меньшая интенсивность трансформации растительных остатков в органическое вещество почвы, о чем свидетельствуют более низкие в 1,2–1,5 раза значения обсуждаемого коэффициента (таблицы 2–4), и что, в свою очередь, определяет более низкую активность микробиологических и биохимических процессов [13].

При исследованиях почвенной микрофлоры агроценоза, помимо выявления численности представителей различных групп микробоценоза, производят расчет эколого-трофических коэффициентов и индексов, что дает возможность проанализировать особенности взаимоотношений отдельных основных групп микроорганизмов, участвующих в общем процессе превращения органического вещества почвы [12].

Для текущего эксперимента было проанализировано влияние биопрепаратов «Гордебак» и «Полибакт» и инокулянта «Ресойлер» на эколого-трофические индексы и коэффициенты.

Для образца почвы начального контроля характерна величина коэффициента минерализации, равная 0,85. Такое значение свидетельствует о том, что процессы минерализации проходят более интенсивно ввиду слабой обеспеченности почвы аммиачным азотом. Образцы почвы, отобранные в июне в контрольных и опытных вариантах с применением биопрепарата Гордебак, характеризуются более высокими иммобилизационными процессами, поскольку величина коэффициента Мишустина колеблется от 1,29 до 1,95. Необходимо подчеркнуть, что биопрепарат Гордебак в первой декаде июня интенсифицировал иммобилизационные процессы по сравнению с исходным контролем, соответственно 1,29 и 1,83 (рисунок 1). Это свидетельствует о более интенсивном микробиологическом связывании минерального азота, что было инициировано в результате аммонификации белковых соединений, в первую очередь, собственно препарата Гордебак [1]. Во второй и третьей декаде июня Гордебак, наоборот, показал тенденцию к ослаблению процессов иммобилизации по сравнению с исходным контролем.

В июне отмечено замедление процессов деструкции по сравнению с процессами превращения органического вещества почвы, отобранной в мае. Значение индекса олиготрофности, соответственно, составило 0,63–1,65 и 0,49. В первые две декады июня установлено, что препарат Гордебак по сравнению с данными исходного контроля подавляет как процессы глубокой минерализации промежуточного органического вещества почвы, так и начало образования структур гумуса с преобразованием пектинов, полимеров, смол и других органических соединений. В третьей декаде июня при обильных осадках и, соответственно, оптимальной влажности почвы, тем не менее в исходном контроле гумификация вещества еще больше снижается, на что указывает значение индекса Аристовской равное 1,65, в то время как при действии Гордебака значение индекса олиготрофности равно 0,63, что указывает на усиление процессов деградации промежуточного органического вещества (рисунок 1).

Изменение значений коэффициента педотрофности свидетельствует о том, что Гордебак по сравнению с исходными контролями в разные декады июня оказывает влияние на взаимоотношения представителей автохтонных олиготрофов и аммонифицирующих микроорганизмов в соответствии с влажностью почвы. В первые две декады июня отмечено снижение процессов разложения, трансформации и продуцирования гумусовых веществ почвы, в третью декаду июня, наоборот, – повышение интенсивности разложения конечных продуктов преобразования почвы.

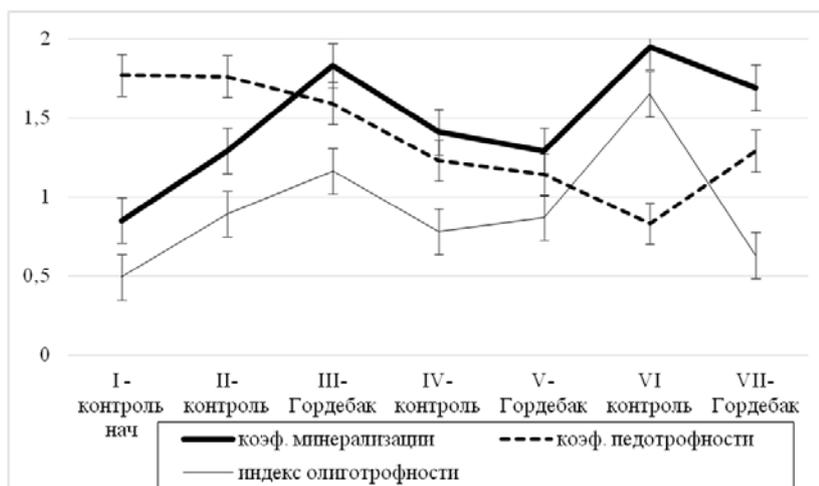


Рисунок 1 – Влияние биопрепарата «Гордебак» на эколого-трофические индексы и коэффициенты (I – контроль начальный (отбор почвы 17.05.23); отбор почвы 08.06.23: II – контроль, III – Гордебак; отбор почвы 20.06.23: IV – контроль, V – Гордебак; отбор почвы 28.06.23: VI – контроль, VII – Гордебак)

Выполненный корреляционный анализ между эколого-трофическими коэффициентами и индексами позволил установить сильную зависимость при коэффициенте корреляции, равном 0,7–0,9, для индекса олиготрофности Аристовской для всех трех тестируемых биопрепаратов. Для коэффициента педотрофности сильная зависимость при $r = 0,9$ установлена между Гордебак и Ресойлером, Полибактом и Ресойлером, и средняя зависимость при $r = 0,6$ – между

Гордебаком и Полибактом. В отношении коэффициента минерализации Мишустина отмечена высокая зависимость между Гордебаком и Полибактом, при $r = 0,9$, но слабая и ближе к слабой зависимость между Гордебаком и Ресойлером, Полибактом и Ресойлером (при r менее 0,3).

Заключение. На основании выполненного микробиологического исследования микробных удобрений «Гордебак», «Полибакт», «Ресойлер», используемых в качестве прикорневой подкормки в фазе «кущения» (в мае) в посевах ярового ячменя, культивируемого на почве Гомельского региона республики, установлено: полученные значения эколого-трофических коэффициентов и индексов указывают на то, что обработка микробными препаратами ожидаемо при превращении промежуточного и специфического органического вещества оказывает влияние в зависимости от влажности почвы; отмечено замедление процессов деструкции и трансформации при недостатке влаги и усиление указанных процессов при оптимальной влажности почвы. Скорость преобразования на начальном этапе превращения свежей органической биомассы для биопрепаратов «Полибакт» и «Гордебак» также стабильно зависит от влажности почвы, в то время как для инокулянта «Ресойлер» отмечено на протяжении трех декад июня преобладание иммобилизационных процессов и более интенсивное использование органического азота почвы микроорганизмами.

Литература

1. Болотник, Е. В. Применение биодинамических препаратов в органическом растениеводстве (обзор) / Е. В. Болотник [и др.] // Микробные биотехнологии : фундаментальные и прикладные аспекты : сб. науч. тр. – Минск : «Беларуская навука», 2017. – Т. 9. – С. 165–182.
2. Комплексный микробный препарат. Полибакт [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://mbio.bas-net.by/prod/polybact/>. – Дата доступа : 14.02.2024.
3. Гордебак. Институт микробиологии НАН Беларуси [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://mbio.bas-net.by/prod/polybact/>. – Дата доступа : 14.02.2024.
4. Инокулянт микробиологический «Ресойлер» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://pesticity.by/regulatory-rosta-rastenij/inokulyant-mikrobiologicheskij-resojler-zh/>. – Дата доступа : 14.02.2024.
5. Снежинский, А. А. Влияние микробного препарата Полибакт на плотность ценоза и фотосинтетическую деятельность растений льна / А. А. Снежинский // Земледелие и растениеводство. – 2023. – № 2. – С. 54–58.
6. Пилюк, Я. Э. Эффективность применения микробных препаратов при инокуляции семян озимого рапса / Я. Э. Пилюк [и др.] // Земледелие и селекция в Беларуси. – 2019. – Т. 55. – С. 57–64.
7. Привалов, Ф. И. Эффективность применения биологических препаратов в агроценозе кормовых бобов в Беларуси / Ф. И. Привалов [и др.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series. – 2022. – Vol. 60, № 3. – P. 296–311.
8. Арашкович, С. А. Деградация гербицидов в дерново-подзолистой почве в посевах гороха овощного / С. А. Арашкович // Защита растений. – 2020. – Т. 44. – С. 220–227.
9. Растениеводство : учебник для вузов / В. Е. Торикив [и др.] // Под общ. ред. В. Е. Торикива. – 2-е изд., стер. – СПб. : Изд-во «Лань», 2022. – 604 с.
10. Теппер, Е. З. Практикум по микробиологии / Е. З. Теппер, В. К. Шильникова, Г. И. Переверзева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1987. – 239 с.
11. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений : ГОСТ 28268-89. – Введ. 01.06.1990. – М., 2006. – 8 с.
12. Титова, В. И. Методы оценки функционирования микробоценоза почвы, участвующего в трансформации органического вещества : науч. метод. пособ. / В. И. Титова, А. В. Козлов. – Н. Новгород : Нижегород с.-х. акад., 2012. – 192 с.
13. Зинченко, М. К. Влияние известкования на численность эколого-трофических групп микроорганизмов в серой лесной почве / М. К. Зинченко, С. И. Зинченко // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 7. – С. 43–47.
14. Доспехов, Б. А. Практикум по земледелию : учеб. для ун-тов / Б. А. Доспехов, И. П. Васильев, А. М. Туликов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1987. – 58 с.
15. Климатическая характеристика мая 2023 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://pogoda.by/information/news/20272>. – Дата доступа : 22.02.2024.
16. Климатическая характеристика июня 2023 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://pogoda.by/information/news/20448>. – Дата доступа : 22.02.2024.

Распределение вегетационного индекса NDVI на территории Гомеля

А.С. СОКОЛОВ

В статье представлены результаты анализа пространственного распределения значений нормализованного относительного вегетационного индекса NDVI, вычисленных на основе космического снимка спутника Sentinel от 15.08.2023 г. на территории города Гомеля. Выделены ареалы с повышенными и пониженными относительно фоновых значениями NDVI. Для городских районов определены средние значения и размах значений показателя, а также его распределение по диапазонам. Установлено, что Центральный район характеризуется наибольшей контрастностью значений, Новобелицкий – наиболее высокими значениями, Железнодорожный – наиболее низкими значениями.

Ключевые слова: вегетационный индекс, NDVI, городская растительность, Sentinel, Гомель.

The article presents the results of an analysis of the spatial distribution of the normalized difference vegetation index NDVI values, calculated on the basis of a satellite image of the Sentinel satellite dated August 15, 2023 in the city of Gomel. The areas with increased and decreased relative to background NDVI values were identified. For urban areas, the average values and values deviation, as well as its distribution across ranges, have been determined. It has been established that the Central district is characterized by the highest contrast of values, Novobelitsky – by the highest values, Zheleznodorozhny – by the lowest values.

Keywords: vegetation index, NDVI, urban vegetation, Sentinel, Gomel.

Для оценки состояния экосистем различных территорий всё чаще применяются материалы дистанционного зондирования Земли, на основании которых определяются различные характеристики растительного покрова и их пространственная и временная динамика. Одним из наиболее распространённых показателей при этом являются вегетационные индексы, рассчитываемые путём операций с величинами интенсивности отражённого солнечного излучения в различных диапазонах электромагнитного спектра и способные характеризовать различные аспекты состояния растительности. Наиболее распространённым вегетационным индексом является NDVI – нормализованный относительный вегетационный индекс, рассчитываемый по формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1)$$

где *NIR* – интенсивность отражённого излучения в ближнем инфракрасном диапазоне; *RED* – интенсивность отражённого излучения в красном диапазоне.

Этот индекс рассматривают в качестве количественной характеристики фотосинтетически активной биомассы, он является надёжным дистанционным показателем первичной продуктивности наземных экосистем [1]. Его применяют и для оценки состояния городской растительности, оценки уровня озеленения, мониторинга площадей и состояния зеленых зон городов [2], [3], [4]. С его помощью возможно идентифицировать участки города с низкими показателями озеленённости, что весьма актуально для контроля соблюдения норм озеленённости в процессе градостроительного освоения городских территорий, для определения экосистемных функций растительного покрова в городах [5].

Целью исследования является выявление пространственных особенностей распределения вегетационного индекса NDVI по площади г. Гомеля. Источником данных стал космический снимок спутника Sentinel-2B от 15.08.2023 г., полученный с помощью модуля *Semi-Automatic Classification Plugin* программы QGIS 3.34.3. Данный модуль позволяет в разделе *Download products* задать границы полигона (непосредственно на картографической подложке или путём ввода координат границ вручную), на которые необходимо получить изображение, выбрать спутник (Sentinel, Landsat, Terra) или цифровую модель рельефа Copernicus, задать временной диапазон и максимальное покрытие облаками и получить список доступных снимков с возможностью загрузки в QGIS цветосинтезированного изображения низкого качества каждого снимка для предпросмотра. Всего на август 2023 доступно 29 снимков, за-

хватывающих территорию Гомеля с различной степенью покрытия облаками – от 0 до 98 %, из которых необходимо отобрать те, на которых облака не закрывали бы целевую территорию. Сам по себе показатель доли покрытия облаками от общей площади снимка не может являться критерием отбора, так как территория городов небольшая по сравнению с площадью снимков (ширина полосы съёмки спутника Sentinel составляет 290 км), поэтому возможны ситуации, когда при большой облачности в целом нужная территория является свободной от облаков, таким образом, оценивать пригодность каждого снимка необходимо индивидуально. Для загрузки можно выбрать все каналы спутникового снимка или указать только необходимые. Для расчёта NDVI использовался 8 канал (ближний инфракрасный, диапазон длин волн 785–899 нм) и 4 канал (красный, диапазон 650–680 нм), пространственное разрешение 10 м, радиометрическое разрешение 12 бит. С использованием калькулятора растров QGIS на основе этих двух каналов для каждого пиксела был рассчитан индекс NDVI по формуле (1) и получен одноканальный результирующий растр, в котором полученные значения с помощью инструментов растрового анализа QGIS были округлены до 2 знака после запятой. На его основе было создано одноканальное псевдоцветное изображение, отражающее диапазон значений NDVI для каждого пиксела (рисунок 1).

Территории с отрицательными значениями NDVI соответствуют, главным образом, водным объектами. Крупные территории с высоким (более 0,8) значением приурочены к пойме реки Сож, а также лесным массивам на южной, западной и восточной окраинах города, к участкам между южной частью улицы Юбилейной и 16-м микрорайоном, между улицей Лепешинского и 1-м переулком Крупской, в восточной части 1-го переуллка Крупской, вдоль улицы Федюнинской, вокруг Гомельской дистанции охранных лесонасаждений. Данные территории с наиболее высокой фитомассой следует рассматривать как узловые элементы экологического каркаса города, обеспечивающие сохранение важных экосистем и включающие центры распространения видов флоры и фауны, и ареалы биоразнообразия популяций. Также повышенные значения NDVI характерны для крупного массива усадебной застройки на северо-востоке Советского района (между улицами Полесская и Барыкина). Крупные территории с пониженным значением NDVI приурочены промышленным зонам и районам многоэтажной застройки.

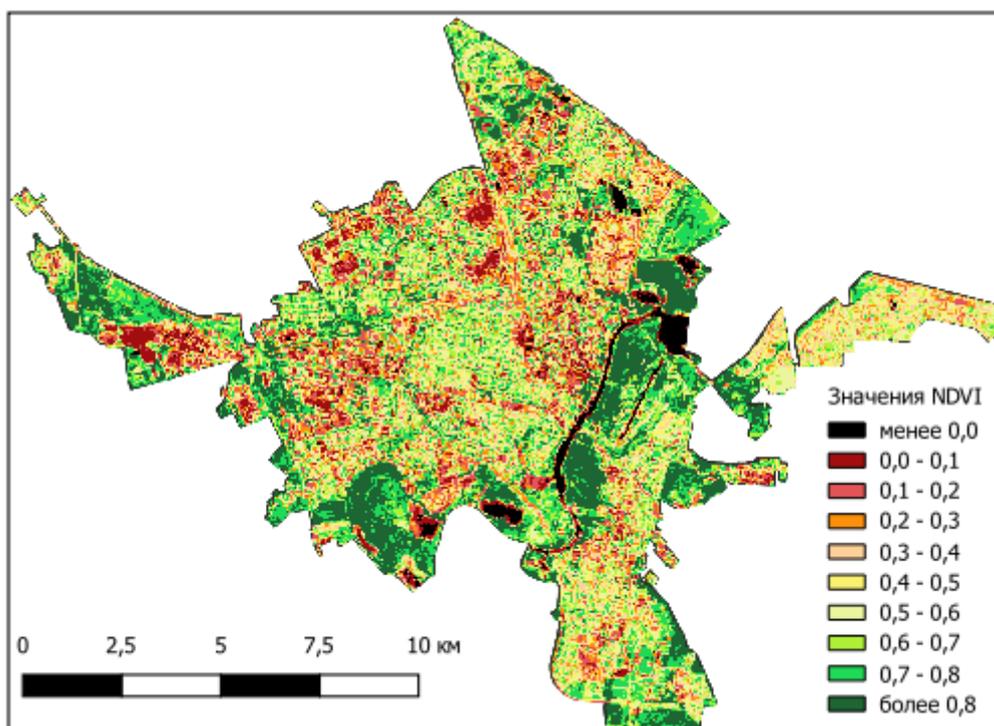


Рисунок 1 – Распределение значений индекса NDVI по территории г. Гомеля, 15 августа 2023 г.

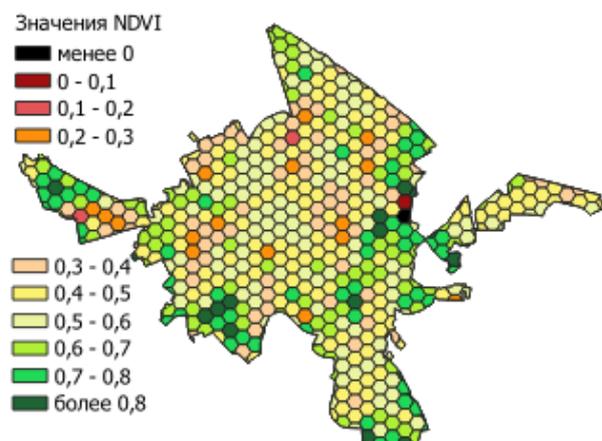


Рисунок 2 – Средние значения NDVI

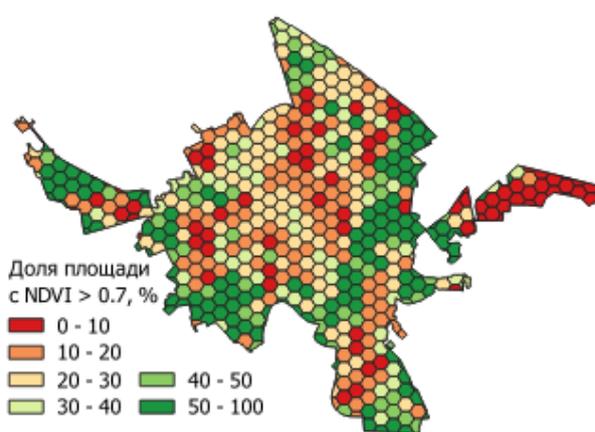


Рисунок 3 – Доля площади ячеек с NDVI > 0,7

Для более наглядного отображения закономерностей распределения NDVI по территории Гомеля вся территория была разделена на гексагональные ячейки площадью 0,32 км² и произведён подсчёт среднего значения NDVI для всех пикселей в пределах ячейки (рисунок 2), а также доли пикселей со значением NDVI больше 0,7 (рисунок 3). Данные изображения позволяют достоверно локализовать ареалы с повышенными и пониженными средними показателями NDVI относительно фоновых (к таковым отнесены значения, характерные для большей части ячеек – 0,4–0,6, занимающих 54,2 % территории города), а также ареалы с незначительной долей участков растительности с высокой фитомассой (13,2 % площади занимают участки где доля пикселей с NDVI выше 0,7 составляет менее 10 %).

Таблица 1 – Показатели среднего значения и распределения значений NDVI по диапазонам на территории г. Гомеля и городских районов

Район	Ср. знач.	Медиана	Стандартное отклонение	Доля площади со значениями NDVI, %									
				<0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	>0.8
Центральный	0,49	0,54	0,32	4,1	9,8	8,7	8,4	8,0	7,8	7,7	9,0	14,0	22,4
Советский	0,53	0,58	0,27	0,3	7,7	9,1	7,7	8,1	9,1	10,2	12,2	17,1	18,6
Железнодорожный	0,50	0,54	0,25	0,0	7,0	9,8	8,3	9,3	11,2	12,7	14,2	15,6	12,0
Новобелицкий	0,56	0,58	0,23	0,3	2,8	5,1	6,9	10,3	12,9	14,3	13,7	15,2	18,6
г. Гомель	0,52	0,57	0,26	1,9	5,0	8,2	7,7	8,8	10,3	11,5	12,6	15,6	18,3

Особенности распределения вегетационного индекса NDVI были проанализированы в разрезе административных районов г. Гомеля (таблица 1). Наиболее высокое среднее значение индекса характерно для Новобелицкого района, где также наблюдается самый низкий показатель стандартного отклонения, отражающий степень разброса значений относительно среднего. Противоположная ситуация в Центральном районе, где среднее значение NDVI минимально при максимальном стандартном отклонении. Это связано с тем, что в Центральном районе доля площадей водных объектов с отрицательными значениями индекса более чем на порядок превышает этот показатель для других районов. Без учёта пикселей с отрицательными значениями NDVI среднее его значение для Центрального района составляет 0,52 и превышает значение для Железнодорожного района. В Центральном районе доля площади с очень высокими значениями NDVI (более 0,8) максимальная и намного превышает этот показатель для остальных районов. Одновременно с этим район характеризуется практически полным отсутствием усадебной застройки, высокой степенью освоенности территории и плотностью застроенных и лишённых растительности участков, значительна доля в нём новых микрорайонов, возведённых на массивах намывных песков. Поэтому повышенная доля площадей с высокими значениями NDVI уравнивается также повышенными долями площадей с низкими его значениями, так, доля площадей с NDVI от 0 до 0,3 составляет 26,9 %, что на 6 % выше среднегородского уровня и на 12,1 % выше, чем для Новобелицкого района. Совместно эти факторы обуславливают то, что даже без учёта водных объектов, среднее значение NDVI для центрального района ниже, чем для Советского и Новобелицкого.

Изучение распределения вегетационного индекса NDVI по территории г. Гомеля позволяет сделать следующие выводы:

1. Распределение NDVI в г. Гомеле характеризуется существенной неоднородностью. Имеется ряд сравнительно крупных массивов растительности с высокими значениями NDVI (более 0,8), которые целесообразно рассматривать как узловые элементы экологического каркаса. Вместе с тем, имеются значительные по площади участки, преимущественно в центральной, северной и западной частях, где значение этого показателя довольно низкое.

2. Анализ распределения изучаемого показателя в разрезе гексагональных ячеек геометрической сетки позволяет довольно точно локализовать ареалы с повышенными и пониженными средними показателями NDVI, а также ареалы с незначительной долей участков растительности с высокой фитомассой.

3. Наиболее высокое среднее значение NDVI в Новобелицком районе, также выше среднего оно в Советском районе. Это связано с наличием лесных массивов на окраинах и заметной долей усадебной застройки. Наиболее низкие значения в Железнодорожном районе. Для центрального района характерна высокая контрастность, связанная с наличием более высоких, чем в других районах, долей как площадей с высокими значениями NDVI (выше 0,8) так и площадей с низкими его значениями (менее 0,3).

Литература

1. Гусев, А. П. Изменения NDVI как индикатор динамики экологического состояния ландшафтов (на примере восточной части Полесской провинции) / А. П. Гусев // Вестник ВГУ. Серия : География. Геоэкология. – 2020. – № 1. – С. 101–107.

2. Табунщик, В. А. Оценка вегетационного индекса NDVI на территории города федерального значения Севастополь в 2017 году по результатам анализа космических снимков Sentinel-2 / В. А. Табунщик, Р. В. Горбунов, А. А. Даниленко // Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН. – 2019. – Вып. 4 (12). – С. 56–70.

3. Капитонова, Т. А. Оценка обеспеченности зелеными насаждениями городской промышленной зоны Челябинска с использованием изображений Landsat / Т. А. Капитонова [и др.] // Вестник ВГУ. Серия : География. Геоэкология. – 2023. – № 1. – С. 93–102.

4. Фетисов, Д. М. Оценка уровня озеленения города Биробиджана с применением мультиспектральных данных / Д. М. Фетисов, Д. В. Жучков, М. В. Горюхин // Биосфера. – 2021. – Т. 13, № 4. – С. 170–179.

5. Кравчук, Л. А. Дифференцированная оценка зеленой инфраструктуры г. Минска с использованием данных дистанционного зондирования Земли / Л. А. Кравчук, А. А. Яновский, Н. М. Баженова, А. Ч. Пац // Природопользование. – 2019. – № 2. – С. 152–167.

Влияние микроорганизмов основных трофических групп на содержание в биодоступных формах макро- и микроэлементов в дерново-подзолистой супесчаной почве Полесского государственного радиационно-экологического заповедника

Е.А. ТАНКЕВИЧ, Ю.К. СИМОНЧИК

В работе исследуется влияние микроорганизмов основных трофических групп на содержание в биодоступных формах макро- и микроэлементов в дерново-подзолистой супесчаной почве в условиях повышенной радиационной нагрузки. Консорциум микроорганизмов, входящий в состав препарата EM-1, и спорообразующие аммонификаторы снизили содержание стабильного изотопа Cs в водорастворимой форме на 40 % и 21,2 %, соответственно. Группа аммонифицирующих микроорганизмов привела к уменьшению содержания данного микроэлемента в ионообменной форме на 15,9 %. Увеличили же содержание Cs в ионообменной форме олигокарбофильные микроорганизмы – на 23 %. Внесение микробиологического препарата EM-1 в дерново-подзолистую супесчаную почву приводит к резкому увеличению содержания в ней K в биодоступных формах, что важно для ослабления корневого поглощения радиоактивных изотопов Cs.

Ключевые слова: почвенные ассоциации микроорганизмов, радиоактивное загрязнение, зона отчуждения Чернобыльской АЭС, биологическая доступность, макроэлементы, микроэлементы.

The work examines the influence of microorganisms of the main trophic groups on the content of macro- and microelements in bioavailable forms in soddy-podzolic sandy loam soil under conditions of increased radiation load. The consortium of microorganisms included in the preparation EM-1 and spore-forming ammonifiers reduced the content of the stable Cs isotope in water-soluble form by 40 % and 21,2 %, respectively. A group of ammonifying microorganisms led to a decrease in the content of this microelement in ion-exchange form by 15,9 %. Oligocarbophilic microorganisms increased the content of Cs in the ion-exchange form by 23 %. The introduction of the microbiological preparation EM-1 into soddy-podzolic sandy loam soil leads to a sharp increase in the content of K in bioavailable forms, which is important for weakening the root absorption of radioactive Cs isotopes.

Keywords: associations of soil microorganisms, radioactive contamination, CNPP exclusion zone, bioavailability, macroelements, microelements.

Введение. Вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС в окружающую среду поступило большое количество радиоактивных изотопов, что привело к загрязнению сельскохозяйственных угодий территории Республики Беларуси радионуклидами техногенного происхождения. Степень поглощения радиоактивных изотопов зависит от их физико-химических форм нахождения в почве.

Одним из важнейших компонентов биогеоценозов является почвенная микрофлора, так как она определяет степень трансформации органических веществ в почве и, таким образом, влияет на скорость круговорота веществ. Микроорганизмы являются важным фактором мобилизации или, наоборот, иммобилизации радионуклидов в почве. Интенсивность почвенных процессов может быть охарактеризована анализом состояния в почве отдельных групп микроорганизмов и их физиологических группировок [1]. Микрофлора оказывает значительное влияние на биологическую доступность микроэлементов и радионуклидов в почве и их поведение в биогеохимических циклах. Почвенные микроорганизмы могут существенно изменять физико-химические формы техногенных радионуклидов в результате биоаккумуляции в живых клетках, биосорбции на клеточных компонентах, прямого восстановления или окисления и биометилирования. Данные процессы в различной степени влияют на подвижность и биодоступность элементов. При этом необходимо учитывать свойства исследуемой почвы и условия окружающей среды [2].

Целью работы являлось изучение влияния микроорганизмов основных трофических групп на содержание в биодоступных формах макро- и микроэлементов в дерново-подзолистой супесчаной почве с повышенным уровнем радиационного воздействия.

Материалы и методы исследований. Объектом исследования являлись микроорганизмы основных трофических групп дерново-подзолистой супесчаной почвы зоны отчуждения Чернобыльской АЭС.

Отбор почвенных образцов проводили в летний период согласно стандартным методикам [3] в частном подворье бывшего населенного пункта Борщевка (Гомельская область, Беларусь, Полесский государственный радиационно-экологический заповедник).

Для модельного эксперимента по изучению влияния основных трофических групп микроорганизмов была использована стерилизованная дерново-подзолистая супесчаная почва. Стерильность почвы была достигнута путем автоклавирования при температуре 127 °С и давлении 1,5 атм. в течение 45 минут. Данной почвой заполняли пластиковые емкости из расчета 50 г сухой почвы на сосуд.

В результате посевов на элективные агаризованные питательные среды, согласно общепринятых в микробиологии методов [3], [4], выделено 9 основных трофических групп почвенных микроорганизмов:

- 1) аммонифицирующие микроорганизмы;
- 2) общий комплекс культивируемых микроорганизмов;
- 3) амилотические микроорганизмы;
- 4) олигонитрофильные микроорганизмы;
- 5) фосфатмобилизующие микроорганизмы;
- 6) спорообразующие аммонифакторы;
- 7) автохтонные олиготрофы;
- 8) целлюлозоразрушающие аэробные;
- 9) олигокарбофильные микроорганизмы.

Также дополнительно исследовали влияние микробиологического препарата EM-1, включающего 5 основных групп микроорганизмов: молочнокислые бактерии (*Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei*, *Streptococcus lactis*), фотосинтезирующие бактерии (*Rhodospseudomonas palustris* и *Rhodobacter sphaeroides*), дрожжи (*Saccharomyces cerevisiae* и *Candida utilis*). Кроме того, в небольших количествах препарат включает актиномицеты (*Streptomyces albus* и *Streptomyces griseus*) и ферментирующие грибы (*Aspergillus oryzae*, *Mucor hiemalis*).

Суспензии почвенных микроорганизмов готовили на основе мясо-пептонного бульона (МПБ). Для этого в МПБ вносили из чашек Петри стерильной микробиологической петлей инокулянт, представляющий одну из выделенных групп почвенных микроорганизмов, тем самым были получены 9 опытных суспензий.

Полученные бактериальные культуры помещали в термостат и инкубировали при температуре $37,0 \pm 0,1^\circ\text{C}$ в течение суток до появления визуальной мутности. Мутность этих жидких сред доводили до стандарта ВВЛ (стандарта мутности № 0.5 по МакФарланду) – при длине волны 625 нм оптическая плотность суспензий составляла 0,08-0,10 [5].

Оптическую плотность измеряли на спектрофотометре ПЭ-5300 ВИ.

В каждую стерильную пластиковую емкость, заполненную 50 г сухой почвы, при помощи стерильного цилиндра вносили по 15 мл готовых суспензий каждой из исследуемых групп почвенных микроорганизмов (содержащих приблизительно $1,5 \times 10^8$ КОЕ/мл), а также дозатором добавляли 1 мл хлорида стабильного цезия (CsCl) в концентрации 0,025 мкг/мл. С помощью этого приема моделировалось поведение изотопа данного элемента на начальных этапах после выпадений, до включения его в биогеохимический круговорот.

В контрольные образцы (К) вносили по 15 мл мясо-пептонного бульона, без инокуляции микроорганизмов.

Пластиковые пробирки закрывали крышками, для дополнительной аэрации в крышках были сделаны небольшие отверстия, которые на время эксперимента были закрыты стерильной гигроскопической ватой.

Через 15 дней после закладки эксперимента в каждую емкость вносили по 5 мл стерилизованной воды, чтобы не допустить пересыхания почвенных образцов. Продолжительность модельного эксперимента составила 30 суток.

Для изучения влияния каждой из основных трофических групп микроорганизмов на содержание в биодоступных формах макро- и микроэлементов в дерново-подзолистой супесчаной почве проводили последовательную экстракцию из почвенных образцов [6], [7].

Измерение концентрации изотопов различных элементов в каждом опытном варианте проводили в пятикратной повторности на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ICP-MS Elan-DRCe (Perkin Elmer) согласно СТБ ISO17294-1-2007 и СТБ ISO 17294-2-2007 [8], [9].

Последовательная экстракция из почвенных образцов включала следующие этапы:

1. Водорастворимую форму выделяли посредством экстракции в дистиллированной воде. Образец почвы 20 г помещали в 200 мл дистиллированной воды. Суспензию взбалтывали при комнатной температуре на протяжении 24 ч. Экстракт отделяли от почвы фильтрованием. Почву промывали на фильтровальной бумаге 200 мл дистиллированной воды. Жидкую фазу помещали в центрифужные конические пробирки объемом 15 мл для измерения на ICP-MS.

2. Ионообменную форму выделяли посредством экстракции в растворе ацетата аммония. Твердую фазу с предыдущего шага помещали в 200 мл 1 М раствора ацетата аммония с рН доведенной до 7,0. Суспензию взбалтывали при комнатной температуре на протяжении 24 ч. Экстракт отделяли от почвы фильтрованием. Почву промывали 200 мл дистиллированной воды. Жидкую фазу помещали в центрифужные конические пробирки объемом 15 мл для измерения на ICP-MS.

Агрохимический анализ почвенного образца выполняли согласно ГОСТ [10]–[15].

Результаты исследований и их обсуждение. Удельная активность модельной дерново-подзолистой супесчаной почвы составила 12868 ± 775 Бк/кг.

Агрохимические показатели исследуемой почвы представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Агрохимические показатели модельной дерново-подзолистой супесчаной почвы

Агрохимические показатели почвы, единицы измерения	
рН (в KCl), ед.	6,5
Ca (обм), мг/кг	2430
Mg (обм, подв.), мг/кг	91,2
P ₂ O ₅ (подв), мг/кг	3017
Органическое в-во (гумус), %	3,6
S, сумма поглощённых оснований, ммоль / 100 г	41,8
Hг, гидролитическая кислотность, ммоль / 100 г	0,99
T, ёмкость поглощения, ммоль / 100 г	42,79
V, степень насыщенности почв основаниями, %	97,7
K ₂ O (обм.), мг/кг	708

Уровень рН в ней близок к нейтральному. В модельной почве наблюдалось очень высокое содержание обменного кальция и низкое содержание обменного магния. Содержание подвижного фосфора (P₂O₅), обменного калия (K₂O) и гумуса соответствует очень высоким показателям.

В таблице 2 представлена оценка влияния основных трофических групп микроорганизмов на содержание Cs и Sr в биодоступных формах в модельном эксперименте в образцах дерново-подзолистой супесчаной почвы.

Таблица 2 – Содержание Cs и Sr в модельном эксперименте в образцах дерново-подзолистой супесчаной почвы

Варианты опыта	Cs		Sr	
	Водорастворимая форма, мкг/кг	Ионообменная форма, мкг/кг	Водорастворимая форма, мкг/кг	Ионообменная форма, мкг/кг
Контроль (К)	217,8 ± 30,1	3482,2 ± 443,3	5406,5 ± 1565,7	98195,3 ± 7808,4
Аммонифицирующие (1)	208,5 ± 35,3	2927,2 ± 433,3*	4873,3 ± 1097,1	75570,9 ± 5883,3**
Общий комплекс культивируемых микроорганизмов (2)	185,8 ± 29,5*	3667,2 ± 398,2	4184,2 ± 975,7	91550,4 ± 11551,7
Амилолитические (3)	225,7 ± 33,2	3015,1 ± 598,9	4763,9 ± 1477,8	91144,5 ± 8870,0
Олигонитрофильные (4)	226,6 ± 94,8	3795,5 ± 759,9	9652,9 ± 1976,9**	110208,4 ± 25654,8
Фосфатмобилизующие (6)	187,2 ± 90,2	3719,6 ± 714,8	4483,6 ± 1274,8	104056,0 ± 12637,9
Спорообразующие аммонификаторы (7)	171,7 ± 47,2*	3582,8 ± 606,0	7013,8 ± 2614,1	110887,8 ± 5572,7**
Автохтонные. Олиготрофы (10)	184,8 ± 30,4*	3628,6 ± 771,3	5378,3 ± 1823,0	110498,3 ± 14099,6*
Целлюлозоразрушающие аэробные (11a)	190,4 ± 40,2	3730,9 ± 808,7	7504,2 ± 3082,0	109429,3 ± 7823,6*
Олигокарбофильные (14)	214,5 ± 69,1	4283,4 ± 500,5*	5001,3 ± 1840,9	119622,9 ± 17476,4*
ЕМ-1 (ЕМ)	128,4 ± 31,7**	4069,8 ± 465,5	10503,7 ± 2282,3**	120361,0 ± 10171,7**

Примечание: значимые отличия от контроля отмечены звездочками * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$.

Существенное снижение содержания Cs в водорастворимой форме отмечалось в варианте с внесением в дерново-подзолистую супесчаную почву комплекса микроорганизмов, входящих в состав препарата ЕМ-1. Падение концентрации Cs при этом произошло на 40 % относительно контрольного варианта опыта, однако на содержание Cs в ионообменной форме данный препарат не оказал значимого влияния.

Спорообразующие аммонификаторы уменьшили данный показатель на 21,2 % по сравнению с контролем.

Увеличили же содержание Cs в ионообменной форме олигокарбофильные микроорганизмы – на 23 %.

Аммонифицирующие микроорганизмы снизили (на 15,9 %) вклад данной формы нахождения в валовый запас Cs в дерново-подзолистой супесчаной почве. При этом для данных опытных вариантов характерны достоверные различия относительно контрольного образца.

К некоторому снижению содержания водорастворимой формы Cs также привела активность автохтонных олиготрофов, общего комплекса культивируемых микроорганизмов и фосфатмобилизующих микроорганизмов.

Повышенное содержание Sr в водорастворимой форме отмечалось в следующих вариантах опыта: микробиологический препарат ЕМ-1 – на 94,3 %, группа олигонитрофильных микроорганизмов – на 78,5 %, относительно контроля.

Значительного снижения содержания данного микроэлемента в водорастворимой форме в исследуемых вариантах опыта не отмечалось.

В ионообменной форме содержание Sr повысилось практически во всех вариантах опыта. Однако на снижение уровня данного микроэлемента повлияли следующие группы: аммонифицирующие микроорганизмы – на 23 %, амилитические микроорганизмы – на 7,2 % и общий комплекс культивируемых микроорганизмов – на 6,8 %.

В таблице 3 представлена оценка влияния основных трофических групп микроорганизмов на содержание Са и К в биодоступных формах в модельном эксперименте в образцах дерново-подзолистой супесчаной почвы.

Таблица 3 – Содержание Са и К в модельном эксперименте в образцах дерново-подзолистой супесчаной почвы

Варианты опыта	Са		К	
	Водорастворимая форма, мг/кг	Ионообменная форма, мг/кг	Водорастворимая форма, мг/кг	Ионообменная форма, мг/кг
Контроль (К)	704,9 ± 189,4	16987,0 ± 1379,8	1191,1 ± 119,9	1148,1 ± 75,5
Аммонифицирующие (1)	641,9 ± 171,1	13360,2 ± 961,0**	1042,5 ± 128,7*	1118,9 ± 221,5
Общий комплекс культивируемых микроорганизмов (2)	565,9 ± 153,0	15682,3 ± 1100,9*	928,4 ± 193,0*	1143,0 ± 73,7
Амилитические (3)	767,8 ± 118,2	14030,8 ± 2840,9*	1187,1 ± 250,4	910,5 ± 137,8**
Олигонитрофильные (4)	1436,1 ± 343,9**	17800,4 ± 2963,7	1698,1 ± 875,6	988,2 ± 174,1*
Фосфатмобилизующие (6)	593,7 ± 160,8	14943,0 ± 1946,3*	1107,6 ± 255,9	1083,9 ± 170,7
Спорообразующие аммонификаторы (7)	1266,3 ± 602,6*	15882,3 ± 1067,5	1120,6 ± 260,2	1286,3 ± 454,1
Автохтонные. Олиготрофы (10)	952,3 ± 375,1	16081,7 ± 2058,2	822,8 ± 88,5**	1125,5 ± 390,6
Целлюлозоразрушающие аэробные (11а)	1181,8 ± 517,9*	15989,3 ± 1194,7	948,1 ± 167,1*	1138,9 ± 336,3
Олигокарбофильные (14)	763,5 ± 307,6	17426,5 ± 2310,5	943,8 ± 300,8*	1063,5 ± 143,0
ЕМ-1 (ЕМ)	1718,9 ± 374,7**	16943,9 ± 1695,9	2400,0 ± 1184,6*	2548,5 ± 703,7**

Примечание: значимые отличия от контроля отмечены звездочками * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$.

При внесении исследуемых групп микроорганизмов в дерново-подзолистую супесчаную почву существенное повышение содержания Са в водорастворимой форме относительно контрольного образца характерно для следующих опытных вариантов: ЕМ – в 1,4 раза, олигонитрофильных микроорганизмов – в 1,1 раз, спорообразующих аммонификаторов – на 79,6 %, целлюлозоразрушающих аэробных – на 67,7 %.

Снижение количества данного макроэлемента в водорастворимой форме отмечено в варианте опыта с внесением общего комплекса культивируемых микроорганизмов и фосфатмобилизующей группы – на 19,7 % и 15,8 %, соответственно. В ионообменной форме содержание Са снизилось при воздействии аммонифицирующей микрофлоры – на 21,3 % относительно контрольного варианта опыта. Существенного повышения содержания Са в ионообменной форме по сравнению с контролем в исследуемых опытных вариантах не наблюдалось. Внесение в дерново-подзолистую супесчаную почву микробиологического препарата ЕМ-1 повысило содержание К как в водорастворимой, так и в ионообменной формах практически в два раза. Такие группы почвенных микроорганизмов, как аммонифицирующие, целлюлозоразрушающие аэробные, олигокарбофильные, общий комплекс культивируемых микроорганизмов и автохтонные олиготрофы снижают содержание К в водорастворимой форме в дерново-подзолистой супесчаной почве на 13–30 %, соответственно, при этом во всех опытных вариантах наблюдаются достоверные различия относительно контрольного. На увеличение же содержания К относительно контрольного образца в водорастворимой форме значимое влияние оказала олигонитрофильная группа микроорганизмов – на 42,5 %. В отношении ионообменной формы К в дерново-подзолистой супесчаной почве слабый негативный эффект проявляют амилолитические и олигонитрофильные группы микроорганизмов.

Заключение. В ходе исследований оценено воздействие основных трофических групп микроорганизмов на содержание в исследуемой почве стабильных изотопов К, Са, Sr, Cs в биодоступных формах. Консорциум микроорганизмов, входящий в состав препарата ЕМ-1, и спорообразующие аммонификаторы снизили содержание стабильного изотопа Cs в водорастворимой форме на 40 % и 21,2 %, соответственно. Группа аммонифицирующих микроорганизмов привела к уменьшению содержания данного макроэлемента в ионообменной форме на 15,9 %. Повышенное содержание Sr в водорастворимой форме отмечено при внесении микробиологического препарата ЕМ-1 – на 94,3 % и олигонитрофильной группы микроорганизмов – на 78,5 %. При внесении исследуемых групп микроорганизмов в дерново-подзолистую супесчаную почву существенное повышение содержания Са в водорастворимой форме относительно контрольного образца характерно для следующих вариантов: ЕМ – в 1,4 раза, олигонитрофильных микроорганизмов – в 1,1 раз, спорообразующих аммонификаторов – на 79,6 %, целлюлозоразрушающих аэробных – на 67,7 %. Внесение микробиологического препарата ЕМ-1 в дерново-подзолистую супесчаную почву приводит к резкому увеличению содержания в ней К в биодоступных формах, что важно для ослабления корневого поглощения радиоактивных изотопов Cs.

Раскрытие роли почвенных микробиологических процессов в изменении биологической доступности макро- и микроэлементов позволит предложить принципиально иные подходы к регулированию потоков загрязнителей в агроэкосистемах.

Литература

1. Жизнь микробов в экстремальных условиях / Под ред. Д. Кашнера ; пер. с англ. – М. : Изд-во «Мир», 1981. – 521 с.
2. Bioremediation of radioactive waste: radionuclide-microbe interactions in laboratory and field-scale studies / J. R. Lloyd, J. C. Renshaw // *Current Opinion in Biotechnology*. – 2005. – № 16. – P. 254–260.
3. Основные микробиологические и биохимические методы исследования почв / под ред. Ю. М. Возняковской. – Л. : ВНИИСХМ, 1987. – 47 с.
4. Теппер, Е. З. Практикум по микробиологии / Е. З. Теппер, В. К. Шильникова, Г. И. Переверзева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1987. – 239 с.
5. Определение чувствительности микроорганизмов к антибактериальным препаратам : Методические указания. – М. : Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 91 с.
6. Chemical speciation in the environment / Ed. by A. M. Ure, C. M. Davidson. – Second edition. – Wiley-Blackwell, 2002. – 452 p.
7. Hou X. Iodine-129 and caesium-137 in Chernobyl contaminated soil and their chemical fractionation / X. Hou [et al.] // *Science of The Total Environment*. – 2003. – Vol. 308, № 1–3. – P. 97–109.
8. Качество воды. Применение масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Часть 1. Общие требования : СТБ ISO 17294-1-2007. – Введ. 01.05.2008. – Минск : БелГИСС, 2008. – 32 с.

9. Качество воды. Применение масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Часть 2. Определение 62 элементов : СТБ ISO 17294-2-2007. – Введ. 01.05.2008. – Минск : Госстандарт, 2007. – 21 с.
10. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО : ГОСТ 26483-85 ; введ. 01.07.1986. – М. : Издательство стандартов, 1985. – 6 с.
11. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО : ГОСТ 26212-2021. – Взамен ГОСТ 26212-91 ; введ. 01.08.2022. – М. : Российский институт стандартизации, 2021. – 12 с.
12. Определение суммы поглощенных оснований по методу Каппена : ГОСТ 27821-2020. – Взамен ГОСТ 27821-88 ; введ. 01.01.2022. – М. : Стандартиформ, 2020. – 9 с.
13. Определение обменного кальция и обменного (подвижного) магния методами ЦИНАО : ГОСТ 26487-85 ; введ. 01.07.1986. – М. : Издательство стандартов, 1985. – 14 с.
14. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО : ГОСТ 26207-91 ; введ. 01.07.1993. – М. : Издательство стандартов, 1992. – 13 с.
15. Методы определения органического вещества : ГОСТ 26213-2021. – Взамен ГОСТ 26213-91 ; введ. 01.08.2022. – М. : Российский институт стандартизации, 2021. – 12 с.

Институт радиобиологии НАН Беларуси

Поступила в редакцию 05.04.2024

Методические основы оценки фотозащитных свойств экстрактов из лишайников

О.М. ХРАМЧЕНКОВА

Для ацетонового, бензольного, метанольного, хлороформного, этанольного и этилацетатного экстрактов из лишайников *Cladonia arbuscula*, *Evernia prunastri*, *Hypogymnia physodes* и *Ramalina pollinaria* оценивали величины солнцезащитного фактора (SPF), критической длины волны ($\lambda_{\text{крит}}$) и отношения УФ-А/УФ-Б. Использовали концентрации растворов экстрактов 200 мкг/мл, а также IC_{50} и IC_{10} , установленные для культуры кератиноцитов человека (НАСаТ). Показано, при оценке фотозащитные свойства экстрактов из лишайников следует учитывать их цитотоксичность для клеточных культур кожи человека.

Ключевые слова: экстракты из лишайников, ультрафиолет, спектры поглощения, параметры фотозащиты, культура кератиноцитов человека (НАСаТ), цитотоксичность, IC_{50} и IC_{10} .

For acetone, benzene, methanol, chloroform, ethanol and ethyl acetate extracts from the lichens *Cladonia arbuscula*, *Evernia prunastri*, *Hypogymnia physodes* and *Ramalina pollinaria*, the sun protection factor (SPF), critical wavelength (λ_{crit}) and UV-A/UV-B ratio were assessed. Extract solution concentrations of 200 $\mu\text{g/ml}$ were used, as well as IC_{50} and IC_{10} established for human keratinocyte culture (НАСаТ). It has been shown that when assessing the photoprotective properties of extracts from lichens, their cytotoxicity for cell cultures of human skin should be taken into account.

Keywords: lichen extracts, ultraviolet, absorption spectra, photoprotection parameters, human keratinocyte culture (НАСаТ), cytotoxicity, IC_{50} and IC_{10} .

Введение. Возрастание интереса научного сообщества к лишайникам выражается в стремительном росте количества публикаций, посвященных различным аспектам их систематики, физиологии, биохимии и экологии. Важное место занимают работы в области скрининга тех свойств лишайников, которые могут быть использованы человеком для решения ряда насущных задач. В этом смысле широко исследуемыми объектами являются экстракты из лишайников, получаемые с использованием различных растворителей в качестве экстрагентов.

Если не использовать культивируемые микобионты, а сосредоточиться на натуральном сырье, то становится очевидным, что для получения экстрактов имеет смысл использовать те виды лишайников, которые не просто часто встречаются на данной территории, но образуют значимые запасы биомассы. В этом случае возможен их сбор в природных условиях с учетом сезона, для которого показано максимальное содержание вторичных метаболитов, если такие данные для данного вида лишайников вообще имеются. Помимо этого, желательно, чтобы собираемые виды были хорошо узнаваемы в природе, не имели набора хеморас (отличающихся составом вторичных метаболитов), характеризовались такой морфологией слоевищ, которая позволила бы извлечь талломы с субстрата произрастания без повреждений и потерь органов размножения, часто несущих существенный запас лишайниковых веществ.

Собранную биомассу лишайников необходимо как можно быстрее доставить в лабораторию для выполнения следующих операций: тщательный осмотр каждого слоевища на предмет целостности и соответствия целевому изучаемому виду; удаление отмерших участков слоевищ, различных примесей и мусора; организация условий для сушки. Последнее предполагает не только защиту биомассы лишайников от возможного вторичного увлажнения и чрезмерной освещенности, но также наличие «подложки», на которой могли бы собираться органы размножения, которые неизбежно отламываются от подсыхающих слоевищ. Высушивание биомассы лишайников целесообразно производить до воздушно-сухого состояния, после чего ее необходимо измельчить.

Чтобы избежать грубых искажений результатов исследования, сухую биомассу необходимо измельчать до размеров частиц, исчисляемых микрометрами, так как только в этом случае их размеры будут сопоставимы с диаметрами органов размножения лишайников, что позволит от-

бирать навески для экстрагирования, сколько-нибудь равноценно отражающие структуру и биохимический состав слоевищ. Выбор величины навески, растворителя, способа экстрагирования обсуждался нами в [1]. Скажем лишь, что водные экстракты из биомассы лишайников представляют собой субстанции принципиально иного состава, чем полученные с использованием ацетона, бензола, метанола или любого другого органического растворителя. Кроме того, имеет смысл ориентироваться на Международные лихенологические базы данных, в которых приводится состав вторичных метаболитов данного вида лишайников. В этом случае выбор экстрагента может быть обоснован свойствами этих веществ, их растворимостью в том или ином растворителе.

Полученный экстракт нуждается в отгонке растворителя и высушивании до твердого состояния. Здесь возможны методические трудности, связанные с тем, что далеко не все экстракты из лишайников, полученные с использованием органических растворителей различной полярности, при высушивании становятся твердыми и измельчаются до порошкообразного состояния. Экстракты бывают смолоподобными, в силу чего их следует высушивать, распределяя тонким слоем и постоянно перемешивая, до достижения постоянной массы при условиях сушки. Согласно данным множества экспериментальных работ, перечисленных в [1], и на основании собственного опыта, можно рекомендовать хранение экстрактов из лишайников в герметичных емкостях при низких температурах (например, при минус 18 °С).

В зависимости от вида дальнейшего исследования, экстракты из лишайников растворяют в том или ином растворителе. В случае определения фотозащитных свойств экстракта, его растворяют в 96 % этаноле, при этом раствор не бывает прозрачным – сухой экстракт никогда полностью не растворяется даже в растворителе, при помощи которого он был получен. Следовательно, следующей задачей является отделение нерастворимой части экстракта и последующее определение концентрации получаемого раствора, на основании чего возможно приготовление целевых растворов (200 мкг/мл [2]). Именно такую концентрацию экстракта рекомендовано использовать для спектрофотометрического определения величин солнцезащитного фактора SPF (Sun Protection Factor), а также критической длины волны ($\lambda_{\text{крит}}$) и показателя широты фотозащиты в диапазонах ультрафиолета Б (УФ-Б, 280 ÷ 320 нм) и ультрафиолета А (УФ-А, 320 ÷ 400 нм) [3], [4].

Прежде чем изучать фотозащитные свойства растворов экстрактов из лишайников с концентрацией 200 мкг/мл, целесообразно получить их спектры поглощения в диапазоне 290 ÷ 400 нм, убедиться в том, что значения оптических плотностей растворов не выходят за пределы шкалы спектрофотометра. Для растворов экстрактов из лишайников такое происходит достаточно часто. В этом случае необходимо доказать линейности зависимости оптической плотности растворов экстрактов от их концентрации, а также установить параметры данной зависимости, что позволит вычислить искомые значения для заданной концентрации.

Наконец, весьма полезным является определение параметров фотозащиты для растворов экстрактов из лишайников, приготовленных в концентрациях, соответствующих их полулетальным значениям для культур клеток кожи человека – например, для культуры кератиноцитов НАСаТ. Известно, что многие экстракты из лишайников цитотоксичны для клеток кожи [5], [6]. Поэтому дальнейшая разработка солнцезащитного средства из лишайников может оказаться нецелесообразной, поскольку растворы их экстрактов в полулетальных для кератиноцитов концентрациях могут характеризоваться низкими уровнями фотозащиты.

В настоящей работе приводится авторская модификация методики определения фотозащитных свойств экстрактов из лишайников.

Методы исследований. Биомассу лишайников *Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot., *Evernia prunastri* (L.) Ach., *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. и *Ramalina pollinaria* (Westr.) Ach. собирали в пригородных лесах г. Гомеля на типичных для каждого вида субстратах. Сбор, камеральную обработку, сушку и измельчение природного сырья осуществляли с учетом всего, сказанного выше. Навески биомассы лишайников экстрагировали в аппарате Сокслета ацетоном, бензолом, метанолом, хлороформом, этанолом и этилацетатом. Растворители удаляли, экстракты высушивали, гомогенизировали, хранили при минус 18 °С.

Навески экстрактов из лишайников массой около 0,25 г заливали 25 мл этанола, выдерживали 7 суток при периодическом встряхивании, после чего эмульсии экстрактов фильтровали через предварительно взвешенные фильтры. Определяли процент нерастворимой в этаноле части экстракта, а также истинную концентрацию полученного раствора.

Далее готовили спиртовые растворы экстрактов из лишайников с концентрацией 200 мкг/мл, при помощи УФ-спектрофотометра получали спектры поглощения в диапазоне 290 ÷ 400 нм. Определяли виды растворов, чьи величины оптических плотностей выходят за пределы шкалы спектрофотометра. Для таких экстрактов готовили разведения с концентрациями (в мкг/мл) 25, 50, 75, 100, 125, 150 и 175. Для каждого разведения получали спектры поглощения в указанном диапазоне, после чего для каждой концентрации разведений определяли величину оптической плотности при $\lambda = 290, 295, 300 \dots 400$ нм. Строили графики зависимости оптической плотности раствора при данной величине длины волны от его концентрации, доказывали линейность этой зависимости, определяли параметры зависимости. По полученным зависимостям рассчитывали значения оптических плотностей для концентрации растворов 200 мкг/мл, на основании которых вычисляли величины фотозащитных параметров анализируемых видов экстрактов – SPF, $\lambda_{\text{крит}}$ и УФ-А/УФ-Б [2], [4], [7]. Оцененные параметры позволяли судить о фотозащитных свойствах экстрактов из лишайников.

Далее готовили растворы экстрактов в концентрациях, соответствующих определенным нами полулетальным значениям для культуры кератиноцитов (HACaT) [8]. Получали для них спектры поглощения в диапазоне 290 ÷ 400 нм, снова рассчитывали величины SPF, $\lambda_{\text{крит}}$ и УФ-А/УФ-Б. На основании полученных данных делали выводы о пригодности экстрактов из лишайников для использования в качестве фотозащитных средств, не токсичных для клеток кожи человека.

Повторность всех операций – пятикратная, средство измерения – спектрофотометр Solar PV 2201, измерительные кюветы – кварцевые, длина оптического пути 10 мм. Анализ результатов исследования осуществляли с помощью программного продукта Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение. В процессе отгонки растворителя и последующего высушивания окрашенных, но абсолютно прозрачных растворов экстрактов из лишайников происходят процессы образования веществ, не растворимых в 96 % этаноле. Данное событие происходит даже в этанольных экстрактах, каковые после удаления экстракта и высушивания затем полностью в этаноле не растворяются – рисунок 1. От 11,7 % до 27,7 % массы этанольных экстрактов из лишайников составляла нерастворимая фракция. Для ацетоновых экстрактов вклад нерастворимой фракции составлял до $38,5 \pm 0,84$ %; для бензольных – до $56,9 \pm 0,52$ %; для метанольных – до $20,3 \pm 0,35$ %; для хлороформных – до $47,9 \pm 0,38$ %; для – до $62,9 \pm 0,84$ %. Наибольшее количество экстрактивных веществ переходит в раствор при растворении в этаноле спиртовых экстрактов из лишайников. Экстракты из *Hypogymnia physodes* и *Ramalina pollinaria* растворяются лучше других. Это свойство экстрактов необходимо учитывать при их получении для дальнейшего использования.

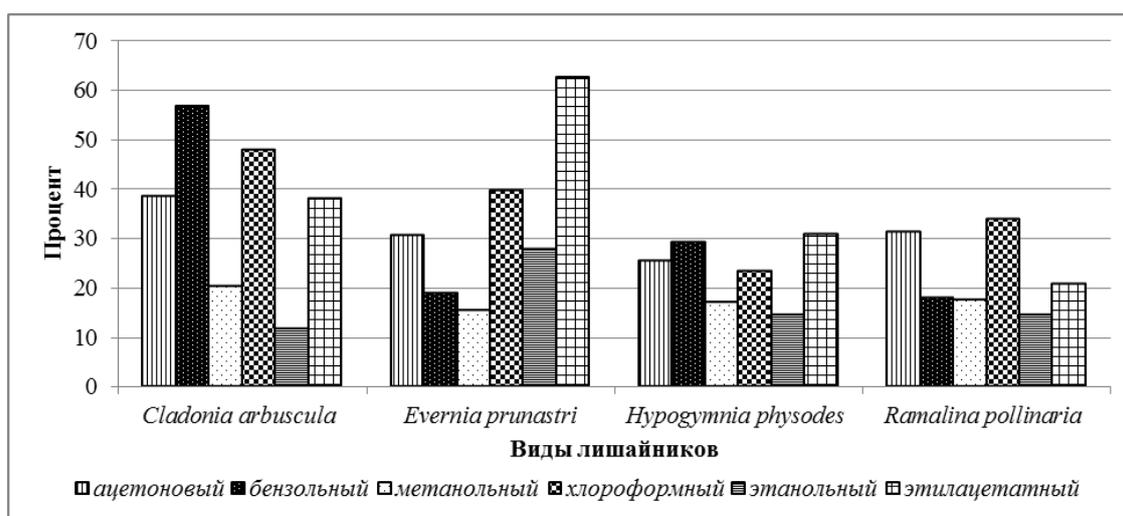


Рисунок 1 – Процентный вклад нерастворимой фракции в состав экстрактов из лишайников

В качестве примера выхода величин оптических плотностей за пределы шкалы спектрофотометра приводим спектрограммы растворов экстрактов из *R. pollinaria* – рисунок 2.

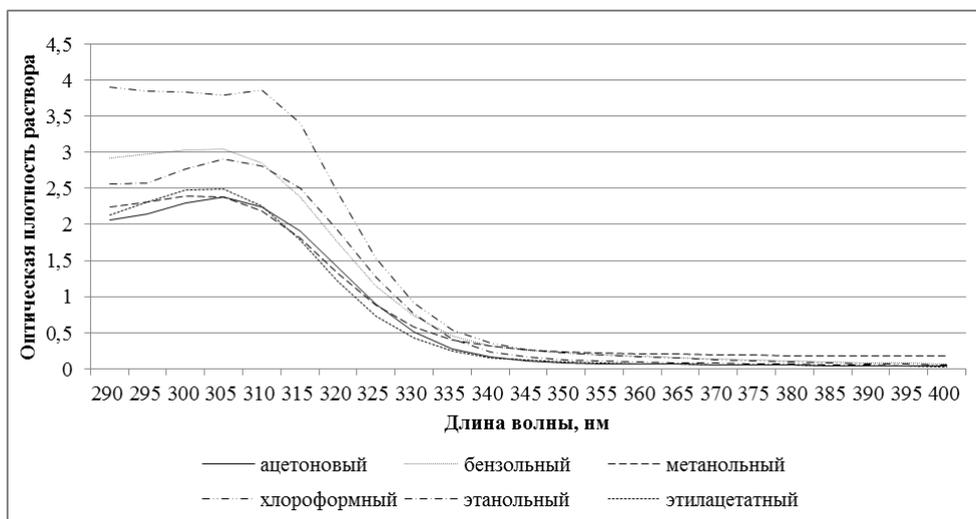


Рисунок 2 – Спектры поглощения растворов экстрактов из *R. pollinaria* (200 мкг/мл)

Очевидно, что практически все линии спектра в области УФ-Б (290 ÷ 320 нм) выходят за пределы шкалы спектрофотометра или приближаются к таковым.

На рисунке 3 приведены спектры растворов разведения хлороформных экстрактов из *R. pollinaria*, а также графики зависимости оптической плотности растворов от их концентрации в диапазонах УФ-Б и УФ-А.

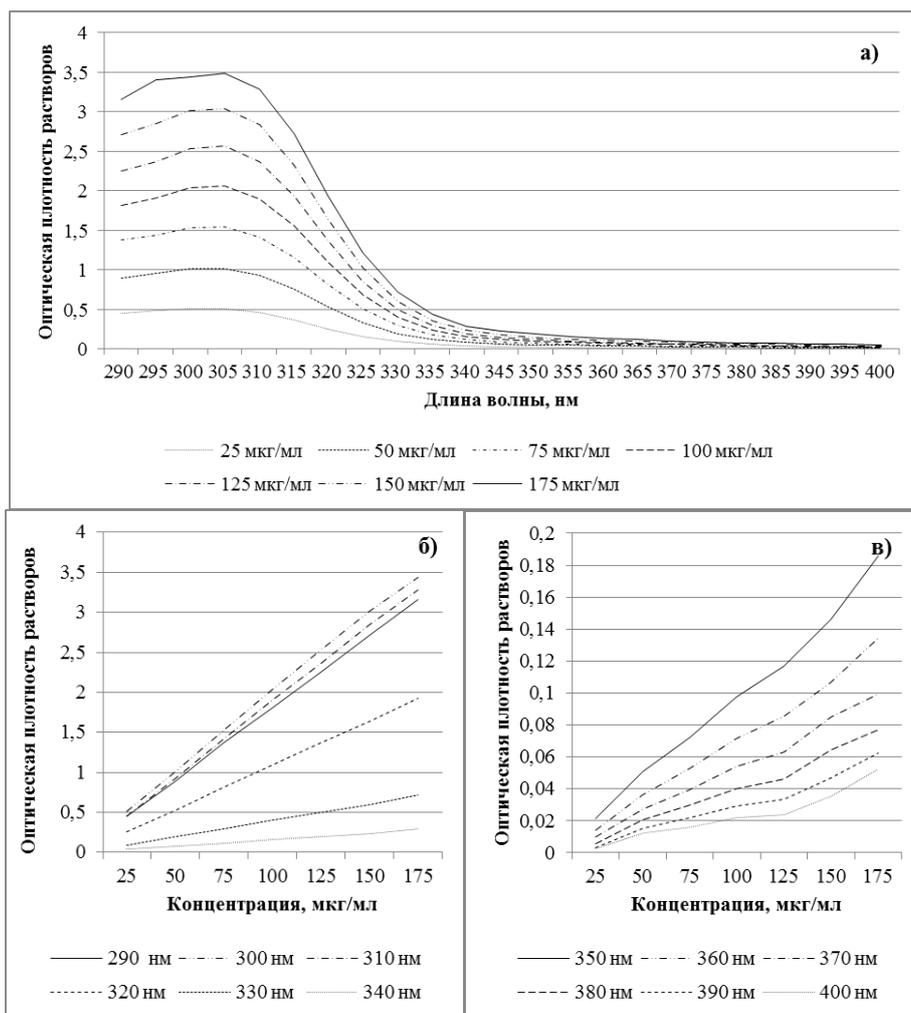


Рисунок 3 – Спектры поглощения растворов разведения экстрактов из *R. pollinaria* (а) и графики зависимости оптической плотности раствора от концентрации в области УФ-Б и коротковолнового УФ-А (б), длинноволнового УФ-А (в)

Линии спектра поглощения (рисунок 3а) позволяют говорить об отсутствии химического взаимодействия веществ экстракта с растворителем, а графики зависимости оптической плотности от концентрации раствора – вычислить параметры уравнения $y = ax \pm b$, которым они описываются, и на этой основе рассчитать значения оптических плотностей растворов для концентрации 200 мкг/мл. Следует отметить, что линейность зависимости оптической плотности растворов от концентрации статистически надежно доказана для всех изучаемых экстрактов из лишайников.

Величины параметров фотозащиты изучаемых экстрактов из лишайников были установлены как путем прямого измерения оптической плотности растворов, так и с применением аппроксимации установленных зависимостей для расчета крайних значений. Все проанализированные экстракты из лишайников обладают средними ($SPF = 8 \div 12$), высокими ($SPF = 15 \div 25$) и очень высокими ($SPF = 30 \div 50$) фотопоглощительными свойствами в диапазоне УФ-Б, но не являются фотозащитными, так как не соблюдается основное правило: $SPF \geq 15,0$ и $\lambda_{крит} \geq 373,0$ [2], [4]. Поглощение УФ-А экстрактами из лишайников стремится к нулю.

Полулетальные для культуры кератиноцитов (НАСаТ) концентрации экстрактов из изучаемых лишайников (IC_{50}) редко превышают 100 мкг/мл, а половина из них – ниже 50 мкг/мл [8]. Очевидно, что такие разбавленные растворы существенно слабее поглощают ультрафиолет – таблица.

Таблица – Фотозащитные свойства экстрактов лишайников при полулетальных для культуры кератиноцитов человека (НАСаТ) концентрациях

Виды экстрактов	Виды лишайников			
	<i>C. arbuscula</i>	<i>E. prunastri</i>	<i>H. physodes</i>	<i>R. pollinaria</i>
SPF, абс. ед.				
Ацетоновый	0,8 ± 0,08	3,3 ± 0,29	2,2 ± 0,19	11,4 ± 0,82
Бензольный	2,3 ± 0,12	10,2 ± 0,84	3,2 ± 0,41	7,5 ± 0,77
Метанольный	5,0 ± 0,27	10,4 ± 0,95	4,8 ± 0,63	12,2 ± 1,01
Хлороформный	1,0 ± 0,03	11,4 ± 0,99	2,9 ± 0,18	9,9 ± 0,84
Этанольный	1,1 ± 0,06	14,7 ± 1,08	1,6 ± 0,11	8,5 ± 0,69
Этилацетатный	2,1 ± 0,15	19,5 ± 1,49	3,9 ± 0,34	14,2 ± 1,14
$\lambda_{крит}$, нм				
Ацетоновый	350 ± 2,18	342 ± 2,65	348 ± 2,28	329 ± 2,14
Бензольный	357 ± 2,93	344 ± 2,11	342 ± 2,49	335 ± 2,33
Метанольный	358 ± 2,45	345 ± 2,27	343 ± 2,73	349 ± 2,08
Хлороформный	362 ± 2,98	337 ± 2,67	345 ± 2,16	328 ± 2,26
Этанольный	356 ± 2,83	334 ± 2,39	346 ± 2,38	329 ± 2,37
Этилацетатный	361 ± 2,99	332 ± 2,87	351 ± 2,84	327 ± 2,15
УФ-А/УФ-Б, абс. ед.				
Ацетоновый	0,51 ± 0,041	0,33 ± 0,036	0,57 ± 0,031	0,25 ± 0,019
Бензольный	0,54 ± 0,035	0,43 ± 0,039	0,54 ± 0,038	0,31 ± 0,024
Метанольный	0,65 ± 0,049	0,42 ± 0,038	0,64 ± 0,039	0,38 ± 0,025
Хлороформный	0,62 ± 0,044	0,33 ± 0,031	0,65 ± 0,042	0,22 ± 0,017
Этанольный	0,60 ± 0,047	0,34 ± 0,035	0,66 ± 0,041	0,27 ± 0,019
Этилацетатный	0,68 ± 0,049	0,31 ± 0,041	0,67 ± 0,043	0,20 ± 0,014

При разведении растворов экстрактов из лишайников до концентраций, соответствующих полулетальным значениям для культуры кератиноцитов человека, большинство из них теряют фотозащитные свойства или переходят в разряд средств с низким уровнем фотозащиты ($SPF = 2 \div 6$) [2], [4]. На нижней границе высокого уровня фотозащиты остаются только этанольный и этилацетатный экстракты из *E. prunastri* и этилацетатный из *R. pollinaria*. При этом следует учитывать, что при данных концентрациях растворов экстрактов из лишайников в среде культивирования погибает половина кератиноцитов кожи человека.

Если в качестве критерия пригодности экстрактов из лишайников для разработки фотозащитных субстанций использовать параметр IC_{10} (концентрация, при которой повреждается 10 % клеток культуры НАСаТ) [8], то оказывается, что этилацетатный экстракт из *E. prunastri* сохра-

няется на нижней границе высокого уровня фотозащиты ($SPF = 13,8 \pm 1,85$). Данный факт связан не с особыми фотозащитными свойствами этилацетатного экстракта из *E. prunastri*, а с его величинами IC_{10} и IC_{50} – 41,1 мкг/мл и 69,0 мкг/мл, соответственно. Для других видов экстрактов величины IC_{10} и IC_{50} могут отличаться в несколько раз, обладая при этом не самыми высокими значениями SPF при концентрации раствора 200 мкг/мл (речь, разумеется, идет об экстрактах, для которых показано отсутствие цитотоксичности в отношении НАСаТ).

В категории экстрактов из лишайников, обладающих средним уровнем фотозащиты при концентрациях, равных IC_{10} , оказались этанольный из *E. prunastri*, а также метанольный и этилацетатный из *R. pollinaria*. Величины SPF упомянутых экстрактов составили $7,6 \pm 0,59$; $9,1 \pm 0,84$ и $9,3 \pm 0,75$, соответственно. Следует отметить, что все растворы экстрактов из лишайников, разведенные до концентраций IC_{10} и IC_{50} , не являются собственно фотозащитными, так как величины критической длины волны не превышали 350 нм. Из этого следует, что экстракты из лишайников в нетоксичных для кератиноцитов человека концентрациях могут использоваться лишь для усиления защиты в области УФ-Б.

Заключение. Предложена авторская модификация методики предварительной оценки фотозащитных свойств экстрактов из лишайников. Использовали ацетоновые, бензольные, метанольные, хлороформные, этанольные и этилацетатные экстракты из *Cladonia arbuscula*, *Evernia prunastri*, *Hypogymnia physodes* и *Ramalina pollinaria*, полученные путем экстракции по Сокслету. Показано, что от 11,7 % до 62,9 % массы сухих экстрактов не растворяется в 96 % этаноле. Использование растворов экстрактов с концентрацией 200 мкг/мл при спектрофотометрическом определении основных показателей фотозащиты требует дополнительных операций для статистически надежного подтверждения линейности зависимости оптической плотности от концентрации и последующей экстраполяции. Окончательное решение о дальнейшем использовании экстрактов из лишайников целесообразно принимать после определения фотозащитных параметров их растворов в нетоксичных для клеток кожи человека концентрациях.

Литература

1. Храменкова, О. М. Антиоксидантные и цитотоксические свойства экстрактов из лишайников / О. М. Храменкова ; М-во образования РБ, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2022. – 224 с.
2. Rojas, J. L. Metabolites with antioxidant and photo-protective properties from *Usnea roccellina* Motyka, a lichen from Colombian Andes / J. L. Rojas, M. Díaz-Santos, N. A. Valencia-Islas // UK J Pharm Biosci. – 2015. – Vol. 3. – P.18–26.
3. Donglikar, M. M. Sunscreens : A review / M. M. Donglikar, S. L. Deore // Pharmacognosy Journal. – 2016. – Vol. 6 (3). – P. 171–179.
4. 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.
5. *Cladonia uncialis* as a valuable raw material of biosynthetic compounds against clinical strains of bacteria and fungi / E. Studzińska-Sroka [et al.] // Acta Biochimica Polonica. – 2019. – Vol. 66 (4). – P. 597–603.
6. Secondary metabolites and cytotoxic potential of *Lobariella pallida* and *Stereocaulon strictum* var. *compressum*, two lichens from Colombian páramo region / L. S. Perico-Franco [et al.] // Pharmaceutical and Biosciences Journal. – 2015. – Vol. 3 (4). – P. 31–38.
7. Mansur, J. S. Correlação entre a determinação do fator de proteção solar em seres humanos e por espectrofotometria / J. S. Mansur, M. N. R. Breder, M. C. A. Mansur, R. D. Azulay // An. Bras. Dermatol. – 1986. – Vol. 61 (4). – P. 121–124.
8. Матвеенков, М. В. Цитотоксические и фотомодифицирующие свойства экстрактов из распространенных лишайников юго-востока Беларуси / М. В. Матвеенков, О. М. Храменкова, И. А. Чешик // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 1. – С. 65–75.

Первые находки церкарий *Brachylaima* sp. (Digenea: Brachylaimidae) у наземных моллюсков на территории Беларуси

Т.В. ШЕНДРИК

Впервые на территории Беларуси найдены церкарии рода *Brachylaima* sp. Спороцисты с церкариями обнаружены у инвазивного вида наземных моллюска – *Arianta arbustorum* Linnaeus, 1758.

Ключевые слова: церкария, спороциста, *Brachylaima* sp., *Arianta arbustorum*, Беларусь.

Cercariae of the genus *Brachylaima* sp. were found for the first time in Belarus. Sporocysts with cercariae were found in an invasive species of land mollusks – *Arianta arbustorum* Linnaeus, 1758.

Keywords: cercariae, sporocyst, *Brachylaima* sp., *Arianta arbustorum*, Belarus.

Введение. Представители семейства трематод Brachylaimidae Joyeux and Foley, 1930 широко распространены в различных климатических зонах мира, исключая только Антарктиду [1], [2]. Дефинитивными хозяевами данных паразитов в основном являются птицы и млекопитающие. Известны случаи заражения ими человека [3]. Наличие морфологически схожих видов и сложная видовая идентификация марит является одной из причин недостаточной изученности данного таксона во всем мире [1]. На данный момент времени семейство Brachylaimidae включает в себя более десятка родов, в том числе типовой род *Brachylaima* Dujardin, 1843, к которому относится более 60 видов трематод [2].

Жизненные циклы Brachylaimidae характеризуются чередованием поколений и сменой хозяев. Для них характерен триксенный тип развития [4], [5]. Однако из всего огромного разнообразия трематод только представители Brachylaimidae (а также Dicrocoeliidae Odhner, 1911) освоили наземную среду обитания. Они способны завершать свой жизненный цикл вне водной среды, иногда даже в ксерофильных, засушливых местообитаниях [4]. Первыми и вторыми промежуточными хозяевами Brachylaimidae служат наземные моллюски одного или разных семейств. В литературе имеются данные, что один и тот же моллюск может являться и первым и вторым промежуточным хозяином [4], [6]. Яйца этих дигеней попадают вместе с пищей в кишечник наземных гастропод, где из яйца выходит мирацидий, который проникает в гепатопанкреатическую железу и развивается в материнскую спороцисту. Развивающиеся в спороцисте церкарии в дождливую погоду покидают моллюска через дыхательное отверстие. Установлено, что личинки гермафродитного поколения могут использовать след из слизи, оставляемый их хозяином, для поиска второго промежуточного хозяина. При благоприятных условиях личинки попадают во второго промежуточного хозяина, которым также служат наземные гастроподы (или же внедряются в ту же самую особь), локализуясь в почке. Здесь метацеркарии претерпевают три стадии развития [4].

Материалы и методы. Материалом для данной статьи послужили сборы наземных моллюсков, проведенные в окрестностях города Минска в смешанном еловом лесу вблизи жилых построек (район деревни Боровляны) в период с 2018 по 2022 гг. Всего собрано и вскрыто 637 экземпляров Gastropoda: Pulmonata 5 видов из 3 семейств – *Arianta arbustorum* Linnaeus, 1758 (Helicidae, Rafinesque, 1815) (403 экз.); *Deroceras reticulatus* Muller, 1774 (Agrolimacidae Wagner, 1935) (123 экз.); *Limax maximus* Linnaeus, 1758, (Limacidae Rafinesque, 1815) (46 экз.); *Arion subfuscus* Draparnaud, 1801 (34 экз.) и *Arion circumscriptus* John, 1828 (31 экз.) (Arionidae Gray, 1840). Определение гастропод проведено с помощью определителя [7]. Моллюски обследованы методом вскрытия. Фотографии и измерение церкарий проведено на временных препаратах с помощью микроскопа Carl Zeiss AxioLab. A1. Каждый тип церкарий измерен в количестве 20 экз. Морфологические промеры церкарий (даны в μm), а также коэффициенты длин проведены по общепринятым методикам [6].

Результаты и их обсуждение. Взаимоотношения личиночных форм Brachylaimidae с их промежуточными хозяевами изучены недостаточно, а циклы развития известны далеко не для всех видов. Некоторые авторы отмечают, что видам Brachylaimidae свойственна широкая специфичность к промежуточным и дополнительным хозяевам – наземным моллюскам. При этом трофические связи – главное условие развития партеногенетического поколения Brachylaimidae. В экспериментальных условиях установлено, что моллюски-полифаги имеют больше шансов быть инвазированными, чем узкоспециализированные к пище виды. Так, например, в условиях Казахстана, виды *Limax* sp. и *Macrochlamys* sp. при наличии инвазионного начала заражаются чаще и интенсивнее, чем *Bradybaena* sp. и *Euconulus* sp., питающиеся зеленой частью растений и грибной флорой [6]. Крупные моллюски способны заражаться чаще и больше накапливать личиночных стадий в своих органах, чем мелкие [6]. На территории Украины большинство из обнаруженных видов *Brachylaima* развиваются у нескольких видов промежуточных и дополнительных хозяев [5], [8]. Так, например, *Brachylaima fulvum* Dujardin 1843 обнаружена у родов *Deroceras*, *Vittrina*, *Zonitoides*, а также *Discus rudерatus*; трематода *B. fuscatum* (Rud., 1819) – у *Brephulopsis cylindrica*, *Helicopsis retowskii*, *H. filimargo* (первые промежуточные хозяева) и *Succinea putris*, *B. cylindrica*, *B. bidens*, *Helicopsis retowskii*, *H. filimargo*, *Xeropicta krynickii*, *X. derbentina*, *Monacha fruticola*, *Eobania vermiculata* (вторые промежуточные хозяева) [5], [8]. В то же время, для некоторых *Brachylaima* установлена строгая специфичность к определенному виду наземных гастропод, единственным хозяином является именно первый промежуточный хозяин. Второй, дополнительный хозяин, практически во всех исследованиях представлен несколькими видами. Так, например, при анализе жизненного цикла *Brachylaima ruminae* n. sp. было установлено, что единственным природным и экспериментальным первым промежуточным хозяином для него является моллюск *Pseudotachea splendida*, в то время как вторым промежуточным хозяином могут выступать несколько видов наземных гастропод (*Pseudotachea splendida*, *Otala punctata*, *Theba pisana*, *Helix aspersa*) [9]. Изучение жизненного цикла *Brachylaima mascomai* n. sp. выявило схожую тенденцию – единственным природным и экспериментальным первым промежуточным хозяином служит гелицидный брюхоногий моллюск *Pseudotachea splendid*, вторым промежуточным хозяином могут служить гастроподы *P. splendida*, *Otala punctata*, *Theba pisana*, *Helix aspersa* [10], *Brachylaima llobregatensis* – единственным естественным и экспериментальным первым промежуточным хозяином послужил моллюск *Helix (Cornu) aspersa* [11]. Ряд современных работ с привлечением молекулярно-генетических исследований проведен в Японии. Полученные данные также выявили наличие строгой специфичности некоторых новых видов *Brachylaima* к первым промежуточным хозяевам, в то время как вторые дополнительные хозяева представлены несколькими видами. Так, *Brachylaima ezohelicis* была обнаружена только у моллюска *Ezohelix gainesi* [12], *Brachylaima asakawai* – только у *Discus pauper* [13], *Brachylaima succini* – только у *Succinea lauta* [14]. В то же самое время, в Японии найден новый вид *Brachylaima phaedusae* n. sp., спороцисты которого развиваются у ряда моллюсков – *Megalophaedusa sublunellata* (Clausiliidae), *Tauphaedusa subaculus* (Clausiliidae) и *Aegista trochula* (Camaenidae), а метцеркарии – в 14 видах *Clausiliidae* и 2 видах других семейств [15]. Авторы предположили, что разнообразие первых промежуточных хозяев данной трематоды обусловлено широким географическим распространением его мариты. Однако дефинитивный хозяин *Brachylaima phaedusae* n. sp. на данный момент еще не обнаружен.

На территории Беларуси семейство Brachylaimidae представлено двумя родами. Все паразиты зарегистрированы только на стадии мариты. Это род *Brachylaima* Dujardin, 1843, представленный двумя видами – *Brachylaima fulvum* Dujardin, 1843 (обнаружен у *Sorex minutus* и *Sorex araneus*), а также *Neomys fodiens* в Витебской, Брестской, Минской областях) и *Brachylaima mesostoma* (Rudolphhi, 1803) – обнаружена у *Turdus pilaris* в Гомельской области в 30-х гг. прошлого столетия [16]. Род *Ityogonimus* Luhe, 1899 представлен одним видом – *Ityogonimus talpae* (Goeze, 1782), дефинитивным хозяином которого является *Talpa europaea*. Вид обнаружен в Витебской и Брестской областях [16]. На территории Беларуси личиночные формы Brachylaimidae, а также виды наземных моллюсков, участвующих в жизненных циклах данных трематод, не известны. Нами впервые предпринята попытка обнаружить паразитов у наземных моллюсков на территории республики.

На данный момент времени в Беларуси известно 78 видов наземных моллюсков, принадлежащих к 3 отрядам и 24 семействам [17]. Из всех обследованных нами видов гастропод спороцисты были обнаружены у *A. arbustorum* (1,002 %), а также у *A. circumscriptus* (3,2 %). Обнаруженные церкарии по морфологическим признакам относятся к роду *Brachylaima*. К сожалению, церкарии из слизи *A. circumscriptus* не удалось сфотографировать и измерить. Древесная улитка (*A. arbustorum*) – достаточно крупный моллюск из семейства *Helicidae*, высота шаровидной раковины взрослых особей – 10–23 мм, а ширина – 14–28 мм. Ареал вида исходно охватывал среднюю и северо-западную Европу. В середине 20 в. *A. arbustorum* обитала в Калининградской области и в Западной Украине, отдельные находки были в Киевской области, в окрестностях С.-Петербурга, в Латвии, на островах и в прибрежных районах Эстонии [7]. В Каталоге моллюсков России и сопредельных стран 2005 г. указаны также Беларусь и окрестности Москвы [18]. *A. arbustorum* – эвритопный вид, природными биотопами обитания которого являются влажные широколиственные и мелколиственные леса. *A. arbustorum* успешно вселяется в антропогенные ландшафты, где образует популяции с высокой плотностью особей (до 200–300 экз./м²) и характеризуется питанием широким спектром кормовых растений. В городах *A. arbustorum* заселяет парки, сады, заброшенные участки, где обитает в травяно-кустарниковом ярусе [19]. На территории Беларуси *A. arbustorum* входит в группу моллюсков-вселенцев, активно расселяющихся по новым территориям и представляющих наибольшую опасность для сельского хозяйства и естественных экосистем [20]. В настоящее время он встречается по всей территории Беларуси, в том числе во многих населённых пунктах, достигая высокой численности [20]. По данным специалистов моллюск *A. arbustorum* – агрессивный вселенец, который представляет угрозу аборигенным видам гастропод фауны Беларуси, таким как *Cepaea hortensis* (O.F. Müller, 1774), *Cepaea nemoralis* (Linnaeus, 1756) и *Bradybaena fruticum* (O.F. Müller, 1774) [20].

В обследованном биотопе, находящемся рядом с жилой зоной, древесная улитка *A. arbustorum* наиболее часто встречалась в сборах моллюсков. В весенне-осенний период времени нами обследовано 403 экземпляра данных гастропод. У вскрытых экземпляров *A. arbustorum* обнаружены бесцветные спороцисты (рисунок 1), содержащие бесхвостых церкарий, принадлежащие к роду *Brachylaima* sp. По литературным данным, морфология церкариев схожа для всех представителей *Brachylaimoidea*. У них удлинённо-грушевидное тело. Покровы вооружены шипиками. Церкарии имеют короткий простой хвост, ротовая присоска немного крупнее брюшной присоски, фаринкс, кишечные ветви заканчиваются слепом, хорошо выражен недифференцированный половой зачаток. Встречаемость спороцист с церкариями *Brachylaima* sp. в исследуемой выборке моллюсков *A. arbustorum* низкая и составляет около 1,002 % от вскрытых особей. У данного моллюска были обнаружены церкарии характерного для брахилаймид строения. Обнаруженные церкарии имеют схожее строение, однако их размеры статистически отличаются друг от друга ($P > 0,05$). Помимо размеров они также различаются протяженностью кишечных ветвей, слепом заканчивающихся в области брюшной присоски, которые, к сожалению, плохо видны на фотографиях. Мы их определили как *Brachylaima* sp. 1 и *Brachylaima* sp. 2.

Спороциста. У 1,002 % моллюсков *A. arbustorum* обнаружены бесцветные разветвленные спороцисты. Встречаемость спороцист (рисунок 1А) с церкариями *Brachylaima* sp. 1 у *A. arbustorum* – несколько выше (0,75 %). В то же время встречаемость спороцист (рисунок 1В) с церкариями *Brachylaima* sp. 2 составляет всего 0,25 %. Спороциста представляет собой запутанную сеть разветвленных трубочек, ветви которой наполнены развивающимися и созревшими церкариями (рисунок 1А, 1В). Церкарии выходят из спороцисты, разрывая ее стенки и появляются в слизистом следе улитки.

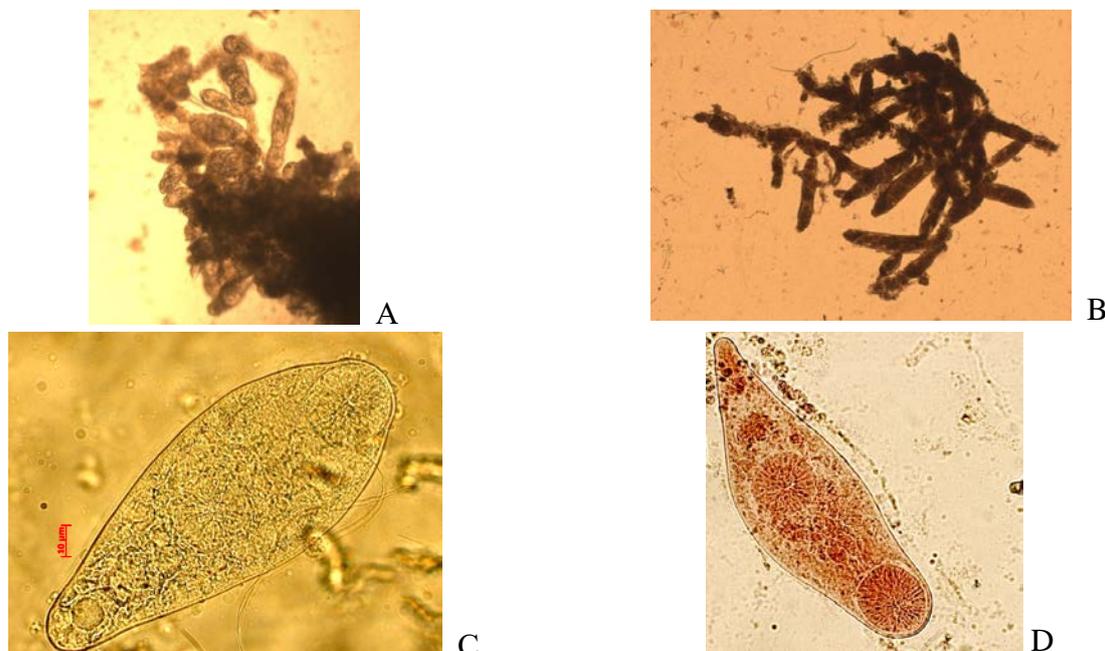


Рисунок 1 – Спороциста с церкариями *Brachylaima* sp. 1 (A), спороциста с церкариями *Brachylaima* sp. 2 (B), церкария *Brachylaima* sp. 1 (C), церкария *Brachylaima* sp. 2 (D), обнаруженные у *A. arbustorum*

Церкария *Brachylaima* sp. 1 (рисунок 1С, таблица 1). Тело удлинненно-грушевидное, длиной 136,9 μm , наибольшая ширина – 51,9 μm . Субтермальная ротовая присоска (28,4 \times 27,3 μm). Позади ротовой присоски находится префаринкс (14,2 μm). Мышечный фаринкс (12,8 \times 14,0) переходит в короткий пищевод, различимый у живых особей, который делится на две толстые кишечные ветви, слепо заканчивающиеся в районе брюшной присоски. У церкарии *Brachylaima* sp. 1 кишечные ветви доходят до середины брюшной присоски и слепо заканчиваются на уровне ее середины. На расстоянии (71,2 μm) от переднего конца тела расположена брюшная присоска (25,5 \times 22,3 μm). Экскреторная система характерного для брахилаймид строения. Экскреторный пузырь овальный, он открывается двумя каналами, идущими кпереди, которые между фаринксом и брюшной присоской образуют петлю и поворачиваются назад. Между экскреторным пузырем и брюшной присоской расположен недифференцированный половой зачаток.

Таблица 1 – Изменчивость размеров тела и органов церкарий *Brachylaima* sp. 1, n = 20 экз.

Признак	Xmin–Xmax	X	σ
Длина тела, А	121,4–145,3	136,98	11,03
Наибольшая ширина тела, В	48,0–54,79	51,98	2,46
Расстояние между центрами ротовой и брюшной присосок	57,46–66,8	62,14	6,1
Ротовая присоска. Длина, А1	27,25–29,43	28,37	1,02
Ротовая присоска. Ширина, В1	26,17–27,89	27,29	0,79
Фаринкс. Длина, А2	12,85–14,9	14,36	0,92
Фаринкс. Ширина, В2	12,2–14,0	12,83	0,79
Брюшная присоска. Длина А3	24,8–25,97	25,71	0,94
Брюшная присоска. Ширина, В3	18,96–21,65	20,97	1,33
Хвостовой придаток длина	18,23–18,64	18,4	0,21
А : В	2,53–2,77	2,66	0,13
А1: В1	1,01–1,11	1,06	0,04
А2 : В2	1,1–1,4	1,28	0,11
А3 : В3	0,89–0,96	0,93	0,03

Церкарии *Brachylaima* sp. 2 (рисунок 1D). Данные промеров (μm) приведены в таблице 2. Бесцветные разветвленные спороцисты были обнаружены у 1,0 % вскрытых экземпляров *A. arbustorum*. Тело церкарий *Brachylaima* sp. 2. удлинено-грушевидное, длиной 269,6 μm и максимальной шириной 86,8 μm . Субтерминальная ротовая присоска 61,6 \times 53,8 μm . Префаринкс 20,0 μm ., мышечный фаринкс – 23,9 \times 23,5 μm . Он переходит в короткий пищевод длиной (9,2 μm), который делится на две толстые кишечные ветви, слепо (рисунок 1D) заканчивающиеся в области брюшной присоски. Кишечные ветви *Brachylaima* sp. 2., в отличие от *Brachylaima* sp. 1, не доходят до середины брюшной присоски. Они слепо заканчиваются немного заходя за ее передний край. На расстоянии (163,2 μm) от переднего конца расположена брюшная присоска (51,1 \times 53,8 μm). Экскреторная система характерного для брахилаймид строения. Экскреторный пузырь овальный, впереди открывающийся двумя каналами, идущими кпереди. В задней части экскреторный пузырь раздваивается на два канала. Между экскреторным пузырем и брюшной присоской расположен хорошо различимый недифференцированный половой зачаток (рисунок 1D).

Таблица 2 – Изменчивость размеров тела и органов церкарий *Brachylaima* sp. 2, n = 20 экз.

Признак	Xmin–Xmax	X	σ
Длина тела, А	242,14–309,0	269,59	21,95
Наибольшая ширина тела, В	75,1–95,2	86,85	5,67
Расстояние между центрами ротовой и брюшной присосок	101,0–144,2	128,44	12,4
Ротовая присоска. Длина, А1	54,96–68,4	61,62	4,7
Ротовая присоска. Ширина, В1	45,44–63,09	53,24	5,9
Фаринкс. Длина А2	19,9–32,5	23,93	2,89
Фаринкс. Ширина, В2	17,9–30,6	23,48	3,74
Брюшная присоска. Длина, А3	44,9–57,8	51,12	3,56
Брюшная присоска. Ширина, В3	43,45–63,7	53,81	5,03
Хвостовой придаток, длина	29,0–30,0	29,83	0,56
А : В	3,01–3,3	3,1	0,12
А1 : В1	1,08–1,28	1,16	0,07
А2 : В2	0,9–1,15	0,96	0,09
А3 : В3	0,91–1,17	1,02	0,11

Таким образом, предварительные исследования показали, что на территории Беларуси у наземных гастропод паразитируют различные виды *Brachylaima*. На сегодняшний день в Беларуси отсутствуют сведения о циклах развития и составе их промежуточных хозяев, а также данные о видовом богатстве марит *Brachylaimidae*. Для выяснения этих вопросов необходимы дополнительные гельминтологические исследования с привлечением современных методик идентификации видов.

Литература

1. Heneberg, P. Molecular and comparative morphological analysis of central European parasitic flatworms of the superfamily Brachylaimoidea Allison, 1943 (Trematoda: Plagiorchiida) / P. Heneberg, J. Sitko, J. Bizon // Parasitology. – 2016. – Vol. 143 (4). – P. 455–474.
2. Andrus, P. S. Nematodes and trematodes associated with terrestrial gastropods in Nottingham, England / P. S. Andrus, R. Rae, C. M. Wade // Journal of Helminthology. – 2022. – Vol. 96. – P. 1–13.
3. Butcher, A. R. Description of the life-cycle stages of derived from eggs recovered from human faeces in Australia / A. R. Butcher, D. I. Grove // Systematic Parasitology. – 2001. – № 49. – P. 211–221.

4. Гвоздев, Е. В. Биология, систематика, эволюция и филогения трематод надсемейства *Brachylaimoidea* Allison, 1943 / Е. В. Гвоздев, Т. Н. Соболева // Жизненные циклы, экология и морфология гельминтов животных Казахстана. – Алма-Ата : «Наука» Каз ССР, 1978. – С. 17–31.
5. Гураль-Сверлова, Н. В. Наземные моллюски (Gastropoda, Pulmonata) Донецкой возвышенности и прилегающих территорий / Н. В. Гураль-Сверлова, В. В. Мартынов, А. В. Мартынов // Вестник зоологии. – 2012. – № 46 (4) – С. 319–326.
6. Соболева, Т. Н. Анализ взаимоотношений надсемейства *Brachylaimoidea* Allison, 1943 с промежуточными хозяевами / Т. Н. Соболева // Жизненные циклы, экология и морфология гельминтов животных Казахстана. – Алма-Ата : «Наука» Каз ССР, 1978. – С. 62–68.
7. Король, Э. Н. Наземные моллюски – промежуточные хозяева трематод надсемейства *Brachylaimoidea* (Allison, 1943) / Э. Н. Король // Вісник Житомирського педагогічного університету. – 2002. – Вип. 10. – С. 86–89.
8. Mas-Coma, S. The life cycle of *Brachylaima ruminæ* n. sp. (Trematoda: Brachylaimidae), a parasite of rodents / S. Mas-Coma, I. Montoliu // Z. Parasitenkd. – 1986. – № 72. – P. 739–753.
9. Gracenea, M. Life cycle of *Brachylaima mascomai* n. sp. (Trematoda: Brachylaimidae), a parasite of rats in the Llobregat delta (Spain) / M. Gracenea, O. González-Moreno // J. Parasitol. – 2002. – № 88. – P. 124–133.
10. González-Moreno, O. Life cycle and description of a new of *Brachylaimid* (Trematoda: Digenea) in Spain / O. González-Moreno, M. Gracenea // Journal of Parasitology. – 2006. – № 92. – P. 1305–1312.
11. Nakao, M. *Brachylaima ezohelicis* sp. nov. (Trematoda: Brachylaimidae) found from the land snail *Ezohelix gainesi*, with a note of an unidentified *Brachylaima* species in Hokkaido, Japan / M. Nakao, T. Waki, M. Sasaki [et al.] // Parasitology International. – 2017. – V. 66. – P. 240–249.
12. Nakao M. *Brachylaima asakawai* sp. nov. (Trematoda: Brachylaimidae), a rodent intestinal fluke in Hokkaido, Japan, with a finding of the first and second intermediate hosts / M. Nakao, M. Sasaki, T. Waki [et al.] // Parasitology International. – 2018. – V. 67. – P. 565–574.
13. Nakao, M. *Brachylaima succini* sp. nov. (Trematoda: Brachylaimidae) from *Succinea lauta*, an amber snail in Hokkaido, Japan / M. Nakao, M. Sasaki, T. Waki // Parasitology International. – 2020. – Vol. 77. – P. 1–9.
14. Waki T. *Brachylaima phaedusae* n. sp. (Trematoda: Brachylaimidae) from door snails in Japan / T. Waki, M. Nakao, M. Sasaki [et al.] // Parasitology International. – 2021. – Vol. 86. – P. 1–12.
15. Бычкова, Е. И. Гельминты позвоночных животных и человека на территории Беларуси : каталог / Е. И. Бычкова, Л. Н. Акимова, С. М. Дегтярик, М. М. Якович. – Минск : Бел. навука, 2017. – 316 с.
16. Лихарев, И. М. Наземные моллюски фауны СССР : Определители по фауне СССР / И. М. Лихарев, Е. С. Раммельмейер. – Москва–Ленинград, 1952. – Вып. 43. – 511 с.
17. Земоглядчук, К. В. Видовой состав наземных моллюсков фауны Беларуси / К. В. Земоглядчук // Молодежь в науке : прил. к журн. «Весці НАН Беларусі». – 2009. – Вып. 5, ч. 4. – С. 105–108.
18. Шиков, Е. В. *Arianta arbustorum* (Linnaeus, 1758) (Mollusca, Gastropoda) – агрессивный вселенец на Русскую равнину / Е. В. Шиков // Биоразнообразие : проблемы изучения и сохранения : материалы Междунар. науч. конф., посвящённой 95-летию кафедры ботаники Твер. гос. ун-та, г. Тверь, 21–24 нояб. 2012 г. – Тверь, 2012. – С. 380–381.
19. Земоглядчук, К. В. Влияние температуры и относительной влажности воздуха на долю активных особей *Arianta arbustorum* (Gastropoda, Helicidae) / К. В. Земоглядчук // Вестник БарГУ. – 2016. – № 40. – С. 35–41.
20. Земоглядчук, К. В. Чужеродные виды наземных моллюсков (Mollusca: Gastropoda: Stylommatophora) в фауне Беларуси / К. В. Земоглядчук // Вестник БарГУ. – 2020. – Вып. 8. – С. 34–45.

Информатика

УДК 00.415.2.031.43

EDN: PXLTDM

Разработка дополнительного сервиса работы в Windows с использованием инструментария PowerShell и голосового помощника

А.В. ДОЛЖЕНОК, Н.Б. ОСИПЕНКО

В статье описывается разработка прототипа средств сохранения команд командной строки и абсолютного пути к определенному месту на персональном компьютере, а также средств управления голосовым помощником. Принципы их работы опробованы с помощью программного приложения «NichCom» на языке программирования Python с использованием его библиотек и модулей. Разработанный инструментарий позволяет упростить и оптимизировать манипуляции с рабочим пространством персонального компьютера, выполнять ряд голосовых команд пользователя и управлять игрой. Для реализации игровой части выбран язык программирования JavaScript и его библиотека React. Программное приложение работает как с подключением к Интернету, так и без него.

Ключевые слова: голосовой помощник, десктопное приложение, резервирование команд, игры, Python, JavaScript, Windows, Интернет.

The article describes the development of a prototype of tools for saving command line commands and an absolute path to a specific location on a personal computer, as well as tools for managing a voice assistant. The principles of their operation were tested using the «NichCom» software application in the Python programming language using its libraries and modules. The developed tools make it possible to simplify and optimize manipulations with the workspace of a personal computer, perform a number of user voice commands and control the game. To implement the game part, the JavaScript programming language and its React library were chosen. The software application works with or without an Internet connection.

Keywords: voice assistant, desktop application, command reservation, games, Python, JavaScript, Windows, Internet.

Введение. В настоящее время инструментарии, упрощающие работу за тем или иным гаджетом, а также развивающие мышление, набирают популярность. Поэтому инструментарий, описанный в настоящей работе, включает в себя аспекты, которые могут быть использованы для улучшения и облегчения работы с персональным компьютером (ПК).

Десктопные приложения устанавливаются непосредственно на устройство пользователя и выполняются там независимо от интернет-соединения. Но современные приложения обычно предлагают работать с подключением к Интернету, чтобы использовать различные устройства, включать в проект других пользователей или обновлять программу без ручной переустановки. Они способны помочь в осуществлении делегирования некоторых активностей пользователя с ПК, например, быстрое открытие виртуальной клавиатуры.

Разработанный инструментарий «NichCom» совмещает в себе как игровой для отдыха с детьми контент, так и контент, способный помочь пользователю ускорить и автоматизировать некоторые операции с ПК. Основной спектр его возможностей позволяет пользователю облегчить и ускорить работу за ПК за счет реализации быстрого доступа к реализованному функционалу. Например, запустить очистку временных файлов, что позволяет пользователю освободить место на ПК, нажав одну кнопку, вместо того, чтобы всякий раз идти по пути расположения данных файлов и очищать их вручную. Это позволяет поддерживать порядок в файловой системе за счет сохранения месторасположения файла и упрощения доступа к нему. Для повышения удобства использования этих возможностей пользователь сохраняет предоставляемый ему приложением функционал под своим именем. Опытным пользователям ПК данный инструментарий предлагает дополнительные возможности в виде сохранения команд командной строки Windows в PowerShell, благодаря чему пользователю нет не-

обходимости каждый раз прописывать набор команд в командной строке, достаточно запустить данный инструментарий, вставить необходимую команду и сохранить. После чего данная команда будет запускаться при нажатии всего одной кнопки. Для расширения возможностей разработанных функционалов реализована связь с голосовым помощником, которая позволяет при помощи голоса заносить и сохранять введенную пользователем информацию.

Настоящий инструментарий в большей степени работает без подключения к Интернету, за исключением нескольких функций голосового помощника.

Особенности реализации инструментария «NichCom». Для разработки основной части инструментария «NichCom» был выбран язык программирования Python. Для рендеринга инструментария была выбрана графическая библиотека PyQt6.

Выбор данного языка для разработки десктопного инструментария обусловлен возможностью демонстрации того, что язык программирования Python является почти уникальным языком, который можно использовать не только в создании сайтов, реализации искусственного интеллекта (ИИ), но и в создании десктопных приложений (далее приложений). Отметим, что для создания приложений с использованием PyQt6 библиотеки, необходимо иметь базовые навыки языка стилизации CSS.

Для реализации игры с детьми «Крестики-нолики» был выбран язык программирования JavaScript и его библиотека React, так как данная игра является браузерной, а React библиотека позволяет перемещаться по содержимому страниц без их постоянной загрузки, что делает просмотр контента беспрепятственным.

Проектирование работы инструментария «NichCom». Для проектирования работы программного приложения (ПП) «NichCom» использована нотация стандартизированного языка моделирования UML (Unified Modeling Language), совместимого с разными языками программирования и процессами разработки. На диаграмме вариантов использования (ВИ), приведенной на рисунке 1, показана общая схема его работы.

Эктер «Юзер» активирует выполнение ВИ «Вход в приложение». При первом запуске по умолчанию приложение является не настроенным и выполняется ВИ «Настройка ПП», содержащий функционал настраивания приложения «под себя». При необходимости в дальнейшем внести изменения первичной настройки в основном окне ПП есть соответствующая секция настроек. Если приложение настроено, то пользователь может использовать основной функционал ПП, который описан в Секции 2 «Открытие меню».

Секция 1 «Настройка ПП». Опция «Авторизация» устанавливает пароль либо на весь ПП, либо на конкретный функционал, например, «Сохранение заметок юзера», схематично описанный на рисунке 2. Поле для ввода пароля имеет ограничения в количестве введенных символов (в настоящее время не менее четырех). Опция «Тема» предоставляет пользователю выбор между светлой и темной темами в ПП. Опция «Язык» дает возможность выбора языка ПП – русский или английский. Опция «Версия» реализует несколько вариантов версий приложения. Для пользователя создается интерактивный список, который позволяет не только выбрать необходимую версию, но и просмотреть, чем текущая версия ПП отличается от выбранной. По умолчанию выбирается версия, в которой доступны все компоненты ПП. Более подробное описание версий приводится в разделе Секция 2 «Открытие меню».

ВИ «Кнопки-действия» позволяет редактировать или сохранять данные настроек. Если настройки ПП не были изменены, то пользователю доступна только кнопка «Редактировать», иначе – «Сохранить».

ВИ «ГП фоново», где ГП – голосовой помощник. Пользователь может включить данную функцию или нет. При включении данной функции ПП «NichCom» будет запускаться с включением ПК и будет активен фоновый голосовой помощник без запуска самого окна ПП.

ВИ «ПП фоново» реализует автоматический запуск всего ПП при включении ПК.

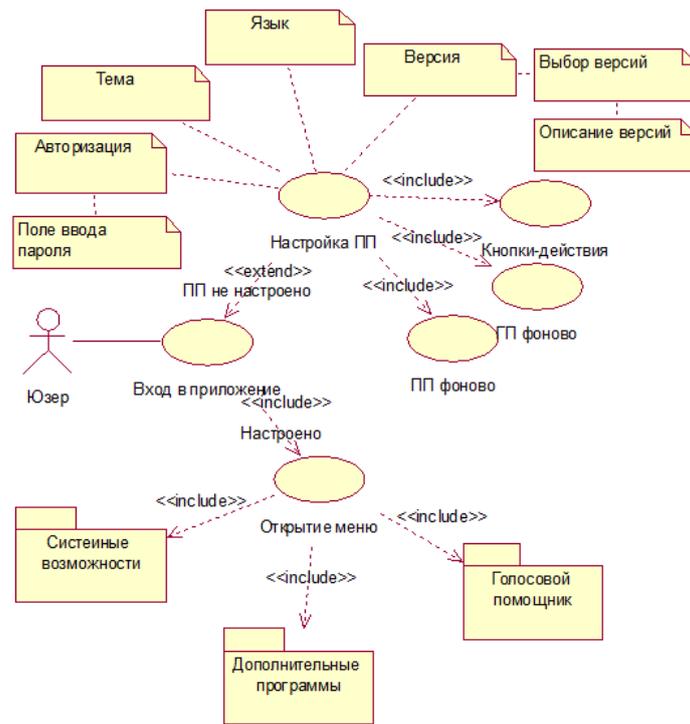


Рисунок 1 – Общая диаграмма Use Case программного приложения «NichCom»

Секция 2 «Открытие меню». Приложение разделено на три основных блока: 1) системные возможности; 2) дополнительные программы; 3) голосовой помощник. Описание работы данных блоков приводится в соответствующих темах статьи далее. Наличие всех трех блоков для ПП не является обязательным. Благодаря опции «Версия», описанной в Секция 1 «Настройка ПП», ПП имеет несколько версий, три из которых являются базовыми: *версия 1* реализует только блок 1 «Системные возможности»; *версия 2* – блок 1 «Системные возможности» и блок 3 «Голосовой помощник»; *версия 3* включает в себя все блоки ПП («Системные возможности», «Дополнительные программы», «Голосовой помощник»).

Описание работы трех основных блоков приложения «NichCom».

Блок 1 «Системные возможности». Схема блока системных возможностей, разделенная на два функционала и три опции, приведена на рисунке 2.

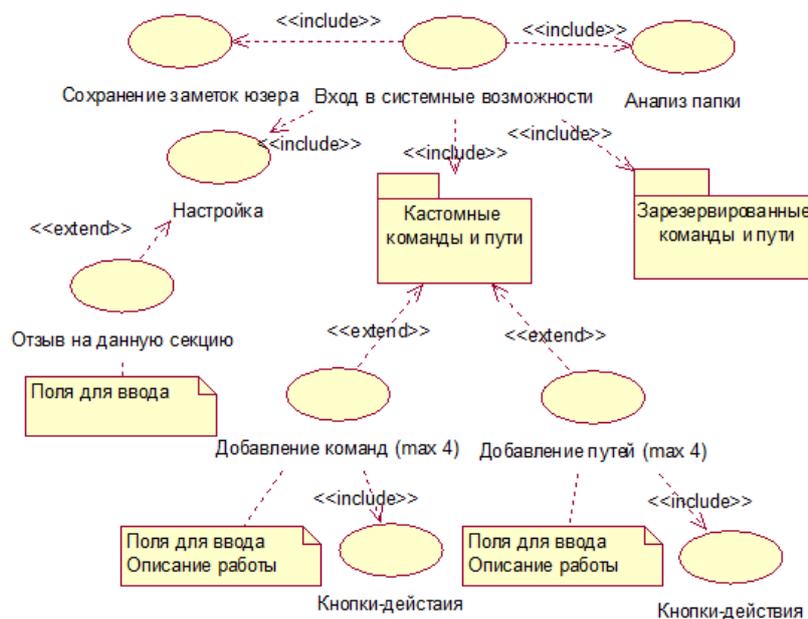


Рисунок 2 – Диаграмма Use Case прецедента «Системные возможности»

При активации ВИ «Вход в системные возможности» открывается дополнительное окно, в котором пользователь выбирает необходимый блок или опцию. Опция «Сохранение заметок юзера» позволяет пользователю создавать файлы и хранить необходимую ему информацию. Опция «Настройка» дает возможность напрямую связаться с командой разработчиков для дальнейшего улучшения инструментария «NishCom». Поле ввода комментария позволяет писать как текст, так и вставлять изображения. Ограничение на количество введенных символов составляет 500. Опция «Анализ папки» позволяет юзеру получить информацию в наглядном виде о размерах всех подпапок и файлов данной папки, а также полный размер текущей папки.

Функционал «Кастомные команды и пути» реализует в себе две дополнительные опции. Опция «Добавление команд» позволяет пользователю зарезервировать команды операционных систем, которые доступны в командной строке. При активации кнопки «Добавить команду» пользователю будет открыто дополнительное окно для ввода своего наименования команды, самой команды и выбора одной из 2 кнопок: «Проверить команду», которая позволяет без сохранения проверить и, если не было ошибок в поле ввода команды, запустить ее или «Сохранить команду». Данная опция позволяет добавить пользовательские команды, после чего, кнопка «Добавить команду» будет неактивна. Более того, пользователю доступна иконка «Описание работы», которая содержит в себе базовые команды различных операционных систем и пример, как добавлять собственные команды в виде картинок и короткого видео. Опция «Добавление путей» работает в точности как опция «Добавление команд», только в поле необходимо вводить не команды ОС, а необходимый полный путь, который пользователь хочет зарезервировать.

Функционал «Зарезервированные команды и пути» предоставляет юзеру пользоваться уже зарезервированными командами и путями по умолчанию. Функционал реализует пять зарезервированных пунктов: удаление временных файлов, открытие хост файла, открытие виртуальной клавиатуры, открытие консоли и очищение корзины. Особенность работы данных функционалов в том, что для их вызова и занесения пользовательской информации можно использовать голосовой помощник, описанный в блоке 3.

Блок 2 «Дополнительные программы». Блок дополнительных программ реализует три функционала. Схема построения блока приведена на рисунке 3.

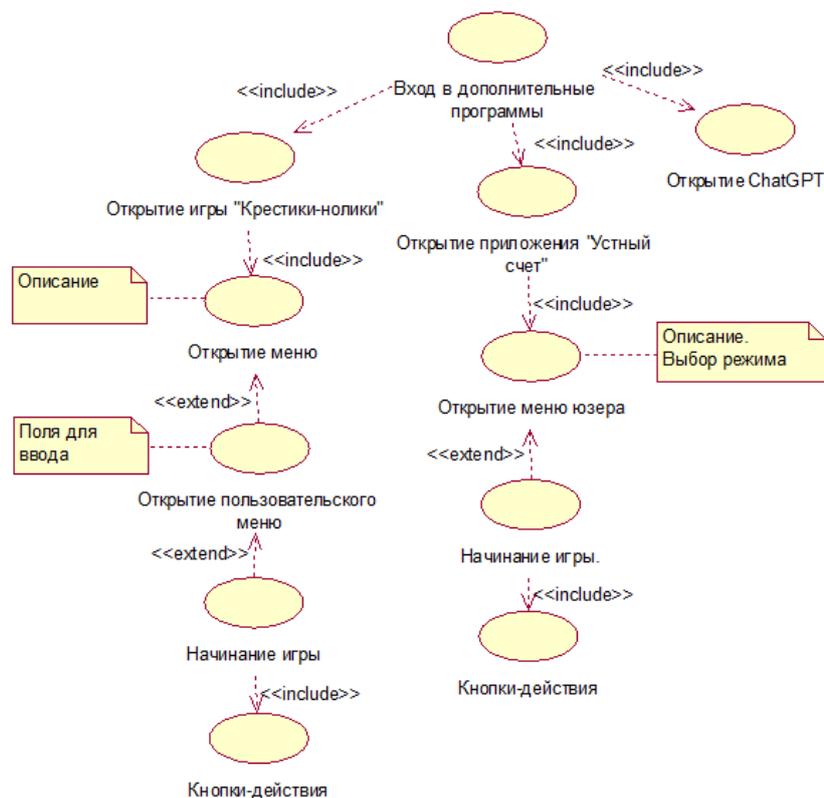


Рисунок 3 – Диаграмма Use Case прецедента «Дополнительные программы»

Пользователь активирует ВИ «Вход в дополнительные программы». Появляется дополнительное окно с выбором трех функционалов.

Функционал «Открытие игры “Крестики-Нолики”» позволяет пользователю начать игру. Данная игра открывается в браузере, который стоит по умолчанию на ПК. При успешной загрузке появляется опция «Открытие меню» – это приветственное меню, в котором кратко описаны правила игры. Доступны две кнопки-действия: «Закрыть игру» и «Продолжить». При активации первой кнопки игра полностью закрывается, и пользователь возвращается к ВИ «Вход в дополнительные программы». Иначе, пользователю предоставляется опция «Открытие пользовательского меню», которая представляет собой регистрацию игрока / игроков, выбор режима игры (однопользовательский / многопользовательский), ввод персонального ключа (опционально) и кнопок-действий: «Закрыть игру» и «Продолжить». Если пользователь выбирает режим однопользовательской игры, его противником становится ПК, иначе вторым игроком является второй пользователь. Многопользовательская игра реализована как игра с использованием одного ПК, так и по сети при помощи ввода персонального ключа. Персональный ключ отображается в самом верху окна игры при выборе многопользовательского режима. При активации кнопки «Продолжить» перед пользователем расчерчивается поле 3*3 и в зависимости от выбранного режима начинается сама игра. Данное окно игры реализует не только игровое поле, но и счетчик побед игроков, и кнопки-действия: «Начать заново», «Продолжить» и «Закрыть игру». Если пользователь захочет обнулить счет, для этого он выбирает действие «Начать заново», иначе – «Продолжить».

Для реализации игры «Крестики-нолики», которая находится в блоке 2 «Дополнительные программы», был выбран язык программирования JavaScript и его библиотека React. Так как данная игра является браузерной, было выбрано использование именно React библиотеки для плавной её реализации, которая позволяет перемещаться по содержимому страниц без постоянной их загрузки. Процесс игры описан выше в блоке 2 в функционале «Открытие игры “Крестики-нолики”».

Дополнительно данная игра доступна и в голосовом помощнике, где реализация игры происходит с использованием голосовых команд. Этот процесс работы приведен в статье [1].

Описание реализации игровой части инструментария «NichCom». Функционал «Открытие приложения “Устный счет”» позволяет пользователю тренироваться в устном счете. Данный функционал реализует опцию «Открытие меню юзера», которая сочетает в себе несколько режимов устного счета: ввод ответа вычисляемого выражения, заполнение пустот в выражении, ввод ответа на выражения из таблицы умножения (до 10), ввод ответа на выражения из таблицы умножения (до 20). После выбора режима пользователем, ему дается выбрать одну из двух кнопок-действий: «Закрыть игру» или «Продолжить». При выборе второго варианта кнопки пользователю открывается окно с тем режимом, которой он выбрал. Установлено количество жизней (сейчас 3) и время для решения одного выражения. Минимальное время – 5 секунд, в зависимости от сложности выражения время изменяется, максимальное время – 45 секунд. Для расчета рейтинга при неправильном ответе у пользователя отнимается одна жизнь, иначе – одна прибавляется. Если израсходованы все жизни, пользователю выводится набранное количество очков. Доступны кнопки-действия «Начать заново», «Изменить режим» и «Закрыть приложение». Каждый режим сохраняет свои максимально набранные количества очков пользователя.

Функционал «Открытие ChatGPT» реализует прямое соединение с данным чатом ИИ.

Блок 3 «Голосовой помощник». Схема построения данного блока описана в статье [1], в нем реализовано использование голосового помощника. Блок поддерживается только при использовании микрофона пользователем. Он имеет доступ не только к реализованной логике, но и к изменению информации данного инструментария «NichCom» в блоке «Системные возможности». Для этого было реализовано два метода `get_audio` и `speak`, с использованием библиотеки Python Pytsx3, преобразующей текст в речь и `speech_recognition`, которая распознает речь. Преимущество использования системы распознавания речи в том, что она преодолевает грамотность. Модель распознавания речи может использоваться разной по грамотности аудиторией, сосредоточившись на устных аргументах.

Апробация. Верификация и валидация разработанного приложения «NichCom» бета-тестировщиками показала его хорошую работоспособность и востребованность в помощи

пользователю для упрощения выполнения некоторых операций с ПК. Однако при использовании голосового помощника было выявлено, что процесс занесения информации в блок 1 «Системные возможности» имеет ряд трудностей в распознавании человеческой речи из-за сокращения названий команд, перехода на другое поле и описания пути до конкретного места в ОС. В будущем планируется совершенствование работы голосового помощника. Основная часть разработанного инструментария «NichCom» реализована на языке программирования Python, игровая часть – на языке программирования JavaScript. Функционал содержит в себе вспомогательные элементы, которые предотвращают сбой инструментария, если пользователь, например, не ввел необходимые данные. Вспомогательные элементы в блоках «Системные возможности» и «Дополнительные программы» представлены в виде текста красного цвета, который появляется там, где данные не были получены от пользователя. Блок «Системные возможности» позволяет сохранить время пользователя, благодаря своей концепции.

Заключение. Предложенный в статье функционал полезен не только обычному пользователю, но и продвинутому, так как позволяет сохранять команду или набор команд, работающих в командной строке Windows в PowerShell, с помощью одной кнопки, что позволяет пользователю сэкономить время при написании своих команд в командной строке. Другой функционал блока «Системные возможности» позволяет пользователю сохранить любой путь до нужного места или даже открыть необходимый файл. Описанный функционал позволяет не беспокоиться и не запоминать месторасположение конкретного файла. Если в блоке «Голосовой помощник» пользователь выразился недостаточно понятно или запросил функционал, который не реализован, то он будет оповещен голосом о том, что голосовой помощник не смог дать ответ. Основная задача данного инструментария – делегировать и упростить пользователю работу за ПК. В блоке «Дополнительные программы» у пользователя есть возможность как отдохнуть, так и потренировать мыслительные способности детей.

Разработанный готовый рабочий прототип доступен в сети Интернет по адресу <https://github.com/ADolzhenok/NichCom>.

Литература

1. Осипенко, Н. Б. Разработка и использование голосового помощника на примере программного приложения «Омикрон» / А. В. Долженко, Н. Б. Осипенко // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2022. – № 6 (135). – С. 72–76.

Об одной реализации коммуникационной платформы для обмена документами с математическими выражениями

Е.И. СУКАЧ, В.В. ГРОМЫКО

В статье излагаются результаты разработки коммуникационной платформы с поддержкой обмена текстом с выражениями в формате LaTeX. Отмечается актуальность разработки, описываются средства реализации веб-приложения, приводится сценарий работы программного обеспечения, рассматривается схема организации базы данных реализованного приложения, указываются основные правила использования приложения.

Ключевые слова: программное обеспечение, коммуникация, сетевой чат, мессенджер, веб-приложение, выражения LaTeX, база данных, язык программирования TypeScript.

The article describes the results of the development of a communication platform with support for text exchange with expressions in LaTeX format. The relevance of the development is noted, the means of implementing the web application are described, the software scenario is given, the database organization scheme of the implemented application is considered, the basic rules for using the application are indicated.

Keywords: software, communication, network chat, messenger, web application, LaTeX expressions, database, TypeScript programming language.

Введение. Одним из наиболее популярных инструментов для верстки научных статей, монографий и презентаций, выдержанных в лаконичном академическом стиле и содержащих большое число математических выражений, является LaTeX [1]. В настоящее время он широко используется как начинающими математиками, так и известными учеными, которые применяют его для записи принятых предположений и полученных результатов, обоснования логических цепочек при доказательстве теорем. Система LaTeX превосходит многие существующие офисные пакеты по ряду предоставляемых возможностей и является достойным альтернативным решением при выборе редактора. Однако при организации общения в научных кругах возникает задача обеспечения устойчивого систематического обмена частями LaTeX документов. При этом приходится либо отправлять весь документ с выражениями, либо отправлять выражение отдельно в виде программного кода, который невозможно прочитать, не вставив его в нужные программы. Это доставляет свои неудобства и трудности на дистанции и до сих пор нет популярного решения, которое бы удовлетворяло всем потребностям научного сообщества.

Поэтому задача по созданию программного обеспечения, которое бы полностью поддерживало как отправку всего документа, так и отдельного выражения сразу, является актуальным и по сей день. Это не только бы облегчило работу всем, кто нуждается в подобном продукте, но и сплотило бы сообщество как начинающих, так и продвинутых математиков, которые могли бы делиться между собой знаниями и полученными результатами.

В статье предлагается решение, полученное с использованием современных информационных технологий, в виде веб-приложения, позволяющее в научном кругу создавать и поддерживать каналы передачи как текстовых данных, так и LaTeX выражений, которые отображаются в обычном виде, что и определяет новизну предложенного подхода.

Реализация коммуникационной платформы. Разработанное и реализованное веб-приложение обладает удобным и практичным дизайном. Оно позволяет отправлять как текст, так и LaTeX выражения, которые отображаются как в обычных документах, вместо простого кода. Приложение было создано благодаря множеству технологий, среди которых язык программирования TypeScript [2], JS-библиотека React, библиотека компонентов Mantine, веб-фреймворк Next.JS, СУБД MongoDB и многие другие.

Реализация выполнена в виде двух частей: клиентской и серверной. Клиентская позволяет пользователям регистрироваться и общаться с остальными пользователями в системе. Сер-

верная часть отвечает за хранение и обработку данных пользователей: данных об аккаунтах и сообщениях пользователя. Немаловажным свойством разработанного приложения является отсутствие средств для сбора данных с возможностью отслеживания связей и проведения аналитической обработки доступной информации. Основной упор сделан на реализацию функции хранения только лишь необходимых данных для организации коммуникационной платформы. Сценарий работы разработанного программного обеспечения показан на рисунке 1.

При первом использовании программного обеспечения загружается начальная страница веб-приложения, благодаря которой новый пользователь может ознакомиться с продуктом и принять решение об его дальнейшем использовании. Начальная страница веб-приложения включает нескольких частей: начальный (приветственный) блок; блок с основными функциями продукта; блок с отображением работы визуализатора LaTeX выражений; блок с часто задаваемыми вопросами о продукте.

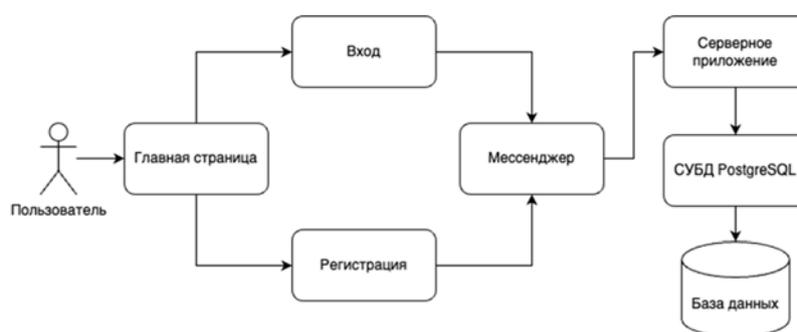


Рисунок 1 – Сценарий работы программного обеспечения

Пользователь может начать работу и, выбрав одну из возможностей «Регистрация» или «Вход», расположенных в верхней части веб-приложения, пройти регистрацию или войти в систему. Выбор одного из предложенных вариантов вызывает отображение форм для входа или регистрации. Если зарегистрированный пользователь забыл пароль, он может его восстановить, используя форму для восстановления пароля, ссылка на которую находится под формой для входа в аккаунт.

После входа пользователя в свой аккаунт ему предлагается страница со списками чатов и активным чатом, с использованием которой производится общение между пользователями специализированного мессенджера. Внизу страницы находится кнопка с отображением текущего аккаунта, с помощью которой пользователь может управлять своим аккаунтом или выйти из него. Стоит отметить, что для пользователей, которые уже произвели вход в систему, будет организован автоматический переход на страницу с чатом, даже если первоначальная страница, куда пользователь изначально пытался перейти, являлась главной.

Как только пользователь попадает в систему под своим аккаунтом, он имеет возможность начать общение с другими пользователями. Новый чат в системе создается с максимальной простотой: для этого нужно всего лишь знать электронную почту другого собеседника, который тоже имеет зарегистрированный аккаунт. Создание производится с помощью кнопки «Создать чат», которая вызывает модальное окно (рисунок 2). Также после того, как чат будет создан, можно указать, будет ли первоначальное сообщение отправлено как LaTeX. Благодаря регулярным выражениям существует возможность отправлять LaTeX выражения как обычный текст, после чего они будут автоматически определены и отображены в корректном формате.

Успешное завершение создания чата с собеседником происходит, если вторая сторона находится в сети. Планируемый собеседник увидит новый чат у себя в сервисе благодаря технологиям WebSocket и GraphQL Subscriptions.

Иногда бывают случаи, когда пользователь попадает на страницу по ссылке, которая не существует. Для корректного выхода из такой ситуации в приложении продумана собственная версия несуществующей страницы, которая помогает пользователю вернуться обратно на главную страницу приложения.

Рисунок 2 – Модальное окно для создания чата

Далее, уже с помощью списка чатов, можно выбирать нужного собеседника и отправлять ему сообщения как в обычном текстовом формате, так и в формате LaTeX, кликнув заранее на чекбок под полем ввода сообщения. Интерфейс платформы для общения представлен на рисунке 3.

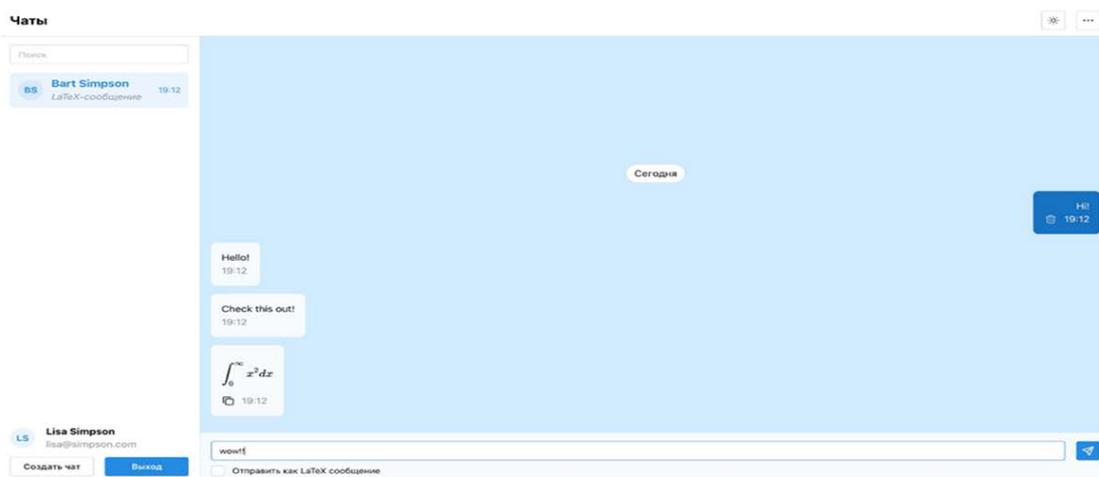


Рисунок 3 – Главное окно мессенджера с открытым чатом

Сервис также соблюдает все стандарты по безопасности, поэтому все сообщения передаются по защищенному соединению с сервером, что предотвращает возможность перехвата информации третьими лицами с помощью атаки Man-in-the-Middle.

Организация базы данных веб-приложения. База данных веб-приложения состоит из нескольких таблиц: «User», «Conversation», «Message» и «ConversationToUser».

Таблица «User» отвечает за хранение данных аккаунтов пользователей. Она включает в себя такие поля, как имя и фамилия пользователя, «никнейм», электронную почту и хэш пароля, а также дату создания и изменения записи.

Таблица «Conversation» отвечает за хранение чатов между пользователями. В ней есть поля, отвечающие за название чата и его типа, который может иметь значения «PRIVATE» или «GROUP».

Таблица «Message» отвечает за хранение сообщений пользователей. В ней есть поля как для хранения обычного текста сообщения, так и текста в виде LaTeX-формулы. Поля «conversationId» и «userId» отвечают за связи сообщений с соответствующими чатами и пользователями, отправившими их.

Также существует служебная таблица «ConversationToUser», которая создается автоматически при использовании средств объектно-реляционного отображения Prisma. Она необходима для связывания конкретных чатов и пользователей с целью последующего поиска по ним с использованием SQL-запросов. Схема созданной базы данных представлена на рисунке 4.

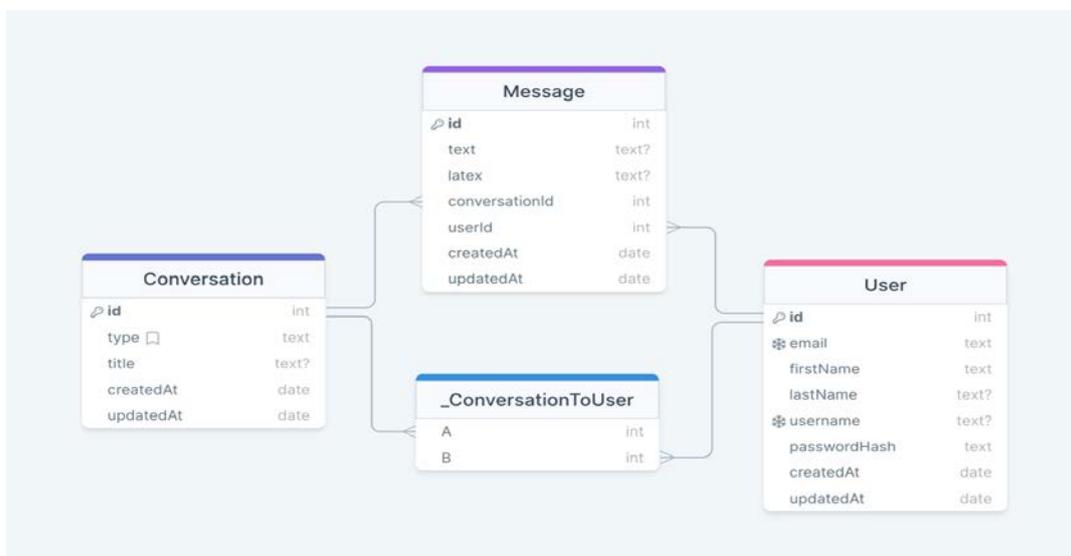


Рисунок 4 – Схема базы данных веб-приложения

Заключение. В статье описаны возможности программного обеспечения, которое открывает новые возможности по сравнению с существующими информационными платформами для обмена сообщениями. Коммуникационное веб-приложение доступно в виде веб-сайта в сети Интернет. Оно позволяет с легкостью и удобством общаться энтузиастам, которые хотят делиться своими знаниями в математической области, а также отправлять LaTeX выражения без изменений.

Литература

1. Коттвиц, Ш. LaTeX : руководство для начинающих / Ш. Коттвиц. – М. : ДМК, 2022. – 320 с.
2. Хавербеке, М. Выразительный JavaScript. Современное веб-программирование / М. Хавербеке. – СПб. : Питер, 2021. – 480 с.

Система шифрования данных на основе устройств фазовой синхронизации

Л.Ю. Шилин, А.А. НАВРОЦКИЙ

В работе исследована возможность использования динамического хаоса при кодировании информации. Предложена система кодирования информации для передачи по открытым каналам связи на основе асинхронного ключа. В качестве гамма-ключа для обратимого кодирования файлов предлагается использовать последовательность чисел, получаемых при помощи генератора при хаотическом режиме работы. Учитываются значения фазы и частоты сигнала на выходе блока фильтров в режиме хаоса.

Ключевые слова: система фазовой синхронизации, режим детерминированного хаоса, генератор псевдослучайных чисел, криптографическая система.

The paper explores the possibility of using dynamic chaos when encoding information. An information coding system for transmission over open communication channels based on an asynchronous key is introduced. It is proposed to use a sequence of numbers obtained with a generator in a chaotic mode of operation as a gamma key for reversible file encoding. The values of the phase and frequency of the signal at the output of the filter block in chaos mode are taken into account.

Keywords: phase synchronization system, deterministic chaos mode, pseudo random number generator, cryptographic system.

Введение. Бурное развитие информатики, компьютерных сетей и беспроводных систем порождает большое количество задач, которые трудно, а иногда и практически невозможно решать, используя только традиционные подходы теории информации. Исследователи все чаще исследуют возможность применения альтернативных методов, используемых для решения задач в других областях науки и техники. Ярким примером является использование теории динамического хаоса для разработки новых принципов шифрования информации, так как интенсивный рост производительности процессоров сводит на нет многие традиционные криптографические решения.

Генератор псевдослучайной последовательности на основе системы фазовой синхронизации. Генераторы псевдослучайных чисел находят широкое применение в криптографии: например, при поточном шифровании, когда необходимо генерировать совершенно непредсказуемые или попросту случайные числа. Использование динамического хаоса открывает перспективы создания на базе систем фазовой синхронизации высокоэффективных генераторов колебаний с частотной и фазовой хаотической модуляцией. Такие генераторы могут быть реализованы как аппаратно, так и программно. Данный аспект делает весьма привлекательной идею реализации систем шифрования информации на основе динамического хаоса.

Для реализации подобных способов криптозащиты необходимо исследовать класс систем фазовой синхронизации с целью определения параметров работы в различных режимах и исследования их свойств. Поскольку рассматривается программная реализация генератора псевдослучайных чисел, необходимо построить достаточно гибкую алгоритмическую модель. До настоящего времени программы расчета и методы моделирования импульсных систем с фазовым управлением представляли собой сложные аналого-цифровые устройства, что существенно затрудняло их анализ и построение. Кроме того, проектирование подобных комплексов требует учета ряда как внешних, так и внутренних детерминированных и случайных возмущений. Вследствие этого зачастую невозможно построить аналитическую модель: в системе учитывается время, нелинейности, стохастические переменные, а экспериментирование на реальных схемах требует значительных затрат.

Вышеназванные недостатки требуют иного подхода к моделированию подобных систем: целесообразно использовать имитационное моделирование, которое рассматривается как вычислительный эксперимент со сложной математической моделью, описывающей поведение реализуемой системы на компьютере. Наиболее популярным алгоритмическим подходом моделирования процессов в системах фазовой синхронизации является высокоточный подход. Он основывается на составлении математических моделей разной сложности.

Разбиение системы на простые блоки и использование принципа имитационного моделирования позволяет составить простую математическую модель системы. Полагаем, что на вход моделируемой системы ФАПЧ поступает напряжение, которое содержит две составляющие: напряжение опорного генератора и напряжение шумов, воздействующих на систему.

$$U_{oz}(t) = U_{on}(t) + \eta(t),$$

где $U_{on}(t)$ – опорный сигнал, $\eta(t)$ – напряжение шума.

Для непрерывной системы напряжение опорного генератора определяется следующим выражением:

$$u_{on}(t) = U_{\phi\delta} \cdot \sin \varphi_{on},$$

где $U_{\phi\delta}(t)$ – сигнал на выходе фазового детектора, φ_{on} – мгновенное значение фазы опорного генератора:

$$\varphi_{on} = \varphi_{on0} + \int_0^t \omega_{on} \cdot dt,$$

где φ_{on0} – начальная фаза сигнала, ω_{on} – частота опорного генератора.

Для импульсной системы ФАПЧ опорный сигнал представляет собой последовательность коротких импульсов с частотой ω .

Фазовый детектор (ФД) сравнивает частоты двух входных сигналов: сигнала опорного генератора и сигнала обратной связи; генерирует выходной сигнал, который является мерой их фазового рассогласования (например, если они различаются по частоте, то будет формироваться периодический выходной сигнал разностной частоты). Для рассматриваемой системы фазовый детектор будет определять разность фаз входного сигнала и сигнала обратной связи.

$$\varphi = \varphi_{on} - \varphi_{oc},$$

где φ_{on} – значение фазы опорного генератора, φ_{oc} – значение фазы сигнала обратной связи.

В общем случае напряжение на выходе ФД можно представить выражением:

$$U_{\phi}(t) = M[U_{\phi}(t)] + \xi(t) = F(\varphi) + \xi(t),$$

где $F(\varphi) = M[U_{\phi}(t)]$ – дискриминационная характеристика, $\xi(t)$ – флуктуационная составляющая.

Данный подход характеризуется малыми затратами машинного времени, высокой точностью расчетов и при этом имеет жесткий алгоритм, который не позволяет при моделировании выйти за ограниченный круг исследуемых устройств. Следует отметить, что существующие пакеты прикладных программ для моделирования систем фазовой синхронизации (например, *Simulink*) во многих случаях представляют собой сложные и ресурсоемкие программные продукты, которые не обладают требуемой гибкостью и быстродействием. Кроме того, подобное программное обеспечение ориентировано на решение более общих задач, поэтому детальный анализ характеристик и режимов работы подобных систем зачастую не может быть реализован.

В связи с бурным развитием элементной базы, как следствие и мощностей вычислительной техники, наиболее привлекательными становятся упрощенные модели, которые основаны на модульном принципе и имитационном моделировании. Такой способ моделирования является более универсальным и позволяет разработчику всесторонне изменять структуру, включать и исключать дополнительные блоки.

Ранее была разработана математическая модель, применение которой позволило решить задачу моделирования и проанализировать работу аналоговых и импульсных систем фазовой синхронизации, а также оценить качество их работы. Были смоделированы характерные для подобных систем режимы работы. Традиционно в системе фазовой синхронизации в качестве основного динамического режима рассматривается режим синхронизации (установившийся режим) (рисунок 1, а), который характеризуется постоянством выходной координаты, неизменной длительностью импульсов, набега фазы. Он является основным рабочим режимом. Поэтому внимание исследователей было сосредоточено главным образом на изучении именно синхронного режима: точности синхронизации, областей удержания режима синхронизации в пространстве параметров и областей захвата в синхронный режим, времени вхождения системы в режим синхронизации и т. д.

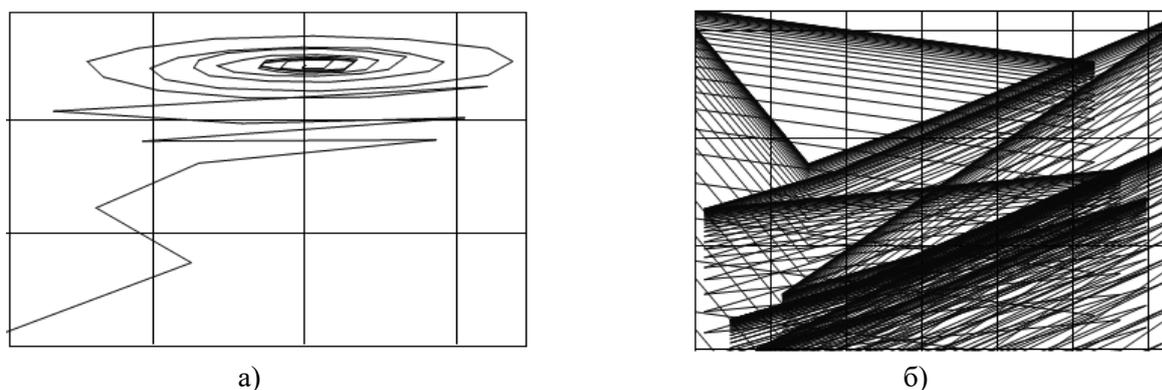


Рисунок 1 – Фазовый портрет моделируемой системы в установившемся режиме (а), в режиме детерминированного хаоса (б)

Асинхронный режим, обусловленный наличием нелинейности в системе, был интересен только потому, что он нарушал устойчивую работу системы. Данный режим является нерегулярным. Причина нерегулярности определяется свойством нелинейных систем экспоненциально быстро разводить первоначально близкие траектории. Поэтому не представляется возможным предсказать поведение таких систем, так как начальные условия можно задавать лишь с конечной точностью, а ошибки экспоненциально возрастают. Данный режим характеризуется построением странных аттракторов в области фазового пространства (рисунок 1, б). Рюэль, Такенс и Ньюхауз показали, что уже после двух неустойчивостей на третьем шаге траектория начинает притягиваться к ограниченной области фазового пространства, в которой первоначально близкие траектории расходятся, так что движение становится хаотическим [1]. Несмотря на нехарактерность этого режима, в настоящей работе предлагается рассматривать систему фазовой синхронизации в режиме детерминированного хаоса для использования в дальнейшем в качестве генератора псевдослучайных чисел.

Описание рассматриваемой криптосистемы. В настоящее время активно ведутся исследования возможности использования динамического хаоса при кодировании информации [2]. Наибольшее развитие получила аппаратная реализация криптосистем на основе хаоса. Это объясняется простой реализацией элементов системы фазовой синхронизации. Проблемы воспроизводимости характеристик генератора хаоса решаются с использованием различной элементной базы: интегральные схемы, цифровые сигнальные процессоры, программируемые логические интегральные схемы.

Программная реализация в большей степени базируется на схеме с нелинейным подмешиванием информационного сигнала в хаотический. При такой реализации информационный сигнал непосредственно участвует в формировании сложного хаотического поведения ведущей системы. Такой ввод информации нельзя назвать ни аддитивным наложением, ни обычной модуляцией. Данный выбор продиктован такими свойствами схемы, как точное извлечение информации из смеси с хаотическим сигналом, самосинхронизация передатчика с приемником, простота реализации. В качестве нелинейного элемента обычно используются псевдогенераторы хаоса, полученные на основе классических систем уравнений Лоренца (формула (1)) и Расслера, отображений Хенона и Икеды, формула, функции Вейерштрасса-Мандельброта, уравнения Мелли-Гласса, а также двухмерный и трехмерный генераторы Ван дер Поля, генераторы на основе логистического отображения и несимметричного *TENT*-отображения [3].

Система уравнения Лоренца (Lorenz System):

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= -\sigma(x - y) \\ \frac{dy}{dt} &= x(r - z) - y \\ \frac{dz}{dt} &= xy - bz,\end{aligned}$$

где σ , r и b – параметрические коэффициенты, определяющие динамику системы.

При этом необходимо оценить роль управляющих коэффициентов на работу системы. Это представляет собой достаточно трудоемкую задачу.

Исходя из вышеизложенного, предлагается на основе созданной имитационной модели создать систему кодирования информации. Последовательности чисел, получаемые при помощи генератора на основе системы при хаотическом режиме работы, предлагается использовать в качестве гамма-ключа для обратимого кодирования файлов. Учитываются значения фазы и частоты сигнала на выходе блока фильтров в режиме хаоса.

Предлагается на основе построенного генератора создать систему кодирования информации для передачи последней по открытым каналам связи. Будет использован симметричный алгоритм, в котором шифрование и дешифрование отличается только порядком выполнения и направлением некоторых шагов. В алгоритме будет использоваться один и тот же секретный ключ. Дешифрование будет осуществляться простым обращением шифрования. Каждый участник обмена данными может как расшифровать, так и зашифровать сообщение.

На передающей стороне имеются источник сообщений и источник ключей. Источник ключей выбирает конкретный ключ среди всех возможных ключей данной системы. Этот ключ передается некоторым способом принимающей стороне, причем предполагается, что его нельзя перехватить. Источник сообщений формирует некоторое сообщение, которое затем шифруется с использованием выбранного ключа. В результате процедуры шифрования получается засекреченное сообщение (криптограмма). Далее криптограмма передается по каналу связи. На принимающей стороне криптограмму с помощью ключа расшифровывают и получают исходное сообщение. Так как канал связи является открытым, незащищенным (примером может служить компьютерная сеть), то передаваемое сообщение может быть перехвачено. Для проектирования универсальной системы шифрования данных предлагается использовать гаммирование. Этот способ предполагает, что шифрование выполняется путем сложения символов исходного текста и ключа по модулю, равному числу букв в алфавите. Осуществляется побитовое сложение n -битового открытого текста и n -битового ключа:

$$y_i = x_i \oplus k_i, \quad i = 1, \dots, n,$$

где $x_1 \dots, x_n$ – открытый текст, $k_1 \dots, k_n$ – ключ, $y_1 \dots, y_n$ – шифрованный текст.

С точки зрения простоты реализации наиболее привлекательным является двоичное (битовое) гаммирование, так как при гаммировании по модулю два можно использовать одну и ту же операцию как для шифрования, так и для дешифрования. Операция сложения по модулю два очень быстро выполняется на компьютере (в отличие от многих других арифметических операций), поэтому наложение гаммы на текст большого объема не требует больших затрат времени. Недостатком такого подхода является невысокая скорость обработки больших объемов информации, например, видеофайлов. В этом случае при шифровании возможно изменение длины основания (например, не побитовое, а побайтовое шифрование сообщения).

Программная реализация. При проектировании эмулятора системы фазовой синхронизации было принято решение о разделении логики составных блоков. Принимая во внимание дальнейшее возможное использование и расширение моделируемых блоков, функциональные принципы работы составных блоков системы были реализованы в отдельном загружаемом модуле (динамически подключаемой библиотеке).

При разработке программного обеспечения была использована повторяемая архитектурная конструкция – паттерн «компоновщик», структурирующий объекты. Этот паттерн позволяет компоновать составные части моделируемой системы в древовидные структуры для представления иерархии часть-целое, что позволяет единообразно трактовать индивидуальные и составные блоки системы. Архитектура приложения, согласно выбранному паттерну, будет иметь вид, представленный на рисунке 2.

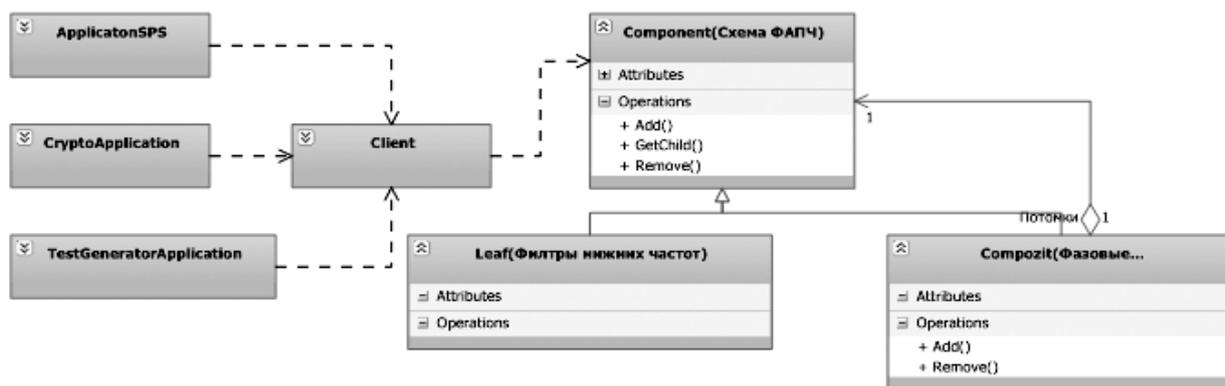


Рисунок 2 – Диаграмма архитектуры подключаемой библиотеки

Component (система ФАПЧ) – класс моделируемой системы. В нем объявляются интерфейсы для компонуемых объектов системы. Так же здесь также представлена реализация логики, общей для всех остальных классов. Этот класс инкапсулирует интерфейс для доступа к потомкам (составным элементам) и управления ними.

Leaf (фильтры нижних частот) – класс, объекты которого представляют логику поведения блоков фильтра нижних частот. Данный класс не имеет потомков, поэтому определяет поведение примитивных объектов в общей композиции.

Composit (фазовые детекторы, объекты управления) – объекты этого класса определяют поведение компонентов, у которых есть потомки. В нем делегируется компоненты-потомки, и реализуются интерфейсы, относящиеся к управлению объектами класса *Leaf*. Клиенты используют интерфейс класса *Component* для взаимодействия с объектами в составной структуре. Данный подход позволяет из примитивных объектов составлять сложные композиции. Любая схема может работать как с примитивным объектом, так и со сложным. Пользователь может единообразно работать с различными составными структурами. Используемый ключ представляет собой параметры моделируемой электрической схемы, которые можно условно разделить на две группы: «физические» и «архитектурные». К «физическим» относятся электрические величины элементов цепи: значения амплитуды и частоты опорного генератора, сопротивлений, индуктивностей, емкостей. Под «архитектурными» параметрами понимаются сами элементы электрической схемы (например, количество резистивностей или индуктивностей в фильтре, способ их соединения, используемый в цепи фазовый дискриминатор). Функциональность динамически загружаемой библиотеки, эмулирующей работу системы фазовой синхронизации, была расширена за счет добавления возможности сериализации объектов класса, эмулирующих логику работы ФАПЧ. Сериализация представляет собой процесс преобразования объекта в поток байтов с целью сохранения его в памяти, в базе данных или в файле. Ее основное назначение – сохранение состояния объекта для обеспечения возможности его восстановления. Предлагаемый способ работы с ключами преследует две цели. Во-первых, так значительно легче и быстрее обрабатывать данные, чем читать их из текстового файла. Во-вторых, преобразованные в последовательность байты не несут смысловую и статистическую нагрузку. Иными словами, без знания структуры объекта ключ становится практически бесполезным. Как уже отмечалось ранее, должна существовать возможность изменения параметров кодирования в зависимости от размера файла.

При кодировании файла целиком (без учета структуры) снижается криптостойкость шифра. Это объясняется тем, что многие файлы помимо основных данных хранят однородные данные о формате. Поэтому для некоторых форматов файлов целесообразно шифровать только основные данные. При шифровании текстовых файлов преобразовывать символы в коды таблицы соответствующей кодировки (например, *ANSI*, *UNICODE*). Далее производить преобразование над кольцом, мощность которого соответствует размеру таблицы кодировки. Для повышения криптостойкости возможно использование обратного отображения кодов в

символы. При шифровании изображений необходимо выделить каждый пиксель изображения и выполнить гаммирование отдельно для каждого цветового канала. Результат шифрования рисунка в формате *.bmp представлен на рисунке 3.

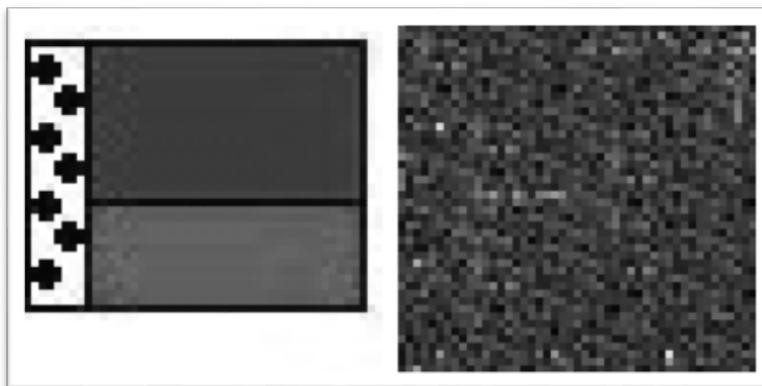


Рисунок 3 – Зашифрованное изображение

Заключение. Предложенная в работе криптосистема обладает рядом неоспоримых преимуществ. Для используемого ключа присуща случайность (равновероятность), ключ нельзя вырабатывать с помощью какого-либо детерминированного устройства. При шифровании коротких сообщений можно добиться равенства длины ключа и открытого текста. Важной особенностью системы является то, что при передаче ключа достаточно указать параметры работы системы в хаотическом режиме работы. Это уменьшает объем передаваемой информации и повышает стойкость шифра. Фактически происходит передача параметров генератора случайных чисел. Следует отметить высокую криптографическую стойкость и простую реализацию алгоритма.

Литература

1. Шустер, Г. Детерминированный хаос. Введение / Г. Шустер. – М. : Мир, 1988. – 240 с.
2. Дмитриев, А. С. Динамический хаос : новые носители информации для систем связи / А. С. Дмитриев, А. И. Панас. – М. : Физматлит, 2002. – 251 с.
3. Кузнецов, С. П. Динамический хаос : курс лекций : учеб. пособ. для вузов / С. П. Кузнецов. – М. : Физматлит, 2001. – 295 с.

Белорусский государственный
университет информатики и радиоэлектроники

Поступила в редакцию 05.02.2024

О пересечении абнормальных максимальных подгрупп, не содержащих подгруппу p -нильпотентный радикал, в группах с операторами

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

В работе исследовано строение подгруппы, равной пересечению ядер не p -нильпотентных абнормальных максимальных подгрупп в группах с операторами. Установлены свойства соответствующей обобщенной подгруппы Фраттини.

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

The work studies the structure of a subgroup equal to the intersection of the nuclei of non- p -nilpotent anomalous maximal subgroups in groups with operators. The properties of the generalized Frattini subgroup are established.

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

Введение. Все рассматриваемые в статье группы предполагаются конечными. В теории конечных групп объекты, экстремально расположенные в группе, играют важную роль. Особое внимание уделяется максимальным подгруппам. Одно из направлений исследований в теории пересечений максимальных подгрупп связано с анализом свойств пересечений заданных максимальных подгрупп и их воздействия на структуру подгрупп и нормальную структуру группы. Это направление исследований восходит к работе Г. Фраттини [1], который показал, что пересечение $\Phi(G)$ всех максимальных подгрупп конечной группы G является nilпотентным. Результаты этого исследования развивались в работах различных авторов, о которых можно узнать из монографий [2] и [3].

Данная работа посвящена развитию указанного направления в группах с операторами и продолжает исследования работ [5]–[7].

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

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

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

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

- 1) если $G \in \mathfrak{F}$ и $N \triangleleft G$, то $G/N \in \mathfrak{F}$;
- 2) если $G/N_1 \in \mathfrak{F}$ и $G/N_2 \in \mathfrak{F}$, то $G/N_1 \cap N_2 \in \mathfrak{F}$.

Пусть \mathfrak{F} – формация. Тогда через $G^{\mathfrak{F}}$ обозначается \mathfrak{F} -корадикал группы G – пересечение всех нормальных подгрупп N группы, для которых $G/N \in \mathfrak{F}$. Если \mathfrak{F} – формация, замкнутая относительно произведений нормальных \mathfrak{F} -подгрупп, то наибольшую нормальную \mathfrak{F} -подгруппу называют \mathfrak{F} -радикалом группы G и обозначают $G_{\mathfrak{F}}$.

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

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

Заметим, что максимальная A -допустимая подгруппа M либо целиком содержит \mathfrak{F} -радикал группы G , либо $MG_{\mathfrak{F}} = G$. Действительно. Так как произведение A -допустимых подгрупп A -допустимо и $G_{\mathfrak{F}}$ – характеристическая подгруппа, а, следовательно, A -допустимая, то $MG_{\mathfrak{F}} = M$ или $MG_{\mathfrak{F}} = G$. Аналогичные рассуждения верны и для \mathfrak{F} -корадикала.

Пусть \mathfrak{F} – формация p -нильпотентных групп. Введем следующие обозначения:

$\overline{\Delta}_{\overline{F}_p}^p(G, A) = \cap \{M_G \mid M \not\subseteq G^{\mathfrak{F}}, M \not\subseteq G_{\mathfrak{F}}, M \notin \mathfrak{F}, M \text{ – абнормальная } A\text{-допустимая подгруппа}\};$

$\Delta_{\overline{F}_p}^p(G, A) = \cap \{M_G \mid M \not\subseteq G^{\mathfrak{F}}, M \not\subseteq G_{\mathfrak{F}}, M \text{ – абнормальная } A\text{-допустимая подгруппа}\};$

$\Delta_{F_p}^p(G, A) = \cap \{M_G \mid M \not\subseteq G^{\mathfrak{F}}, M \supseteq G_{\mathfrak{F}}, M \text{ – абнормальная } A\text{-допустимая подгруппа}\};$

$\Delta(G, A) = \cap \{M_G \mid M \text{ – абнормальная } A\text{-допустимая подгруппа}\};$

$\Phi(G, A) = \cap \{M_G \mid M \text{ – } A\text{-допустимая подгруппа}\}.$

В частном случае, когда \mathfrak{F} – формация p -нильпотентных (нильпотентных) групп, подгруппу $\overline{\Delta}_{\overline{G}_{\mathfrak{F}}}^{\mathfrak{F}}(G, A)$ будем обозначать $\overline{\Delta}_{F_p}^p(G, A)$ ($\overline{\Delta}_{\overline{F}}^{\mathfrak{N}}(G, A)$).

Если A – единичная группа операторов, то понятия A -допустимой максимальной подгруппы, не содержащей \mathfrak{F} -корадикал, и максимальной \mathfrak{F} -абнормальной подгруппы совпадают. В этом случае будем использовать обозначения $\overline{\Delta}_{F_p}^p(G)$ и $\overline{\Delta}_{\overline{F}}^{\mathfrak{N}}(G)$.

Всегда полагаем, что пересечение пустого множества подгрупп из G совпадает с самой группой G .

Напомним, что подгруппой Гашюца $\Delta(G)$ называют подгруппу, равную пересечению всех ненормальных максимальных подгрупп группы G .

Необходимо отметить, что не каждая максимальная подгруппа будет являться максимальной A -допустимой относительно некоторой группы операторов A , а так же не всякая максимальная A -допустимая подгруппа группы является максимальной подгруппой в этой же группе [6].

Вспомогательные результаты.

Лемма 1. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$ и $\Delta^p(G, A) \neq G$, тогда справедливы следующие утверждения:

1) $\Delta^p(G, A) \subseteq F_p(G)$, если G – разрешимая неединичная группа, то $\Delta^p(G, A) \subseteq F_p(G)$;

2) $F_p(G / \Delta^p(G, A)) = F_p(G) / \Delta^p(G, A)$.

Доказательство. Из теоремы 3.1 работы [5] следует, что $\Delta^p(G, A)$ является p -нильпотентной подгруппой. Следовательно, $\Delta^p(G, A) \subseteq F_p(G)$. Пусть G – разрешимая неединичная группа. Тогда $G / \Delta^p(G, A)$ разрешима и неединична. Пусть $B / \Delta^p(G, A)$ – минимальная нормальная подгруппа в $G / \Delta^p(G, A)$. Так как $B / \Delta^p(G, A)$ – p -группа для некоторого простого p , а формация p -нильпотентных групп является нормально наследственной локальной формацией, содержащей все нильпотентные группы, то по теореме 3.2 из [5] B является p -нильпотентной, а это значит, что $B \subseteq F_p(G)$. Следовательно, $\Delta^p(G, A) \subseteq G$.

Если $F_p(G / \Delta^p(G, A)) = K / \Delta^p(G, A)$, то K является p -нильпотентной подгруппой, поэтому $K \subseteq G$ и $F_p(G / \Delta^p(G, A)) \subseteq F_p(G) / \Delta^p(G, A)$. Обратное включение следует из определения подгруппы $F_p(G)$.

Основной результат.

Теорема 1. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, тогда справедливы следующие утверждения:

- 1) в разрешимой неединичной группе выполняется равенство $\Delta_{F_p}^p(G, A) = \Delta^p(G, A)$;
- 2) в разрешимой не p -нильпотентной группе подгруппа $\Delta_{F_p}^p(G, A) \in (\mathfrak{G}_p, \mathfrak{G}_p)^2$.

Доказательство. Подгруппы $\Delta_{F_p}^p(G, A)$ и $\Delta_{F_p}^p(G, A)$ являются характеристическими в G и

$$\Delta_{F_p}^p(G, A) \cap \Delta_{F_p}^p(G, A) = \Delta^p(G, A).$$

Для факторгруппы $G / \Delta^p(G, A)$ выполняется

$$F_p(G / \Delta^p(G, A)) = F_p(G) / \Delta^p(G, A)$$

поэтому

$$\Delta_{F_p}^p(G / \Delta^p(G, A)) = \Delta_{F_p}^p(G, A) / \Delta^p(G, A).$$

Предположим, что $\Delta_{F_p}^p(G, A) / \Delta^p(G, A) \neq 1$ и пусть $K / \Delta^p(G, A)$ – минимальная нормальная подгруппа в $G / \Delta^p(G, A)$, содержащаяся в $\Delta_{F_p}^p(G, A) / \Delta^p(G, A)$. Так как формация p -нильпотентных групп содержит формацию всех nilпотентных групп, то $K / \Delta^p(G, A)$ p -нильпотентна и по теореме 3.5 из [5] K является p -нильпотентной подгруппой. Следовательно, $K \subseteq F_p(G)$. Тогда

$$K \subseteq \Delta_{F_p}^p(G, A) \cap \Delta_{F_p}^p(G, A),$$

получили противоречие. Значит, допущение не верно и $\Delta_{F_p}^p(G, A) / \Delta^p(G, A) = 1$, а, значит, $\Delta_{F_p}^p(G, A) = \Delta^p(G, A)$.

Пусть G – разрешимая не p -нильпотентная группа. Из того, что $F_p(G) \subseteq \Delta_{F_p}^p(G, A)F_p(G)$ и

$$\Delta_{F_p}^p(G, A) / F_p(G) = \Delta^p(G / F_p(G), A),$$

следует, что подгруппа $\Delta_{F_p}^p(G, A) \in (\mathfrak{G}_p, \mathfrak{G}_p)^2$.

Следствие 1.1. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, тогда в разрешимой неединичной группе подгруппа $\Delta_{F_p}^p(G, A)$ p -нильпотентна.

Если группа операторов A является тривиальной, то имеет место следующее

Следствие 1.2. Пусть G – разрешимая группа, тогда справедливы следующие утверждения:

- 1) Если $G \neq 1$, то $\Delta_{F_p}^p(G) = \Delta^p(G)$;
- 2) В любой не p -нильпотентной группе G подгруппа $\Delta_{F_p}^p(G) \in (\mathfrak{G}_p, \mathfrak{G}_p)^2$.

Следствие 1.3. В разрешимой неединичной группе подгруппа $\Delta_{F_p}^p(G)$ p -нильпотентна.

Если вместо формации p -нильпотентных групп выбрать формацию всех nilпотентных групп, то из следствия 1.2 вытекает результат из работы [4].

Теорема 2. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, G – разрешимая группа. Если $\bar{\Delta}_{F_p}^p(G, A) \neq G$, то $\bar{\Delta}_{F_p}^p(G, A) = \Delta^p(G, A)$.

Доказательство. Пусть G обладает не p -нильпотентными максимальными A -допустимыми подгруппами, не содержащими $\mathfrak{G}_p, \mathfrak{G}_p$ -корадикал и не содержащими $F_p(G)$. Не сложно заметить, что

$$\Delta^p(G, A) \subseteq \bar{\Delta}^p(G, A) \subseteq \bar{\Delta}_{F_p}^p(G, A)$$

и согласно теореме 3.4 из работы [5] $\Delta^p(G, A) = \overline{\Delta}^p(G, A)$.

Пусть подгруппа $\overline{\Delta}_{F_p}^p(G, A)$ не совпадает с подгруппой $\overline{\Delta}^p(G, A)$, тогда $\overline{\Delta}_{F_p}^p(G, A) / \overline{\Delta}^p(G, A) \neq 1$ и пусть $K / \overline{\Delta}^p(G, A)$ – минимальная нормальная подгруппа в $G / \overline{\Delta}^p(G, A)$, содержащаяся в $\overline{\Delta}_{F_p}^p(G, A) / \overline{\Delta}^p(G, A)$. Так как формация p -нильпотентных групп содержит формацию всех nilпотентных групп, то $K / \overline{\Delta}^p(G, A)$ p -нильпотентна. Тогда на основании теоремы 3.5 работы [5] следует, что K p -нильпотентная подгруппа. Следовательно, $K \subseteq F_p(G)$. Тогда

$$K \subseteq \overline{\Delta}_{F_p}^p(G, A) \cap \overline{\Delta}_{F_p}^p(G, A),$$

получили противоречие. Значит, допущение не верно и $\overline{\Delta}_{F_p}^p(G, A) / \overline{\Delta}^p(G, A) = 1$, а, значит, $\overline{\Delta}_{F_p}^p(G, A) = \Delta^p(G, A)$.

Применяя результаты работы [5] и теорему 1, получаем следующее

Следствие 2.1. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, G – разрешимая группа. Если $\overline{\Delta}_{F_p}^p(G, A) \neq G$, то $\overline{\Delta}_{F_p}^p(G, A)$ p -нильпотентная подгруппа группы G .

В случае, когда группа операторов A является тривиальной, из теоремы 2 получаем

Следствие 2.2. Пусть G – разрешимая группа. Если $\overline{\Delta}_{F_p}^p(G) \neq G$, то $\overline{\Delta}_{F_p}^p(G) = \Delta^p(G)$.

Следствие 2.3. Пусть G – разрешимая группа. Если $\overline{\Delta}_{F_p}^p(G) \neq G$, то $\overline{\Delta}_{F_p}^p(G)$ p -нильпотентная подгруппа группы G .

Из следствия 2.3 вытекает соответствующий результат работы [4].

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 : Бел. наука, 1997. – 144 с.
4. Монахов, В. С. Замечания о максимальных подгруппах конечных групп / В. С. Монахов // Доклады НАН Беларуси. – 2003. – Т. 47, № 4. – С. 31–33.
5. Бородич, Е. Н. О пересечении подгрупп в группах с операторами / Е. Н. Бородич, Р. В. Бородич, М. В. Селькин // Вестник БГУ. – 2012. – № 1. – С. 54–62.
6. Borodich, R. V. A generalized Frattini subgroup / R. V. Borodich // Asian-European Journal of Mathematics. – 2019. – № 14 (02). – DOI : 10.1142/S1793557121500261.
7. Бородич, Р. В. О пересечении максимальных подгрупп конечных групп / Р. В. Бородич // Укр. мат. журн. – 2019. – Т. 71, № 11. – С. 1455–1465.

Симметричная маркерная локальная сеть с относительным приоритетом

В.В. БУРАКОВСКИЙ, Г.Н. КАЗИМИРОВ

Исследуется симметричная локальная сеть с использованием маркерного кольца, состоящая из ограниченного числа N абонентских станций. На каждой из этих станций находятся два одноместных буфера, предназначенных для обработки сообщений двух различных классов. Поступающие на каждую станцию высокоприоритетные и низкоприоритетные сообщения формируют потоки, не зависящие от их порядкового номера, и подчинены пуассоновскому распределению с интенсивностями λ и μ соответственно. В результате проведенных исследований была получена система уравнений, позволяющая вычислить стационарные вероятности и основные вероятностно-временные характеристики данной локальной сети.

Ключевые слова: локальная сеть, маркерное кольцо, станция, сообщение, одноместный буфер, относительный приоритет обслуживания, стационарные вероятности состояний.

The investigation focuses on a symmetrical local area network utilizing token-passing, featuring a finite quantity of N stations. Each station is equipped with two singular buffers designated for the processing of two distinct types of messages. The incoming message streams to each station are modeled as autonomous Poisson processes, exhibiting arrival rates of λ and μ for high and low-priority messages, respectively. A set of equations has been derived to determine the steady-state probabilities and fundamental characteristics of the network under consideration.

Keywords: LAN, token-passing ring, station, message, single buffer, relative message priority service, steady-state probabilities.

Введение. В разработке сложных технических систем и сетей, используемых в авиационном приборостроении и производственных процессах, необходимо устанавливать специальные правила для управления передачей сигналов данных. Для решения этой задачи математические модели играют ключевую роль, описывая процесс управления доступом к среде передачи данных.

Рассмотрим математическую модель локальной вычислительной сети (ЛВС) с передачей маркера (token passing LAN) [1, с. 101]. В таких сетях используется маленький фрейм (маркер, токен), который передает временное управление средой передачи данных конкретному устройству (абонентской станции, АС). Это позволяет распределять управление доступом к сети между абонентами. Когда АС получает контроль над маркером, она может передавать свои сообщения, а затем передает маркер следующей АС [2, с. 121]. Каждая АС знает, от какого устройства она получает маркер и кому его передать (обычно это ближайшие соседи этой АС). Существующие протоколы управления такой сетью [3, с. 23] обычно ограничивают время использования маркера каждой АС, например, в сети Token Ring, где используется управление доступом с передачей маркера, а также физическая или логическая кольцевая топология [4, с. 10].

В кольцевой сети схема с использованием маркера (токена) считается наиболее эффективной [5, с. 63]. Кольцевая маркерная ЛВС давно описана в литературе и соответствует протоколам доступа циклического типа. Преимущества такой организации ЛВС включают:

- предсказуемые характеристики сети (загрузка и задержка сообщений);
 - возможность назначения приоритетов абонентам или сообщениям, что повышает надежность и скорость передачи важных данных;
 - высокая пропускная способность сети при полной загрузке за счет устранения коллизий.
- Сеть функционирует в соответствии со стандартом ANSI/IEEE 802.5 [6, с. 20].

Описание математической модели. Рассматривается симметричная кольцевая локальная вычислительная сеть с протоколом маркерного доступа (стандарт ANSI/IEEE 802.5), представляющая собой совокупность соединенных последовательно N АС. На каждой АС может находиться не более одного сообщения каждого из двух классов: высокоприоритетно-

го и низкоприоритетного. Поступающие на АС сообщения образуют простейшие (пуассоновские) потоки с интенсивностями λ и μ для высокоприоритетных и низкоприоритетных требований соответственно. При получении токена АС передает:

1. высокоприоритетное сообщение (если оно есть);
2. низкоприоритетное сообщение (если высокоприоритетного сообщения нет).

Если у станции нет сообщений, токен сразу передается следующей станции. Таким образом, при появлении маркера АС может передать не более одного сообщения, что соответствует правилу обслуживания сообщений с относительным приоритетом [7, с. 9].

Все АС связаны между собой моноканалом. Пусть станции нумеруются по направлению движения токена по кольцу, и обозначим через δ время передачи маркера между соседними станциями. Время приема одного сообщения для любой станции равно a . За время $\Delta = N\delta + a$ станция обслуживает сообщение любого класса, если оно есть в буфере. Поскольку процессы приема и передачи сообщений на всех АС одинаковы, рассмотрим их для произвольной станции.

В момент поступления токена АС находится в одном из четырех состояний:

1. На АС нет сообщений (с вероятностью p_0).
2. На АС есть высокоприоритетное сообщение, но нет низкоприоритетного (с вероятностью p_1).
3. На АС есть только низкоприоритетное сообщение (вероятность p_2).
4. На АС есть сообщения обоих классов (вероятность p_3).

Расчет стационарных вероятностей и вероятностно-временных характеристик.

Поведение рассматриваемой локальной сети в моменты поступления токена на АС можно описать при помощи цепи Маркова [8, с. 39].

Стационарные вероятности состояний рассматриваемой сети являются решением системы уравнений [9, с. 38]:

$$(p_0, p_1, p_2, p_3) = (p_0, p_1, p_2, p_3)\Theta, \sum_{i=0}^3 p_i = 1.$$

Здесь $\Theta = \{p_{ij}, 0 \leq i, j \leq 3\}$ – матрица размерности (4×4) , элементы которой рассчитываются по формуле полной вероятности:

$$\begin{aligned} p_{00} &= e^{-(\lambda+\mu)N\delta} (p_0 + e^{-(\lambda+\mu)\Delta} (1-p_0))^{N-1}; \\ p_{01} &= e^{-\mu N\delta} (p_0 + e^{-\mu\Delta} (1-p_0))^{N-1} - p_{00}; \\ p_{02} &= e^{-\lambda N\delta} (p_0 + e^{-\lambda\Delta} (1-p_0))^{N-1} - p_{00}; \\ p_{03} &= 1 - \sum_{i=0}^2 p_{0i}; p_{10} = e^{-\mu\Delta} p_{00}; p_{11} = e^{-\mu\Delta} p_{01}; \\ p_{12} &= e^{-\lambda N\delta} (p_0 + e^{-\lambda\Delta} (1-p_0))^{N-1} - p_{10}; \\ p_{13} &= 1 - \sum_{i=0}^2 p_{1i}; p_{20} = e^{-\lambda\Delta} p_{00}; \\ p_{21} &= e^{-\mu N\delta} (p_0 + e^{-\mu\Delta} (1-p_0))^{N-1} - p_{20}; \\ p_{22} &= e^{-\lambda\Delta} p_{02}; p_{23} = 1 - \sum_{i=0}^2 p_{2i}; p_{30} = p_{31} = 0; \\ p_{32} &= e^{-\lambda N\delta} (p_0 + e^{-\lambda\Delta} (1-p_0))^{N-1}; p_{33} = 1 - p_{32}. \end{aligned}$$

Подставив элементы матрицы Θ в систему, получим стационарные вероятности состояний сети:

$$\begin{aligned}
p_0 &= p_{00}(p_0 + e^{-\mu\Delta}(Ap_0 + p_0BG/F + BD/F) + e^{-\lambda\Delta}(p_0G/F + D/F)); \\
p_1 &= Ap_0 + p_0BG/F + BD/F; p_2 = p_0G/F + D/F; p_3 = 1 - \sum_{i=0}^2 p_i, \\
A &= p_{01}/(1 - e^{-\mu\Delta}p_{01}); B = (p_{01} + p_{00}(1 - e^{-\lambda\Delta}))/ (1 - e^{-\mu\Delta}p_{01}); \\
C &= p_{02} + p_{00}(1 - e^{-\lambda\Delta}); D = p_{00} + p_{02}; E = e^{-\lambda\Delta}p_{02}; \\
F &= 1 - BC + E - BD - D; G = p_{02} + AC + D.
\end{aligned}$$

Время обращения токена по кольцу – случайная величина, принимающая значения $N\delta + k\Delta$ с вероятностями g_k , которые вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned}
g_0 &= p_0^N; g_k = g_{0k} + g_{1k} = C_N^k(1 - p_0)^k p_0^{N-k}, 1 \leq k \leq N, \\
g_{0k} &= p_0 C_{N-1}^k(1 - p_0)^k p_0^{N-k-1} + p_2 C_{N-1}^{k-1}(1 - p_0)^{k-1} p_0^{N-k}, \\
g_{1k} &= (p_1 + p_3) C_{N-1}^{k-1}(1 - p_0)^{k-1} p_0^{N-k},
\end{aligned}$$

где g_{0k} и g_{1k} – вероятности того, что время обращения токена по кольцу равно $N\delta + k\Delta$, начиная движение с АС без высокоприоритетных сообщений и с высокоприоритетным сообщением соответственно.

Основные характеристики эффективности работы сети [10, с. 110], [11, с. 134], [12, с. 44] включают:

1. Среднее время задержки $\bar{\tau}$ высокоприоритетного сообщения на АС

$$\bar{\tau} = \frac{g_0 N \delta}{1 - e^{-\lambda N \delta}} + \sum_{m=1}^N \left(\frac{g_{0m}(N\delta + m\Delta)}{1 - e^{-\lambda(N\delta + m\Delta)}} + \frac{g_{1m}(N\delta + (m-1)\Delta)}{1 - e^{-\lambda(N\delta + (m-1)\Delta)}} \right) - \frac{1}{\lambda}.$$

2. Среднее время обращения токена по кольцу

$$TL = N\delta + \Delta \sum_{m=1}^N m g_m.$$

3. Вероятность потери высокоприоритетного сообщения на станции

$$PL = 1 - \frac{1 - U}{\lambda TL},$$

где $U = g_0 e^{-\lambda N \delta} + \sum_{m=1}^N (g_{0m} e^{-\lambda(N\delta + m\Delta)} + g_{1m} e^{-\lambda(N\delta + (m-1)\Delta)})$.

4. Среднее время задержки низкоприоритетного сообщения на АС

$$\tau = \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{k=r-1}^{rN} \left(\pi_0^r(k) \frac{rN\delta + k\Delta}{1 - e^{-\mu(rN\delta + k\Delta)}} + \pi_1^r(k) \frac{rN\delta + (k-1)\Delta}{1 - e^{-\mu(rN\delta + (k-1)\Delta)}} \right) - \frac{p_0}{\mu}.$$

Длительность низкоприоритетного периода занятости – случайная величина, принимающая значения $rN\delta + k\Delta$ с вероятностями $\pi^r(k)$, $r \in \mathbb{N}$, $r-1 \leq k \leq rN$, вычисляемыми по формулам:

$$\pi^r(k) = \pi_0^r(k) + \pi_1^r(k),$$

где $\pi_0^r(k) = p_0 C_{rN-1}^k(1 - p_0)^k p_0^{rN-k-1}$, $\pi_1^r(k) = p_2 C_{rN-1}^{k-1}(1 - p_0)^{k-1} p_0^{rN-k}$.

5. Средняя длительность низкоприоритетного периода занятости

$$TLL = N\delta \sum_{r=1}^{\infty} r \pi^r + \Delta \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{k=r-1}^{rN} k \pi^r(k),$$

где $\pi^r = \sum_{k=r-1}^{rN} \pi^r(k)$.

6. Вероятность потери низкоприоритетного сообщения на станции

$$PLL = 1 - \frac{1 - UL}{\lambda TLL},$$

где $UL = \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{k=r-1}^{rN} (\pi_0^r(k) e^{-\mu(rN\delta + k\Delta)} + \pi_1^r(k) e^{-\mu(rN\delta + (k-1)\Delta)})$.

Заключение. Разработана математическая модель симметричной кольцевой локальной сети с передачей маркера [13, с. 180]. На каждой станции сети имеется два буфера, предназначенных для высокоприоритетных и низкоприоритетных сообщений, и их порядок обслуживания определяется приоритетом. Модель основана на методе декомпозиции и рассмотрении функционирования сети. Стационарные вероятности состояний [14, с. 124] определяются из систем векторно-матричных уравнений, а формулы для основных характеристик сети выведены из анализа периодов занятости. Проблемы описания, оптимизации и эффективности работы локальных сетей с относительным приоритетом передачи сообщений являются актуальными в настоящее время [15, с. 107].

Литература

1. Takagi, H. Analysis of polling systems / H. Takagi. – Cambridge, M.A. : MIT Press, 1986. – 198 p.
2. Бакс, В. Кольцевые локальные сети с маркерным доступом и их производительность / В. Бакс // ТИИЭР. – 1989. – № 2. – С. 121–142.
3. ANSI/IEEE 802.5 Standard-1985. Token-passing Ring Access Method and Physical Layer Specification // IEEE Press. – 1985. – 89 p.
4. Бураковский, В. В. Локальные вычислительные сети : курс лекций / В. В. Бураковский, В. О. Родченко. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2008. – 78 с.
5. Бураковский, В. В. Маркерная кольцевая локальная сеть с конечными буферами и ординарным обслуживанием сообщений / В. В. Бураковский // Аэрокосмическое приборостроение России : сб. науч. тр. – 1998. – Вып. 1. – С. 63–67.
6. Бураковский, В. В. Имитационная модель КЛВС с бесконечными буферами и вентильным обслуживанием / В. В. Бураковский // Efektivní nástroje moderních věd – 2013 : materiály IX mezinárodní vědecko-praktická conference, Praha, 27 dubna – 05 květn 2013 roku. – Praha : Publishing House «Education and Science» s.r.o., 2013. – Díl 40 : Matematika. – P. 19–22.
7. Бураковский, В. В. Кольцевая локальная сеть с протоколом маркерного доступа / В. В. Бураковский, Г. А. Медведев // Техника средств связи. – 1990. – Вып. 7. – С. 9–16.
8. Бураковский, В. В. Симметричная маркерная кольцевая локальная сеть со случайным выбором дисциплины обслуживания / В. В. Бураковский // Проблемы физики, математики и техники. – 2016. – № 2 (27). – С. 39–41.
9. Burakovski, V. V. Non-symmetric dual-ring token-passing local area network / V. V. Burakovski // Modern scientific potential – 2015 : materials of the XI International scientific and practical conference, Sheffield, February 28 – March 7, 2015. – Sheffield : Science and education LTD, 2015. – Vol. 34 : Mathematics. Modern information technologies. – P. 38–41.
10. Бураковский, В. В. Маркерная кольцевая локальная сеть со случайным выбором дисциплины обслуживания с сокращением / В. В. Бураковский // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2017. – № 3 (102). – С. 109–113.
11. Бураковский, В. В. Симметричная маркерная кольцевая локальная сеть с конечными буферами и дисциплиной Бернулли обслуживания сообщений / В. В. Бураковский // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2020. – № 3 (120). – С. 131–134.
12. Бураковский, В. В. Симметричная маркерная кольцевая локальная сеть с разнотипными сообщениями и вентильным обслуживанием / В. В. Бураковский // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 2 (55). – С. 44–46.
13. Бураковский, В. В. Многомаркерные кольцевые локальные сети / В. В. Бураковский // Материалы III Международной научно-практической конференции, Барановичи, 21–22 октября 2010 г. – Барановичи : РИО БарГУ, 2010. – С. 180–181.
14. Бураковский, В. В. Симметричная маркерная локальная сеть с вентильным обслуживанием / В. В. Бураковский // Материалы Международной научно-практической конференции, Барановичи, 24–25 ноября 2011 г. – Барановичи : РИО БарГУ, 2011. – С. 124–126.
15. Бураковский, В. В. Несимметричная локальная сеть двойное маркерное кольцо / В. В. Бураковский // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2021. – № 3 (126). – С. 107–110.

Internal symmetry of the quantized multi-component Majorana fields

P.P. ANDRUSEVICH¹, V.M. RED'KOV²

We continue the investigation of the internal symmetry of the multi-component Majorana fields, which can be associated with one, two, three and four Dirac fields. The case of the classical fields was studied in the previous paper. According to the definition, internal symmetries should satisfy a number of requirements: the corresponding transformations must preserve the form of the equation which leads to the constraints $[Q, \Gamma_\mu]_- = 0$ in a massive case, and to $[Q, \Gamma_\mu]_- = 0$ and $[Q, \Gamma_\mu]_+ = 0$ for massless fields; the Lagrangian must be invariant under such symmetries, which yields to the constraint $Q^+ \eta Q = \eta$; the transformations must preserve the Majorana nature of the fields, that means that if Ψ_A is the real (imaginary) part of the wave function, then after the transformation $\Psi'_A = Q_{AB} \Psi_B$ it remains real (imaginary). For the quantized fields, the following permutation relations are added as additional constraints $[\psi_i, \bar{\psi}_j]_+ = (\gamma_4)_{ij}$, $[\bar{\psi}_i, \psi_j]_+ = -(\gamma_4)_{ij}$, $[\psi_i, \psi_j]_+ = 0$, $\bar{\psi}_i, [\bar{\psi}_j]_+ = 0$. We describe the structure of symmetry transformations for the cases of 1, 2, 3, and 4 quantized Dirac fields, massive and massless, specifying them to Majorana case.

Keywords: quantized dirac fields, majorana fields, lagrangian formalism, internal symmetry.

Мы продолжаем исследование внутренней симметрии многокомпонентных полей Майораны, которые могут быть связаны с одним, двумя, тремя и четырьмя полями Дирака. Случай классических полей был изучен в предыдущей работе. Согласно определению, внутренние симметрии должны удовлетворять ряду требований: соответствующие преобразования должны сохранять форму уравнения, это приводит к ограничениям $[Q, \Gamma_\mu]_- = 0$ в массовом случае, а также к $[Q, \Gamma_\mu]_- = 0$ и $[Q, \Gamma_\mu]_+ = 0$ для безмассовых полей; лагранжиан должен быть инвариантным, что приводит к ограничению $Q^+ \eta Q = \eta$; преобразования не должны нарушать майорановский характер полей, т. е. эти преобразования должны удовлетворять условию: если Ψ_A – вещественная (мнимая) часть волновой функции, то и $\Psi'_A = Q_{AB} \Psi_B$ – также вещественная (мнимая) часть. Для квантованных полей в качестве дополнительных ограничений добавляются следующие перестановочные соотношения $[\psi_i, \bar{\psi}_j]_+ = (\gamma_4)_{ij}$, $[\bar{\psi}_i, \psi_j]_+ = -(\gamma_4)_{ij}$, $[\psi_i, \psi_j]_+ = 0$, $\bar{\psi}_i, [\bar{\psi}_j]_+ = 0$. Мы описываем структуру преобразований симметрии для случаев 1, 2, 3 и 4 квантованных полей Дирака, массивных и безмассовых, уточнив их для случая Майораны.

Ключевые слова: квантованные дираковские поля, майорановские поля, лагранжевы формализм, внутренняя симметрия.

Introduction. We continue the investigation of the internal symmetry of the multi-component Majorana fields, which can be associated with one, two, three and four Dirac fields (see in [1], [2]). The case of the classical fields was studied in the previous paper (see [1], [2] and the list of reference therein).

In the quantized theory for the Dirac fields, in addition to bispinor variable ψ they introduce Dirac conjugate bispinor $\bar{\psi} = \psi^+ \gamma_4$. The anticommutators for operator variables ψ and ψ^+ take the form [3]

$$[\psi'_i, \psi'^{j+}]_+ = \delta_{ij}, [\psi'_i, \psi'_j]_+ = 0, [\psi'^{i+}, \psi'^{j+}]_+ = 0. \quad (1)$$

Anticommutators. In these formulas the Dirac matrices γ'_μ are taken as follows

$$\gamma'_1 = \begin{vmatrix} & & -i \\ & -i & \\ i & & \end{vmatrix}, \quad \gamma'_2 = \begin{vmatrix} & & -1 \\ & 1 & \\ -1 & & \end{vmatrix}, \quad \gamma'_3 = \begin{vmatrix} & & -i \\ & i & \\ i & & \end{vmatrix}, \quad \gamma'_4 = \begin{vmatrix} & & 1 \\ & 1 & \\ & & -1 \\ & & & -1 \end{vmatrix},$$

which can be translated to Majorana form by means of the similarity transformation

$$\gamma_\mu = S\gamma'_\mu S^{-1}, \quad S = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 0 & -1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ -i & 0 & 0 & -i \\ 0 & -i & i & 0 \end{vmatrix}, \quad S^{-1} = S^+ = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} 0 & 1 & i & 0 \\ -1 & 0 & 0 & i \\ -1 & 0 & 0 & -i \\ 0 & -1 & i & 0 \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Let us transform anticommutators (1) to Majorana basis. Starting with definitions

$$\psi = (\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4), \quad \psi' = (\psi'_1, \psi'_2, \psi'_3, \psi'_4),$$

we get $\psi_1 = -\psi'_2 - \psi'_3$, $\psi_2 = \psi'_1 - \psi'_4$, $\psi_3 = -i\psi'_1 - i\psi'_4$, $\psi_4 = -i\psi'_2 + i\psi'_3$, further we verify that the above relations (1) preserve their form for the new components ψ :

$$[\psi_i, \psi_j^+]_+ = \delta_{ij}, \quad [\psi_i, \psi_j]_+ = [\psi_i^+, \psi_j^+]_+ = 0. \quad (3)$$

Now let us introduce the Dirac conjugate variables in Majorana basis

$$\bar{\psi} = \psi^+ \gamma_4 = i(\psi_4^+, -\psi_3^+, \psi_2^+, -\psi_1^+),$$

and find the commutation relations for the variables $\psi, \bar{\psi}$:

$$[\psi_i, \bar{\psi}_j]_+ = (\gamma_4)_{ij}, \quad [\bar{\psi}_i, \psi_j]_+ = -(\gamma_4)_{ij}, \quad [\psi_i, \psi_j]_+ = 0, \quad [\bar{\psi}_i, \bar{\psi}_j]_+ = 0. \quad (4)$$

It is evident that these relations are invariant under the choice of basis in bispinor space.

Technical details. Let us elaborate a special method to work with multicomponent columns. Let A and B be some matrices of dimension $n \times 1$. It is convenient to introduce a special operation over such matrices $\{A, B^T\}_\oplus = A \otimes B^T + B^T \otimes A$, where symbol T designates the transposition of the matrix. This operation has several helpful properties:

$$\{A, (B_1 + B_2)^T\}_\oplus = \{A, B_1^T\}_\oplus + \{A, B_2^T\}_\oplus, \quad (5)$$

$$(\{A, B^T\}_\oplus)^T = (A \otimes B^T + B^T \otimes A)^T = A^T \otimes B + B \otimes A^T = \{B, A^T\}_\oplus. \quad (6)$$

Let x be a certain matrix of dimension $n \times n$, then

$$\{A, (xB)^T\}_\oplus = \{A, B^T\}_\oplus x^T. \quad (7)$$

Let the matrices A and B contain two blocks

$$A = \begin{vmatrix} a_1 \\ a_2 \end{vmatrix}, \quad B^T = \begin{vmatrix} b_1^T & b_2^T \end{vmatrix},$$

then in accordance with the definitions we derive the identity

$$\left\{ \begin{vmatrix} a_1 \\ a_2 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} b_1^T & b_2^T \end{vmatrix} \right\}_\oplus = \begin{vmatrix} \{a_1, b_1^T\}_\oplus & \{a_1, b_2^T\}_\oplus \\ \{a_2, b_1^T\}_\oplus & \{a_2, b_2^T\}_\oplus \end{vmatrix}. \quad (8)$$

One Dirac Quantized Field. Let us consider one Dirac quantized field in Majorana basis

$$(\Gamma_\mu \partial_\mu + m)\Psi' = 0, \quad \Gamma_\mu = I_2 \otimes \gamma_\mu, \quad \Psi' = (\psi^r, \psi^i). \quad (9)$$

Further we will use the 8-component variable (adopted to quantum field theory) $\Psi = (\psi, \bar{\psi})$. The transition from Ψ to Ψ' is reached by means of the unitary transformation

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} I_4 & I_4 \\ \gamma_2 & -\gamma_4 \end{vmatrix}, \quad U^{-1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} I_4 & \gamma_4 \\ I_4 & -\gamma_4 \end{vmatrix}, \quad \Psi = U\Psi' = \begin{vmatrix} \psi \\ \gamma_4 \psi^* \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \psi \\ \bar{\psi} \end{vmatrix}. \quad (10)$$

We can identify the variables Ψ, Ψ^T with block variables in the above quantities A, B^T . Then we get

$$\{\Psi, \Psi^T\}_\oplus = \left\{ \begin{vmatrix} \psi \\ \bar{\psi} \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} \psi^T & \bar{\psi}^T \end{vmatrix} \right\}_\oplus = \begin{vmatrix} \{\psi, \psi^T\}_\oplus & \{\psi, \bar{\psi}^T\}_\oplus \\ \{\bar{\psi}, \psi^T\}_\oplus & \{\bar{\psi}, \bar{\psi}^T\}_\oplus \end{vmatrix}. \quad (11)$$

According to previous Section, the anticommutation relations (4) hold. Let us specify them for the quantities from (11). For $\{\psi, \bar{\psi}^T\}_\oplus$, taking in mind (1), we get $\{\psi, \bar{\psi}^T\}_\oplus = \gamma_4$. Similarly, we find

$$\{\psi, \psi^T\}_\oplus = \{\bar{\psi}, \bar{\psi}^T\}_\oplus = 0, \quad \{\bar{\psi}, \psi^T\}_\oplus = (\{\psi, \bar{\psi}^T\}_\oplus)^T = (\gamma_4)^T = -\gamma_4.$$

These four relations can be presented in the shorter form as follows

$$\{\Psi, \Psi^T\}_\oplus = \begin{vmatrix} 0 & \gamma_4 \\ -\gamma_4 & 0 \end{vmatrix} \Rightarrow \{\Psi, \Psi^T\}_\oplus = i\sigma_2 \otimes \gamma_4; \quad (12)$$

it contains four anticommutators in 8-dimensional form.

This formalism can be extended to any number of the Dirac fields. Let n Dirac fields be given

$$(\gamma_\mu \partial_\mu + m)\psi_1 = 0, \quad (\gamma_\mu \partial_\mu + m)\psi_2 = 0, \quad (\gamma_\mu \partial_\mu + m)\psi_n = 0. \quad (13)$$

For system (13) in Majorana basis, we have $2n$ -component variable Ψ with the (column) structure $\Psi = (\psi^r, \psi^i)$, where the column $\psi^r = (\psi_1^r, \psi_2^r, \dots, \psi_n^r)$ is real, and the column $\psi^i = (\psi_1^i, \psi_2^i, \dots, \psi_n^i)$ is imaginary. The $2n$ -component function takes the form $\Psi = (\psi, \bar{\psi})$ where $\psi = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n)$, $\bar{\psi} = (\bar{\psi}_1, \bar{\psi}_2, \dots, \bar{\psi}_n)$. For this generalized case, the commutative relations are written as follows (the indices α, β numerate n fields)

$$[\psi_{i\alpha}, \bar{\psi}_{j\beta}]_+ = \delta_{\alpha\beta} (\gamma_4)_{ij}, \quad [\bar{\psi}_{i\alpha}, \psi_{j\beta}]_+ = -\delta_{\alpha\beta} (\gamma_4)_{ij}, \quad [\psi_{i\alpha}, \psi_{j\beta}]_+ = [\bar{\psi}_{i\alpha}, \bar{\psi}_{j\beta}]_+ = 0. \quad (14)$$

By analogy with the case of one Dirac equation, we derive

$$\{\psi, \bar{\psi}^T\}_\oplus = I_n \otimes \gamma_4, \quad \{\bar{\psi}, \psi^T\}_\oplus = -I_n \otimes \gamma_4, \quad \{\psi, \psi^T\}_\oplus = 0, \quad \{\bar{\psi}, \bar{\psi}^T\}_\oplus = 0. \quad (15)$$

These four relations can be joint into the following one

$$\{\Psi, \Psi^T\}_\oplus = i\sigma_2 \otimes (I_n \otimes \gamma_2). \quad (16)$$

Symmetries for n Dirac field. Let us consider infinitesimal 1-parametric transformation over the field

$$\Psi' = (1 + \omega J)\Psi, \quad (17)$$

where J is any generator of internal symmetry. Let us examine the behavior of the anti-commutative relations under this transformation

We start with the relation

$$\{\Psi', \Psi'^T\}_\oplus = (1 + \omega J)\Psi \otimes \Psi^T (1 + \omega J^T) + \Psi^T (1 + \omega J^T) \otimes (1 + \omega J)\Psi; \quad (18)$$

after transforming the first and the second summands, preserving the terms of the first order in ω :

$$(1 + \omega J)\Psi \otimes \Psi^T (1 + \omega J^T) = \Psi \otimes \Psi^T + \omega \Psi \otimes \Psi^T J^T + \omega J \Psi \otimes \Psi^T,$$

$$\Psi^T (1 + \omega J^T) \otimes (1 + \omega J)\Psi = \Psi^T \otimes \Psi + \omega \Psi^T \otimes J \Psi + \omega \Psi^T J^T \otimes \Psi,$$

whence for (18), we obtain

$$\{\Psi', \Psi'^T\}_\oplus = \{\Psi, \Psi^T\}_\oplus + \omega \{\Psi, (J\Psi)^T\}_\oplus + \omega \{\Psi^T, (J\Psi)\}_\oplus \quad (19)$$

We should impose the constraint on symmetry generator J $\omega \{\Psi, (J\Psi)^T\}_\oplus + \omega \{\Psi^T, (J\Psi)\}_\oplus = 0$, whence taking into account (6) we derive

$$\{\Psi, (J\Psi)^T\}_\oplus = -(\{\Psi^T, (J\Psi)\}_\oplus)^T, \quad (20)$$

in the following we will call the last as the anti-symmetry condition.

Let us examine the consequences of (20). To this end, let us use the block form of internal symmetry generator in the basis $(\psi, \bar{\psi})$

$$J = \begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix}, \quad (21)$$

where

$$a = \begin{vmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{vmatrix}, \quad b = \begin{vmatrix} b_{11} & \dots & b_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & \dots & b_{nn} \end{vmatrix}, \quad c = \begin{vmatrix} c_{11} & \dots & c_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ c_{n1} & \dots & c_{nn} \end{vmatrix}, \quad d = \begin{vmatrix} d_{11} & \dots & d_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & \dots & d_{nn} \end{vmatrix},$$

the blocks $a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}$ have dimension 4×4 . Let us calculate the quantities

$$J\Psi = \begin{vmatrix} a\psi + b\bar{\psi} \\ c\psi + d\bar{\psi} \end{vmatrix}, (J\Psi)^T = \left| (a\psi)^T + (b\bar{\psi})^T, (c\psi)^T + (d\bar{\psi})^T \right|,$$

$$\{\Psi, (J\Psi)^T\}_\oplus = \left\{ \begin{vmatrix} \psi \\ \bar{\psi} \end{vmatrix}, \left| (a\psi)^T + (b\bar{\psi})^T, (c\psi)^T + (d\bar{\psi})^T \right| \right\}_\oplus.$$

First, let us detail the term $\{\psi, (b\bar{\psi})^T\}_\oplus$: $\{\psi, (b\bar{\psi})^T\}_\oplus = \psi \otimes (b\bar{\psi})^T + (b\bar{\psi})^T \otimes \psi$; whence taking in mind the identity

$$b\bar{\psi} = \begin{vmatrix} \Sigma b_{1i} \bar{\psi}_i \\ \vdots \\ \Sigma b_{ni} \bar{\psi}_i \end{vmatrix}, (b\bar{\psi})^T = \left| (\Sigma b_{1i} \bar{\psi}_i)^T \quad \dots \quad (\Sigma b_{ni} \bar{\psi}_i)^T \right|$$

we obtain

$$\{\psi, (b\bar{\psi})^T\}_\oplus = \left\{ \begin{vmatrix} \psi_1 \\ \vdots \\ \psi_n \end{vmatrix}, \left| (\Sigma b_{1i} \bar{\psi}_i)^T \quad \dots \quad (\Sigma b_{ni} \bar{\psi}_i)^T \right| \right\}_\oplus = \begin{vmatrix} \{\psi_1, (\Sigma b_{1i} \bar{\psi}_i)^T\}_\oplus & \dots & \{\psi_1, (\Sigma b_{ni} \bar{\psi}_i)^T\}_\oplus \\ \vdots & & \vdots \\ \{\psi_n, (\Sigma b_{1i} \bar{\psi}_i)^T\}_\oplus & \dots & \{\psi_n, (\Sigma b_{ni} \bar{\psi}_i)^T\}_\oplus \end{vmatrix}.$$

Now let us detail the term

$$\{\psi_1, (\Sigma b_{1i} \bar{\psi}_i)^T\}_\oplus = \{\psi_1, (b_{11} \bar{\psi}_1)^T\}_\oplus + \{\psi_1, (b_{12} \bar{\psi}_2)^T\}_\oplus + \dots + \{\psi_1, (b_{1n} \bar{\psi}_n)^T\}_\oplus, \quad (22)$$

by direct calculation we can prove that for each bispinor the identity holds (where x is certain matrix of dimension 4×4)

$$\{\psi, (x\bar{\psi})^T\}_\oplus = \{\psi, \bar{\psi}^T\}_\oplus x^T.$$

Taking into account the last identity and the property from (22) we derive

$$\{\psi, (b\bar{\psi})^T\}_\oplus = \begin{vmatrix} \{\psi_1, \bar{\psi}_1\}_\oplus b_{11}^T & \dots & \{\psi_1, \bar{\psi}_1\}_\oplus b_{n1}^T \\ \vdots & & \vdots \\ \{\psi_n, \bar{\psi}_n\}_\oplus b_{1n}^T & \dots & \{\psi_n, \bar{\psi}_n\}_\oplus b_{nn}^T \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \{\psi_1, \bar{\psi}_1\}_+ & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & \{\psi_n, \bar{\psi}_n\}_+ \end{vmatrix} \begin{vmatrix} b_{11} & \dots & b_{n1} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{1n} & \dots & b_{nn} \end{vmatrix} = \{\psi, \bar{\psi}\}_\oplus b^T.$$

Similarly, we can derive the identities (where symbol y designates blocks from (21)):

$$\{\bar{\psi}, (y\psi)^T\}_\oplus = -\{\bar{\psi}, (y\psi)^T\}_\oplus = \{\psi, \bar{\psi}^T\}_\oplus y^T, \quad \{\psi, (y\psi)^T\}_\oplus = \{\bar{\psi}, (y\bar{\psi})^T\}_\oplus = 0, \quad (23)$$

Therefore, expression $\{\Psi, (J\Psi)^T\}_\oplus$ is transformed to

$$\{\Psi, (J\Psi)^T\}_\oplus = \begin{vmatrix} 0 & \{\psi, \bar{\psi}^T\}_\oplus \\ -\{\psi, \bar{\psi}^T\}_\oplus & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a^T & c^T \\ b^T & d^T \end{vmatrix} = \{\Psi, \Psi^T\}_\oplus J^T. \quad (24)$$

Whence we derive yet another identity $(\{\Psi, (J\Psi)^T\}_\oplus)^T = (\{\Psi, \Psi^T\}_\oplus J^T)^T = J(\{\Psi, \Psi^T\}_\oplus)^T$.

Thus, the symmetry requirement for commutative relations (20) can be presented in the form

$$\{\Psi, \Psi^T\}_\oplus J^T = -J(\{\Psi, \Psi^T\}_\oplus)^T, \quad (25)$$

which with (16) in mind leads to the restriction on symmetry generator

$$i\sigma_2 \otimes (I_n \otimes \gamma_4) J^T = -J i\sigma_2 \otimes (I_n \otimes \gamma_4). \quad (26)$$

It should be noted that having used the property (7), one can present expression (20) in the form (25).

Let us recall that in the basis (ψ^r, ψ^i) for system (13), the general structure of the symmetry generators should be as follows

$$J = \begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix} \otimes I_4, \quad (27)$$

where a, b, c, d stand for the blocks of dimension $n \times n$ (they differ from blocks in (21)). Let us translate (27) to the basis $(\psi, \bar{\psi})$, $\bar{J} = UJU^{-1}$, with the help of the matrix

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} I_n \otimes I_4 & I_n \otimes I_4 \\ I_n \otimes \gamma_4 & -I_n \otimes \gamma_4 \end{vmatrix}, \quad U^{-1} = U^+ = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{vmatrix} I_n \otimes I_4 & I_n \otimes \gamma_4 \\ I_n \otimes I_4 & -I_n \otimes \gamma_4 \end{vmatrix}. \quad (28)$$

Taking in mind the identities

$$UJ = \begin{vmatrix} I_n \otimes I_4 & I_n \otimes I_4 \\ I_n \otimes \gamma_4 & -I_n \otimes \gamma_4 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a \otimes I_4 & b \otimes I_4 \\ c \otimes I_4 & d \otimes I_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (a+c) \otimes I_4 & (b+d) \otimes I_4 \\ (a-c) \otimes \gamma_4 & (b-d) \otimes \gamma_4 \end{vmatrix},$$

$$UJU^{-1} = \begin{vmatrix} (a+c) \otimes I_4 & (b+d) \otimes I_4 \\ (a-c) \otimes \gamma_4 & (b-d) \otimes \gamma_4 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} I_n \otimes I_4 & I_n \otimes \gamma_4 \\ I_n \otimes I_4 & -I_n \otimes \gamma_4 \end{vmatrix},$$

we find the structure of the generator \bar{J} :

$$\bar{J} = \begin{vmatrix} \alpha \otimes I_4 & \beta \otimes \gamma_4 \\ \sigma \otimes \gamma_4 & \rho \otimes I_4 \end{vmatrix}, \quad (29)$$

where the notations are used

$$\alpha = a+b+c+d, \quad \beta = a+c-b-d, \quad \sigma = a-c+b-d, \quad \rho = a-c-b+d. \quad (30)$$

We substitute this generator (29) into (26); in this way with the use of identities

$$i\sigma_2 \otimes (I_n \otimes \gamma_4) \bar{J}^T = \begin{vmatrix} 0 & I_n \otimes \gamma_4 \\ -I_n \otimes \gamma_4 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \alpha^T \otimes I_4 & -\sigma^T \otimes \gamma_4 \\ -\beta^T \otimes \gamma_4 & \rho^T \otimes I_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\beta^T \otimes I_4 & \rho^T \otimes \gamma_4 \\ -\alpha^T \otimes \gamma_4 & \sigma^T \otimes I_4 \end{vmatrix},$$

$$\bar{J} i\sigma_2 \otimes (I_n \otimes \gamma_4) = \begin{vmatrix} \alpha \otimes I_4 & \beta \otimes \gamma_4 \\ \sigma \otimes \gamma_4 & \rho \otimes I_4 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 & I_n \otimes \gamma_4 \\ -I_n \otimes \gamma_4 & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\beta \otimes I_4 & \alpha \otimes \gamma_4 \\ -\rho \otimes \gamma_4 & \sigma \otimes I_4 \end{vmatrix},$$

we derive

$$\begin{vmatrix} -\beta \otimes I_4 & \alpha \otimes \gamma_4 \\ -\rho \otimes \gamma_4 & \sigma \otimes I_4 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} -\beta^T \otimes I_4 & \rho^T \otimes \gamma_4 \\ -\alpha^T \otimes \gamma_4 & \sigma \otimes I_4 \end{vmatrix}.$$

Whence we obtain the following restrictions on the blocks $\alpha, \beta, \rho, \sigma$:

$$\beta = -\beta^T, \quad \alpha = -\rho^T, \quad \rho = -\alpha^T, \quad \sigma = -\sigma^T. \quad (31)$$

Let us substitute the expression from (30) into (31):

$$a+c-b-d = -a^T - c^T + b^T + d^T, \quad a-c+b-d = -a^T + c^T - b^T + d^T,$$

$$a-c-b+d = -a^T - c^T - b^T - d^T, \quad a+c+b+d = -a^T + c^T + b^T - d^T,$$

whence it follows

$$a-d = -a^T + d^T, \quad c-b = -c^T + b^T, \quad a+d = -a^T - d^T, \quad -c-b = -c^T - b^T,$$

that is

$$a = -a^T, \quad d = -d^T, \quad c = b^T. \quad (32)$$

Therefore, the structure of the symmetry generator in the basis (ψ^r, ψ^i) should be as follows

$$J = \begin{vmatrix} a & \\ & d \end{vmatrix} \otimes I_4 + \begin{vmatrix} & b \\ b^T & \end{vmatrix} \otimes I_4. \quad (33)$$

With this in mind, for generator \bar{J} we obtain

$$\bar{J} = \begin{vmatrix} \alpha \otimes I_4 & \beta \otimes \gamma_4 \\ \sigma \otimes \gamma_4 & -\alpha^T \otimes I_4 \end{vmatrix}. \quad (34)$$

Thus, we have studied internal symmetries for 1, 2, 3, and 4 Dirac quantized fields. The needed generators in the basis (ψ^r, ψ^i) may have the structure of two types:

$$\omega_D J_D \Psi = \omega_D \begin{vmatrix} D_1 & \\ & D_2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \psi^r \\ \psi^i \end{vmatrix}, \quad \omega_A J_A \Psi = \omega_A \begin{vmatrix} & A_1 \\ A_2 & \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \psi^r \\ \psi^i \end{vmatrix}, \quad (35)$$

where the blocks D_k are real, and A_k are imaginary; the parameters ω_D and ω_A are imaginary ($k=1,2$). All the generators are Hermitian, which yields

$$D_k^+ = ((D_k)^T)^* = -D_k^T = D_k, \quad A_k^+ = ((A_k)^T)^* = A_k^T = A_k, \quad l=1,2. \quad (36)$$

All the transformations with such properties preserve the form of the commutation relations (4). Expressions (35) and (36) agree with the needed symmetry conditions for classical field.

Thus, we conclude that all symmetry transformations for 1, 2, 3, 4 massive field preserve their validness in a quantized case.

Massless quantized fields. Let us examine invariance properties of the commutation relations for massless fields. In addition to generators of type (27) in the basis (ψ^r, ψ^i) , in massless case we have generators with different structure (compare with (27)):

$$L = \begin{vmatrix} a & b \\ c & d \end{vmatrix} \otimes \gamma_5, \quad (37)$$

where a, b, c, d stand for the blocks of dimension $n \times n$ (they differ from the blocks (21)).

Let us transform relations (37) to basis $(\psi, \bar{\psi})$, with the help of matrix (28): $\bar{L} = ULU^{-1}$. Taking into account the identities

$$UL = \begin{vmatrix} I_n \otimes I_4 & I_n \otimes I_4 \\ I_n \otimes \gamma_4 & -I_n \otimes \gamma_4 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a \otimes \gamma_5 & b \otimes \gamma_5 \\ c \otimes \gamma_5 & d \otimes \gamma_5 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (a+c) \otimes \gamma_5 & (b+d) \otimes \gamma_5 \\ (a-c) \otimes \gamma_4 \gamma_5 & (b-d) \otimes \gamma_4 \gamma_5 \end{vmatrix},$$

$$ULU^{-1} = \begin{vmatrix} (a+c) \otimes \gamma_5 & (b+d) \otimes \gamma_5 \\ (a-c) \otimes \gamma_4 \gamma_5 & (b-d) \otimes \gamma_4 \gamma_5 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_n \otimes I_4 & I_n \otimes \gamma_4 \\ I_n \otimes I_4 & -I_n \otimes \gamma_4 \end{vmatrix},$$

we find the structure of generators \bar{L} :

$$\bar{L} = \begin{vmatrix} \alpha \otimes \gamma_5 & \beta \otimes \gamma_4 \gamma_5 \\ \sigma \otimes \gamma_4 \gamma_5 & \rho \otimes \gamma_5 \end{vmatrix}, \quad (38)$$

where the notations are used

$$\alpha = a+b+c+d, \quad \beta = -a-c+b+d, \quad \sigma = a-c+b-d, \quad \rho = -a+c+b-d. \quad (39)$$

Substituting (38) – (39) into (26), we get

$$\begin{vmatrix} -\beta \otimes I_4 & \alpha \otimes \gamma_4 \\ -\rho \otimes \gamma_4 & \sigma \otimes I_4 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} -\beta^T \otimes I_4 & \rho^T \otimes \gamma_4 \\ -\alpha^T \otimes \gamma_4 & \sigma \otimes I_4 \end{vmatrix},$$

whence follow the restrictions on the blocks $\alpha, \beta, \rho, \sigma$:

$$\beta = \beta^T, \quad \alpha = -\rho^T, \quad \rho = -\alpha^T, \quad \sigma = \sigma^T. \quad (40)$$

Substituting (40) into (39), we obtain the system of equations

$$\begin{aligned} -a-c+b+d &= -a^T - c^T + b^T + d^T, & -a+c+b-d &= -a^T - c^T - b^T - d^T, \\ -a-c-b-d &= -a^T + c^T + b^T - d^T, & +a-c+b-d &= +a^T - c^T + b^T - d^T, \end{aligned}$$

whence it follows

$$a = a^T, \quad d = d^T, \quad c = -b^T. \quad (41)$$

Thus, the structure of the generators for symmetry transformations in the basis (ψ^r, ψ^i) is given by the formula

$$L = \begin{vmatrix} a & \\ & d \end{vmatrix} \otimes \gamma_5 + \begin{vmatrix} & b \\ -b^T & \end{vmatrix} \otimes \gamma_5, \quad (42)$$

recall that a, d obey the constraints (42).

Previously it was shown that all appropriate generators of type L in the basis (ψ^r, ψ^i) may be of two types:

$$D, \quad L^d = \begin{vmatrix} d_1 & \\ & d_2 \end{vmatrix} \otimes \gamma_5 \quad A, \quad L^a = \begin{vmatrix} & a_1 \\ & a_2 \end{vmatrix} \otimes \gamma_5.$$

The Majorana condition assumes that generators of type D are to have imaginary blocks m and the generators of type A are to have real blocks. Because all generators are Hermitian, we have the properties

$$d^+ = ((d)^T)^* = -d^T = d, \quad a^+ = ((a)^T)^* = a^T = a.$$

The two last relation contradict to (42), for this reason we conclude that for quantized massless fields only the generators of type J provide us with symmetry transformation, exactly as in massive case.

Conclusion. In the present paper, the problem of describing the internal symmetry transformations for quantized Dirac fields has been studied. We started with the matrix equation $(\Gamma_\mu \partial_\mu + m)\psi = 0$, and introduced the concept of the internal symmetry. These symmetries should preserve the form of the basic equation, which is equivalent to the commutation relation $[Q, \Gamma_\mu]_- = 0$. The relevant Lagrangian should be invariant under the internal symmetry transformation. This requirement leads to the restriction $Q^+ \eta Q = \eta$, where η stands for the bilinear form matrix. We impose one additional requirement on symmetry transformations, such transformations should preserve the Majorana nature of the fields.

The situation for massless case is substantially different, $\Gamma_\mu \partial_\mu \psi = 0$. The requirement of invariance of this equation and corresponding Lagrangian leads to two alternative restrictions $[Q_1, \Gamma_\mu]_- = 0$ or $[Q_2, \Gamma_\mu]_+ = 0$. The Lagrangian invariance with respect to internal symmetry transformation for massless case coincide with that for massive case, $Q^+ \eta Q = \eta$.

It is proved that in massive and massless cases the internal symmetry transformations are determined by the same generators, which coincide with the generators established when studying the classical fields.

The authors are grateful to Professor V.A. Pletyuchov for encouraging help and advice.

References

1. Andrusevich, P. P. Dirac like equations and generalized Majorana fields, symmetry aspects / P. P. Andrusevich // Nonlinear Dynamics and Applications : proceedings of the twenty eight Anniversary Seminar NPC-S-2022, Minsk, June 18–21, 2022 = Нелинейная динамика и приложения : труды XXVIII Международного семинара, Минск, 21–21 июня 2022 г. / редкол.: В. А. Шапоров [и др.] ; под ред. В. А. Шапорова, А. Г. Трифонова ; Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – «Сосны» НАН Беларуси. – Минск : Право и экономика, 2022. – 486 с.
2. Andrusevich, P. P. Dirac like equations and generalized Majorana fields, internal symmetry / P. P. Andrusevich, V. M. Red'kov // Problems of Physics, Mathematics and Techniques. – 2024. – P. 7–15.
3. Kushnirenko, A. N. Introduction to quantum field theory / A. N. Kushnirenko. – Moscow, 1971. – 304 p.

¹Брестский государственный
колледж связи

²Институт физики имени Б.И. Степанова
НАН Беларуси

Поступила в редакцию 20.12.2023

Optimization of parameters for double-beam laser cleaving of silicate glasses along curved paths

YU.V. NIKITYUK¹, A.N. SERDYUKOV¹, A.N. KUPO¹, A.S. RUDENKOV¹, I.YU. AUSHEV²

This study develops regression and neural network models of double-beam laser cleaving of silicate glasses following curved paths. These models have been obtained by means of numerical experiment using the central composite design. The numerical experiment involved variable factors such as laser processing velocity, laser beam powers with wavelengths of 10,6 μm and 1,06 μm , and geometrical parameters of the elliptical laser beam with a wavelength of 10,6 μm . The values of maximum temperatures and maximum thermoelastic tensile stresses within the double-beam treatment zone were determined as responses, the calculation of which was performed via the finite element method using APDL (Ansys Parametric Design Language). TensorFlow was used to establish effective architectures for artificial neural networks in order to determine the maximum temperature and maximum thermoelastic tensile stresses in the laser-treated area. The comparison between the neural network and the regression models in the framework of double-beam laser cleaving revealed that artificial neural networks are more effective in predicting parameters related to double-beam cleaving of silicate glasses along curved paths. The genetic algorithm was employed to conduct multicriteria optimization of laser curved cutting parameters.

Keywords: laser cutting, ANN, MOGA, ANSYS.

В работе при помощи численного эксперимента с использованием центрального композиционного плана получены регрессионные и нейросетевые модели процесса двулучевого лазерного раскалывания силикатных стекол по криволинейным траекториям. При реализации численного эксперимента скорость лазерной обработки, мощности лазерных пучков с длинами волн 10,6 мкм и 1,06 мкм и геометрические параметры эллиптического лазерного пучка с длиной волны 10,6 мкм были использованы в качестве варьируемых факторов. Значения максимальных температур и максимальных термоупругих напряжений растяжения в зоне двулучевой обработки определялись методом конечных элементов с использованием языка программирования APDL в качестве откликов. При помощи пакета TensorFlow были установлены эффективные архитектуры искусственных нейронных сетей для определения максимальных температур и максимальных термоупругих напряжений в зоне лазерной обработки. Сравнение нейросетевых и регрессионных моделей процесса двулучевого лазерного раскалывания показало более высокую эффективность искусственных нейронных сетей при прогнозировании параметров двулучевого раскалывания силикатных стекол по криволинейным траекториям. Проведена многокритериальная оптимизация параметров лазерной криволинейной резки с использованием генетического алгоритма.

Ключевые слова: лазерная резка, ИНН, MOGA, ANSYS.

Introduction. The extensive use of silicate glasses in industry is attributed to their properties, with cutting being the primary procedure involved in the manufacturing of glass products. Laser cleaving technology offers several notable advantages when compared to conventional cutting processes. The advancement of laser cleaving technology for brittle nonmetallic materials was achieved during the latter half of the 20th century. Meanwhile, the investigation of cutting processes for various brittle nonmetallic materials, such as silicate glasses, using laser cleaving techniques remains relevant [1]–[4].

Laser cleaving is recognized to be an option for cutting brittle nonmetallic materials along curved paths, which is an issue in many situations. The analysis of the relevant research and publications as well as our own investigations have revealed certain disadvantages of laser cleaving technology, which are responsible for poor accuracy in processing silicate glass along curved paths [5]. One of the reasons is the use of elliptical laser beams oriented tangentially to the curved motion trajectory. The use of laser beams of this particular shape provides the necessary conditions for the formation of thermoelastic stresses in the implementation of rectilinear thermal cleaving, in contrast to circular beams. At the same time, when elliptical beams are oriented tangentially to the processing line, their use for cutting along a curved contour results in the deviation of the crack from the processing line.

To eliminate undesirable deviations of laser-induced cracks from the processing line, the suggestion was made in [6]–[7] to employ supplementary exposure to laser radiation with a wavelength

of $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$. Moreover, this additional bulk heating must be carried out with a specific shift from the cutting line (see figure 1).

In Figure 1, position 1 corresponds to the laser beam with a wavelength of $10,6 \mu\text{m}$, position 2 represents the refrigerant exposure area, position 3 corresponds to the cross-section of the laser beam with a wavelength of $1,06 \mu\text{m}$

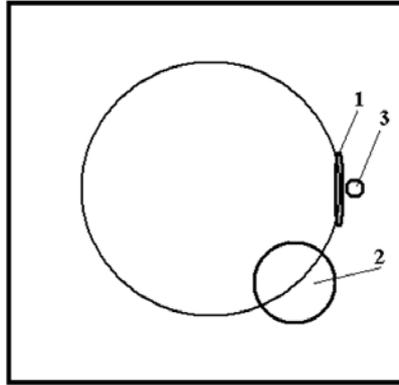


Figure 1 – Schematic depicting of the mutual arrangement of the refrigerant and laser beam exposure areas

In some cases, it is reasonable to use metamodels to optimize the parameters of laser cleaving of silicate glasses. Metamodels offer the opportunity to determine the output parameters of laser processing without performing extensive calculations, thanks to the use of regression or neural network models. Furthermore, employing genetic algorithms in metamodeling allows for the identification of the optimal values for laser cleaving parameters [8]–[16].

It is rational to further investigate the process of double-beam laser cleaving of silicate glasses along curved paths using regression and neural network models in order to ascertain the optimal modes of laser-induced crack formation.

Determination of optimal parameters for double-beam laser cleaving of silicate glasses along curved paths. Temperatures and thermoelastic stresses generated in silicate glasses during double-beam laser cleaving along curved paths were determined via the finite element method in a quasi-static formulation of the problem using APDL.

The properties of silicate glass specified in [2] were used for calculations. The displacement radius of both the centers of the elliptical beam and the refrigerant was 15 mm. The linear cutting velocity was 30 mm/s. The laser beam parameters employed in this study were as follows: the major semi-axis $A = 7 \cdot 10^{-3}$ m, the minor semi-axis $B = 1 \cdot 10^{-3}$ m for the beam with the radiation wavelength of $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ and radiation power of $P = 10$ W; the radius of the YAG-laser radiation spot $R = 1 \cdot 10^{-3}$ m and radiation power $P_0 = 40$ W. The calculations were performed for a plate with geometrical dimensions of $40 \times 20 \times 3$ mm. The model consisted of 63045 Solid 70 and Solid 185 elements used for thermal and strength analyses, respectively (see figure 2).

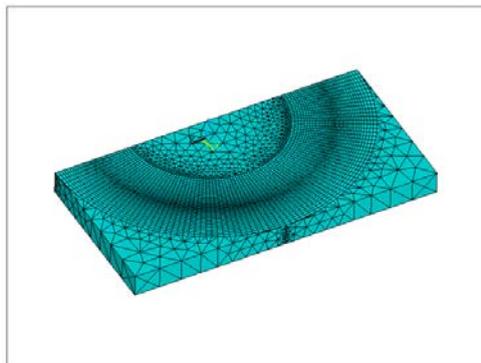


Figure 2 – Finite element model

Figures 3–4 illustrate the distributions of temperature fields and thermoelastic stress fields obtained through the finite-element modelling. Figure 4 depicts the localization of compression and tensile thermoelastic stresses within the treatment zone, which is a defining feature of laser cleaving. Here, the calculated values of maximum tensile stresses in the treatment zone, denoted as σ_r , and maximum specified temperatures, denoted as T, in the plate that underwent processing along the curved contour are equal to 34,7 MPa and 489 K, respectively, using the chosen design processing parameters.

The temperatures that do not exceed the glass transition temperature of 789 K are deemed permissible when conducting laser cleaving of silicate glass [2]. In this case, it is necessary for the values of tensile stresses σ_r to be sufficiently high, as their spatial localization and magnitude are crucial in initiating and developing laser-induced curvilinear cracks.

The numerical experiment was carried out using 27 combinations of the face-centered version of the central composite design generated in the DesignXplorer module of ANSYS WORKBENCH for five factors (P1–P5): P1 was the linear cutting velocity V, P2 was the laser power P with a radiation wavelength of $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$, P3 was the laser power P_0 with a radiation wavelength of $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$, P4 was the major semi-axis of the laser beam A with a radiation wavelength of $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$, P5 was the minor semi-axis of the beam B with a radiation wavelength of $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$.

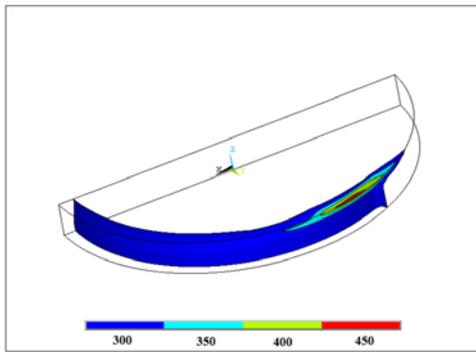


Figure 3 – Temperature distribution throughout the sample's volume, °K

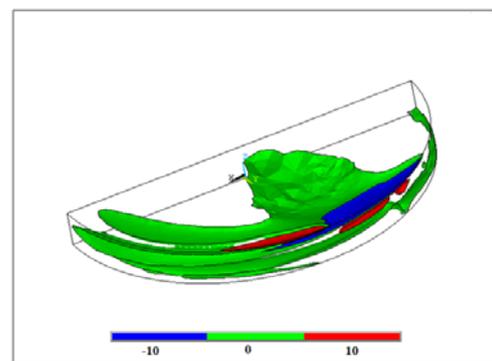


Figure 4 – Distribution of stresses σ_r throughout the sample's volume, MPa

The maximum temperature T and maximum tensile stresses σ_r in the treatment zone were determined as responses (see table 1).

Table 1 – Experimental design and calculation results

N	P1 V, m/s	P2 P, W	P3 P_0 , W	P4 A, m	P5 B, m	P6 T, K	P7 σ_r , MPa
1	0,03	20	60	0,006	0,0015	600	51,8
2	0,025	20	60	0,006	0,0015	631	62,6
3	0,035	20	60	0,006	0,0015	575	43,6
4	0,03	10	60	0,006	0,0015	454	31,3
5	0,03	30	60	0,006	0,0015	746	71,4
6	0,03	20	50	0,006	0,0015	597	49,6
7	0,03	20	70	0,006	0,0015	602	53,8
8	0,03	20	60	0,005	0,0015	637	55,8
9	0,03	20	60	0,007	0,0015	573	49,0
10	0,03	20	60	0,006	0,001	717	67,4
11	0,03	20	60	0,006	0,002	532	42,3
12	0,025	10	50	0,005	0,002	447	30,7
13	0,035	10	50	0,005	0,001	516	33,6
14	0,025	30	50	0,005	0,001	1057	117,0
15	0,035	30	50	0,005	0,002	650	49,5
16	0,025	10	70	0,005	0,001	566	51,5
17	0,035	10	70	0,005	0,002	425	25,6
18	0,025	30	70	0,005	0,002	729	75,4
19	0,035	30	70	0,005	0,001	941	88,0

End of table 1

20	0,025	10	50	0,007	0,001	507	41,1
21	0,035	10	50	0,007	0,002	398	19,8
22	0,025	30	50	0,007	0,002	645	62,4
23	0,035	30	50	0,007	0,001	814	73,9
24	0,025	10	70	0,007	0,002	427	32,7
25	0,035	10	70	0,007	0,001	479	33,3
26	0,025	30	70	0,007	0,001	912	107,4
27	0,035	30	70	0,007	0,002	591	47,1

The response functions that establish the relationship between the output parameters (T , σ_r) and the factors (V , P , P_0 , A , B) are expressed as follows:

$$Y_T = 6.55 + 6.54 \cdot 10^{-2} \cdot P - 5.14 \cdot 10^{-1} \cdot A - 5.56 \cdot 10^2 \cdot B - 2.83 \cdot 10^{-4} \cdot P^2 + 1.24 \cdot 10^5 \cdot B^2 - 3.02 \cdot 10^{-1} \cdot V \cdot P - 1.55 \cdot 10^3 \cdot V \cdot B - 1.33 \cdot P \cdot A - 7.78 \cdot P \cdot B + 1.82 \cdot 10^4 \cdot A \cdot B$$

$$T = e^{Y_T} - 1$$

$$Y_\sigma = 2.60 \cdot 10^2 - 1.43 \cdot 10^3 \cdot V + 6.03 \cdot P - 4.69 \cdot 10^4 \cdot B - 3.84 \cdot 10^{-2} \cdot P \cdot P + 8.33 \cdot 10^6 \cdot B \cdot B - 1.98 \cdot 10 \cdot V \cdot P - 4.01 \cdot 10^{-3} \cdot P \cdot P_0 - 1.03 \cdot 10^2 \cdot P \cdot A - 5.41 \cdot 10^{-2} \cdot P \cdot B + 2.04 \cdot 10^2 \cdot B \cdot P_0 - 6.27 \cdot 10^5 \cdot A \cdot B$$

$$\sigma_r = (Y_\sigma \cdot 0.225 + 1)^{\left(\frac{1}{0.225}\right)} - 1$$

Figure 5 presents the assessment of how the input parameters affect the output parameters. Both responses that occur during double-beam laser cleaving of silicate glasses along curved paths are greatly influenced by the laser power with a radiation wavelength of $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ and the size of the minor semi-axis of the laser elliptical beam B . The laser power with a radiation wavelength of $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ has a significant effect on the values of the maximum tensile stresses σ_r .

Figures 6–7 illustrate the dependences of maximum temperatures T and maximum tensile stresses σ_r in the treatment zone on the processing parameters.

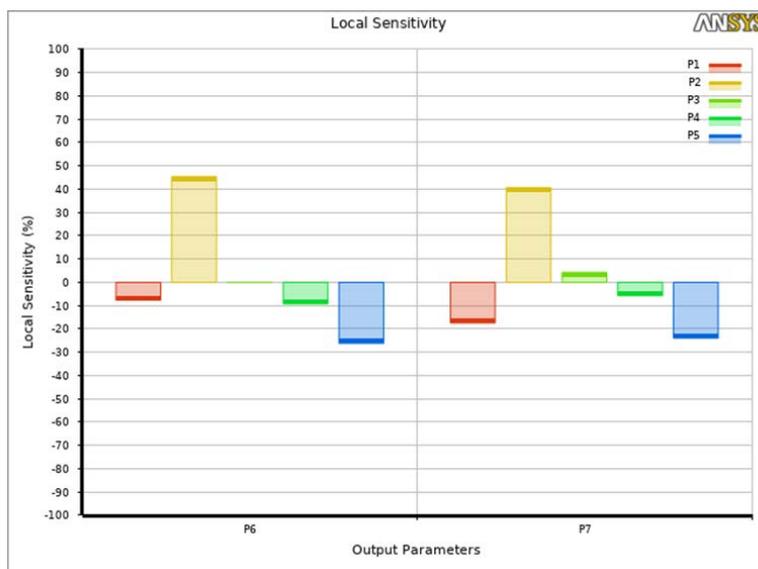


Figure 5 – Response sensitivity diagram

P1 – V , P2 – P , P3 – P_0 , P4 – A , P5 – B , P6 – T , P7 – σ_r

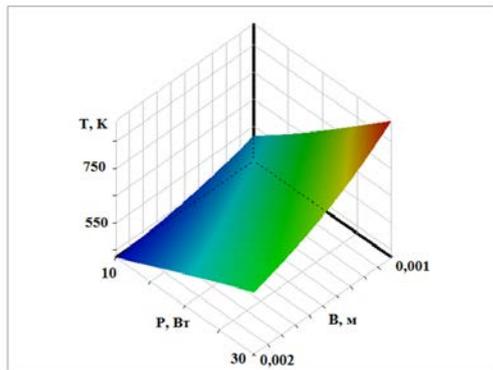


Figure 6 – Dependence of maximum temperature T , K on processing parameters $P_2 = P$, $P_5 = B$

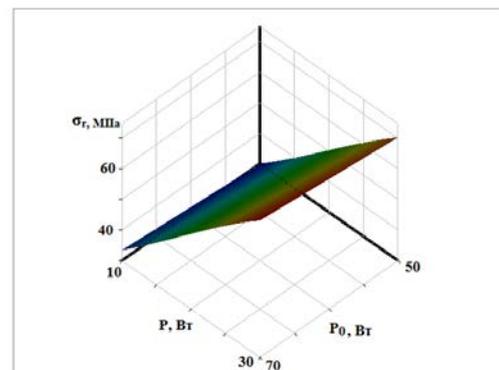


Figure 7 – Dependence of maximum stresses σ_r , MPa on processing parameters $P_2 = P$, $P_3 = P_0$

The TensorFlow library was used to construct artificial neural networks with two hidden layers, following the algorithm specified in reference [16].

The construction of neural networks was performed using the Adam optimizer, ReLU activation function, and MSE loss function. The neural network underwent training for a total of 500 epochs. Consequently, 16 artificial neural networks were created with the number of neurons in two hidden layers ranging from 5 to 20, with an interval of 5.

The dataset presented in table 2 was used to perform tests on regression and neural network models.

The neural network and regression models were evaluated using mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), mean absolute percentage error (MAPE), and determination coefficient R^2 .

Figures 8–9 show heat maps illustrating the distribution of validation errors in determining the maximal values of temperature and tensile stresses during double-beam laser cleaving of silicate glasses following curved paths. The number of neurons in the first and second hidden layers of the artificial neural network are shown by the vertical and horizontal axes, respectively. The intensity of color coding represents the extent of error: the error increases from light to dark.

Table 2 – Test dataset

N	P1 V, m/s	P2 P, W	P3 P ₀ , W	P4 A, m	P5 B, m	P6 T, K	P7 σ_r , MPa
1	0,026	20	53	0,007	0,002	527	44,70
2	0,031	27	65	0,006	0,002	605	51,60
3	0,032	15	63	0,006	0,001	605	50,00
4	0,029	16	55	0,005	0,0015	575	47,80
5	0,026	14	66	0,007	0,0015	511	44,10
6	0,031	28	56	0,005	0,002	652	53,70
7	0,032	12	58	0,005	0,0015	498	34,60
8	0,025	12	59	0,006	0,001	579	52,80
9	0,034	25	58	0,006	0,002	567	42,90
10	0,033	15	54	0,006	0,0015	514	35,60

The neural network with the architecture [5-20-10-2] demonstrated superior performance in determining the values of maximum temperatures T in the area of double-beam laser treatment, whereas the neural network with the architecture [5-15-20-2] achieved the highest accuracy in calculating the maximum tensile stresses σ_r .

Table 3 displays the estimation outcomes of both the regression and neural network models.

Table 3 – Evaluation results of regression and neural network models

Criterion	Regression models		Neural network models	
	T	σ_r	T	σ_r
RMSE	6,4 K	1,13 MPa	3,6 K	0,97 MPa
MAE	5,4 K	0,86 MPa	3,0 K	0,51 MPa
MAPE	1,0 %	1,8 %	0,5 %	1,1 %
R^2	0,9819	0,9685	0,9663	0,9771

The evaluation results of the generated neural network and regression models demonstrate a significant consistency with the outcomes obtained from the finite element computations. The neural network models have superior efficacy in predicting the parameters of double-beam laser cleaving of silicate glasses along curved paths.

The MOGA algorithm of the DesignXplorer module was used to perform multicriteria optimization of parameters for double-beam laser cleaving of silicate glasses along curved paths. The optimization procedures were conducted following the algorithm described in references [8]–[9].

The following optimization criteria were chosen: $V \rightarrow \max$, $\sigma_r \rightarrow \max$, $T \leq 789$ K. The optimization results are provided in Table 4. The values of temperatures and tensile stresses derived from the finite element calculations are presented in brackets. The maximum relative error of the results did not exceed 2 %. These results were obtained using the genetic algorithm when determining the responses.

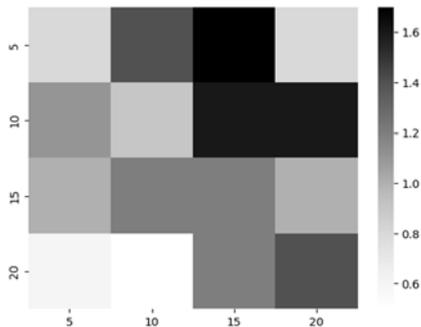


Figure 8 – Heat map of MAPE distribution when determining T

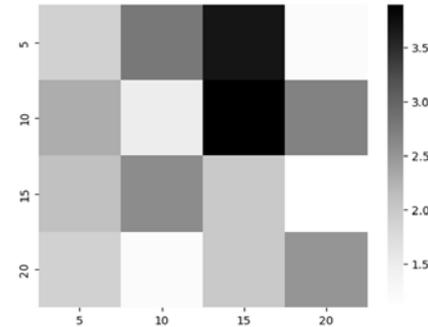


Figure 9 – Heat map of MAPE distribution when determining σ_r

Table 4 – Optimization results

P1 V, m/s	P2 P, W	P3 P ₀ , W	P4 A, m	P5 B, m	P6 T, K	P7 σ_r , MPa
0,035	27,8	65,3	0,007	0,001	787 (780)	72,8 (71,8)

Conclusion. This paper presents the development of regression and neural network models of double-beam laser cleaving of silicate glasses along curved paths. Efficient architectures of artificial neural networks were identified, the accuracy of which was found to be higher than that of regression models. Efficient parameters for double-beam laser cleaving were determined through multicriteria optimization utilizing the genetic algorithm in order to ensure the effective formation of laser-induced cracks along curved paths.

References

1. Lumley, R. M. Controlled separation of brittle materials using a laser / R. M. Lumley // Am. Ceram. Soc. Bull. – 1969. – V. 48. – P. 850–854.
2. Machulka, G. A. Laser processing of glass / G. A. Machulka. – M. : Sov. radio, 1979. – 136 p. (In Russian).
3. Nisar, S. Laser glass cutting techniques – A review / S. Nisar // Journal of laser applications. – 2013. – V. 25, № 4. – P. 042010-1–11.
4. Kondratenko, V. S. Precision cutting of glass and other brittle materials by laser-controlled thermosplitting (Review) / V. S. Kondratenko, S. A. Kudzh // Glass Ceram. – 2017. – V. 74. – P. 75–81.
5. Nikityuk, Yu. V. Physical regularities of laser thermal cleaving of silicate glasses and alumina ceramics : specialty 01.04.21 «Laser physics» : PhD thesis extended abstract / Yu. V. Nikityuk. – Minsk, 2009. – 24 p. (in Russian).
6. Shalupaev, S. V. Laser thermal cleavage of brittle nonmetallic materials along closed curvilinear contours / S. V. Shalupaev, Yu. V. Nikityuk, A. A. Sereda // Journal of Optical Technology. – 2008. – V. 75, № 2. – P. 75–78.
7. Method of cutting non-metallic materials : pat. 2 383 500 RU, MIIK C C03B 33/09 / S. V. Shalupaev, Yu. V. Nikityuk, A. A. Sereda ; applicant F. Skorina Gomel State University – № 2008117731/03. – Publ. date 04.05.2008.

8. Nikityuk, Yu. V. Optimization of parameters of laser cleaving of quartz glass / Yu. V. Nikityuk, A. N. Serdyukov, I. Y. Aushev // *Problems of Physics, Mathematics and Technology*. – 2021. – № 4 (49). – P. 21–28. – DOI : 10.54341/20778708_2021_4_49_21.
9. Nikityuk, Yu. V. Optimization of two-beam laser cleavage of silicate glass / Yu. V. Nikityuk, A. N. Serdyukov, I. Yu. Aushev // *Journal of Optical Technology*. – 2022. – V. 89, № 2. – P. 121–125. – DOI : 10.1364/JOT.89.000121.
10. Nikityuk, Yu. V. Optimization of laser splitting parameters of silicate glasses with elliptical beams in the plane of parallel surface / Yu. V. Nikityuk, A. N. Serdyukov, I. Yu. Aushev // *Vestnik of the Sukhoi State Technical University of Gomel*. – 2023. – № 3. – P. 17–27.
11. Nikityuk, Yu. V. Optimization of laser cleaving of silicate glasses with elliptical beams using fracture mechanics parameters / Yu. V. Nikityuk, I. Yu. Aushev // *Problems of Physics, Mathematics and Technics*. – 2023. – № 4 (57). – P. 36–41.
12. Nikityuk, Yu. V. Determination of the parameters of controlled laser thermal cleavage of crystalline silicon using regression and neural network models / Yu. V. Nikityuk, A. N. Serdyukov // *Crystallography Reports*. – 2023. – V. 68, № 7. – P. 195–200.
13. Nikityuk, Yu. Parametric optimization of silicate-glass-based asymmetric two-beam laser splitting / Yu. Nikityuk, A. Sereda, A. Serdyukov, S. Shalupaev, I. Aushev // *Journal of Optical Technology*. – 2023. – V. 90, is. 6. – P. 296–301.
14. Nikityuk, Yu. V. Optimization of laser cleaving of silicate glasses by elliptical beams under additional influence of hot air flow / Yu. V. Nikityuk, A. N. Serdyukov, I. Yu. Aushev // *Proceedings of F. Skorina Gomel State University*. – 2023. – № 6 (141). – P. 110–116. (In Russian).
15. Nikityuk, Y. V. Optimisation of parameters for laser cleaving of silicate glasses using U-shaped beams / Y. V. Nikityuk, A. N. Serdyukov, J. Ma, L. Wang, I. Yu. Aushev // *Vestnik of the Sukhoi State Technical University of Gomel*. – 2023. – № 4. – P. 30–39.
16. Nikityuk, Yu. V. Determination of the parameters of two-beam laser splitting of silicate glasses using regression and neural network models / Yu. V. Nikityuk, A. N. Serdyukov, I. Yu. Aushev // *Journal of the Belarusian State University. Physics*. – 2022. – № 1. – P. 35–43.

¹Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

²Университет гражданской защиты
МЧС Республики Беларусь

Поступила в редакцию 05.02.2024

Приближение Вина в ультрафиолетовой области спектра теплового излучения звёзд

О.В. НОВИКОВА, Г.Ю. ТЮМЕНКОВ

В работе проведена количественная оценка эффективности приближения Вина для теплового излучения звёзд в ультрафиолетовой области спектра. Для ряда фиксированных температур рассчитано относительное отклонение спектральной плотности Вина от планковской на границах диапазонов *NUV*, *MUV*, *FUV* и *EUV*. Для указанных диапазонов также определены относительные отклонения излучательных способностей, светимостей и блесков. Проведена оценка эффективности приближения для некоторых звёзд. **Ключевые слова:** ультрафиолетовое излучение, спектральная плотность, кривая Планка, формула Вина, относительное отклонение, светимость.

The paper provides a quantitative assessment of the effectiveness of the Wien approximation for the thermal radiation of stars in the ultraviolet region of the spectrum. For a number of fixed temperatures, the relative deviations of the Wien spectral density from the Planck one at the edges of the *NUV*, *MUV*, *FUV* and *EUV* ranges are calculated. For the same ranges, the relative deviations of emissivities, luminosities and fluxes are also determined. The efficiency of the approximation for some stars was assessed as well.

Keywords: ultraviolet radiation, spectral density, Planck curve, Wien formula, relative deviation, luminosity.

Введение. Вид непрерывных составляющих спектров электромагнитного излучения звёзд говорит о правомерности использования модели абсолютно-чёрного тела (АЧТ) для их описания [1], [2]. Как любая модель, АЧТ не является идеально точной, но она достаточно эффективна. Физическая привлекательность модели заключается в том, что единственным параметром звезды, определяющим характер излучения, является температура её поверхности T . Следовательно, законы, описывающие излучение АЧТ, можно использовать в качестве законов излучения звёзд. В этом случае функция спектральной плотности $\varepsilon(T, \lambda)$, параметризованная температурой T и длиной волны λ , часто называемая «кривой Планка», имеет вид [1], [2]

$$\varepsilon(T, \lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\frac{hc}{e^{\lambda kT}} - 1} \equiv \varepsilon_p(T, \lambda). \quad (1)$$

В (1) присутствуют физические константы: h – постоянная Планка, k – постоянная Больцмана, c – скорость света в вакууме. Численные значения этих констант общеизвестны.

В свою очередь, $\varepsilon(T, \lambda)$ имеет связь с интегральной мощностью излучения с единицы поверхности $\varepsilon(T)$, которую также часто называют излучательной способностью, вида

$$\varepsilon(T) = \int_0^{\infty} \varepsilon(T, \lambda) d\lambda = \sigma T^4. \quad (2)$$

Выражение (2) – это закон Стефана-Больцмана, где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$ – постоянная Стефана-Больцмана. Если же проинтегрировать (2) в пределах от некоторого λ_1 до некоторого λ_2 , то получится мощность излучения с единицы поверхности в выбранном диапазоне

$$\varepsilon(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(T, \lambda) d\lambda. \quad (3)$$

В дальнейшем на $\varepsilon(T)$ будем навешивать индексы диапазона и типа спектральной плотности, например, $\varepsilon_p^{MUV}(T)$ – то есть, *MUV* – диапазон и «планковская» плотность.

Исследование функции (1) на экстремум при фиксированной температуре, требующее выполнения условия

$$\left[\frac{\partial \varepsilon(T, \lambda)}{\partial \lambda} \right]_T = 0$$

приводит к координате максимума

$$\lambda_{(max)} = \frac{b}{T}. \tag{4}$$

Выражение (3) – закон «смещения Вина», где $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – постоянная Вина.

Таким образом, приведенные здесь математические соотношения (1), (2), (4) и рассматриваются в качестве законов излучения АЧТ.

Приближение Вина. Выражение (1) для функции спектральной плотности $\varepsilon(T, \lambda)$ неудобно было интегрировать аналитическими методами. В настоящее же время используются численные методы, встроенные в компьютерные технологии, например [3]. Поэтому исторически сложилось так, что формула (1) была упрощена для случая «коротких» волн. Например, для середины ультрафиолетовой (далее $УФ$) области спектра с длиной волны $\lambda = 205 \text{ нм}$ при температуре $T = 6000 \text{ К}$ показатель экспоненты в (1)

$$\frac{hc}{\lambda kT} \cong 70.$$

Предположение о правомерности утверждения о большом значении показателя и для других «коротких» волн и температур, позволяет пренебречь единицей, и (1) преобразуется к виду

$$\varepsilon(T, \lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{hc}{\lambda kT}} \equiv \varepsilon_w(T, \lambda). \tag{5}$$

Полученную формулу (5) называют *формулой Вина*, которую и надо понимать, как приближение Вина для функции спектральной плотности (1) в «коротковолновой» области спектра.

Относительное отклонение спектральных плотностей в ультрафиолетовой области спектра. Специфика различных научных дисциплин часто предполагает наличие собственных единиц измерения, различных шкал, специфической терминологии и т. д. Это касается и деления спектра электромагнитного излучения на области, диапазоны и поддиапазоны. Согласно стандарту ISO-DIS-21348 [4], ультрафиолетовую область спектра делят на диапазоны так, как это представлено в Таблице 1, и мы будем следовать этому делению. Следует заметить, что ультрафиолетовая астрономия продолжает активно развиваться, особенно в технологическом отношении [5]. И большие надежды ученых в наше время связаны с новейшей информацией, получаемой со снимков, сделанных в диапазонах $УФ$ области спектра, космическим телескопом *Хаббл* [6].

Таблица 1 – Разделение инфракрасного излучения на диапазоны

Наименование	Аббревиатура	Длины волн (нм)
Экстремальный ультрафиолетовый диапазон	<i>EUV</i>	10–121
Дальний ультрафиолетовый диапазон	<i>FUV</i>	121–200
Средний ультрафиолетовый диапазон	<i>MUV</i>	200–300
Ближний ультрафиолетовый диапазон	<i>NUV</i>	300–400

Для оценки качества приближения можно использовать относительное отклонение спектральных плотностей $\delta\varepsilon(T, \lambda)$ вида

$$\delta\varepsilon(T, \lambda) = \frac{\varepsilon_p(T, \lambda) - \varepsilon_w(T, \lambda)}{\varepsilon_p(T, \lambda)}, \tag{6}$$

которое характеризует близость расположения приближенной «виновской» кривой к точной «планковской».

Ниже в таблице 2 приведены значения $\delta\varepsilon(T, \lambda)$ для ряда температур, совпадающих либо близких к границам спектральных классов, и для граничных длин волн диапазонов из таблицы 1. При расчётах на основе формул (6), (1) и (5) использовалась система компьютерной алгебры Wolfram Mathematica [7], которая была применена и при последующих вычислениях.

Таблица 2 – Относительное отклонение спектральных плотностей $\delta\varepsilon(T, \lambda)$ на границах диапазонов

$\delta\varepsilon(T, \lambda)$ \ $\lambda, \text{нм}$	10	121	200	300	400
$\delta\varepsilon(2000 \text{ K}, \lambda)$	0,0000	$1,5123 \cdot 10^{-26}$	$2,0320 \cdot 10^{-16}$	$3,8538 \cdot 10^{-11}$	$1,5468 \cdot 10^{-8}$
$\delta\varepsilon(5000 \text{ K}, \lambda)$	0,0000	$4,6974 \cdot 10^{-11}$	$5,6434 \cdot 10^{-7}$	0,0001	0,0008
$\delta\varepsilon(10000 \text{ K}, \lambda)$	0,0000	$6,8546 \cdot 10^{-6}$	0,0008	0,0083	0,0274
$\delta\varepsilon(30000 \text{ K}, \lambda)$	$1,4845 \cdot 10^{-21}$	0,0190	0,0909	0,2022	0,3015
$\delta\varepsilon(60000 \text{ K}, \lambda)$	$3,8530 \cdot 10^{-11}$	0,1378	0,3015	0,4496	0,5491

По данным таблицы 2 можно сделать заключение, что при температурах от 2000 K до 10000 K приближение Вина работает прекрасно во всех диапазонах ультрафиолетовой области, и даже на дальнем краю *NUV* $\delta\varepsilon(T, \lambda)$ имеет значение всего около 3 %. Также оно эффективно в *EUUV* диапазоне при температуре 30000 K и только вблизи его ближнего края при 60000 K. В таблице 2 все приемлемые значения $\delta\varepsilon(T, \lambda)$ меньше 5 % выделены жирным шрифтом.

Относительное отклонение излучательных способностей (светимостей, блесков). Теперь обратимся непосредственно к излучательной способности $\varepsilon(T)$ вида (3), которая связана со светимостью звезды L и наблюдаемым блеском E в рассматриваемом диапазоне, соотношениями

$$L = 4\pi R^2 \varepsilon(T), \quad E = \left(\frac{R}{r}\right)^2 \cdot \varepsilon(T), \quad (7)$$

где R – радиус звезды, а r – расстояние до звезды.

Данные её расчетов для случаев «планковской» (1) и «виновской» спектральных плотностей (5) во всех диапазонах *УФ* области приведены в таблице 3.

Теперь введем относительное отклонение излучательной способности $\delta\varepsilon(T)$ вида

$$\delta\varepsilon(T) = \frac{\varepsilon_p(T) - \varepsilon_w(T)}{\varepsilon_p(T)}, \quad (8)$$

которое носит обобщающий характер в силу взаимосвязей (7) и будет равно относительным отклонениям светимости и блеска, то есть

$$\delta\varepsilon(T) = \delta L(T) = \delta E(T).$$

Так как блеск является наблюдаемой характеристикой звёзд, отдадим ему приоритет.

Таблица 3 – Значения излучательных способностей $\varepsilon(T)$ в *УФ* диапазонах для различных температур

$\varepsilon(T), \text{Вт/м}^2$ \ T, K	2000	5000	10000	30000	60000
$\varepsilon_p^{NUV}(T)$	14,8293	$1,9096 \cdot 10^6$	$1,1774 \cdot 10^8$	$2,5291 \cdot 10^9$	$7,6552 \cdot 10^9$
$\varepsilon_w^{NUV}(T)$	14,8293	$1,9089 \cdot 10^6$	$1,1580 \cdot 10^8$	$1,9074 \cdot 10^9$	$3,8742 \cdot 10^9$
$\varepsilon_p^{MUV}(T)$	0,0843	$4,4408 \cdot 10^5$	$1,1710 \cdot 10^8$	$6,9907 \cdot 10^9$	$2,6279 \cdot 10^{10}$
$\varepsilon_w^{MUV}(T)$	0,0843	$4,4407 \cdot 10^5$	$1,1665 \cdot 10^8$	$6,0356 \cdot 10^9$	$1,6721 \cdot 10^{10}$
$\varepsilon_p^{FUV}(T)$	$1,6926 \cdot 10^{-6}$	$1,1366 \cdot 10^3$	$3,6535 \cdot 10^7$	$1,5069 \cdot 10^{10}$	$9,0169 \cdot 10^{10}$
$\varepsilon_w^{FUV}(T)$	$1,6926 \cdot 10^{-6}$	$1,1366 \cdot 10^3$	$3,6524 \cdot 10^7$	$1,4366 \cdot 10^{10}$	$7,1922 \cdot 10^{10}$
$\varepsilon_p^{EUUV}(T)$	$4,6747 \cdot 10^{-16}$	3,9219	$1,3064 \cdot 10^6$	$1,8819 \cdot 10^{10}$	$6,0436 \cdot 10^{11}$
$\varepsilon_w^{EUUV}(T)$	$4,6747 \cdot 10^{-16}$	3,9219	$1,3064 \cdot 10^6$	$1,8700 \cdot 10^{10}$	$5,8422 \cdot 10^{11}$

Результаты расчётов $\delta E(T)$ по данным таблицы 3, абсолютно правомерные для $\delta\varepsilon(T)$ и $\delta L(T)$, приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Значения относительного отклонения блеска $\delta E(T)$

T, K \ $\delta E(T)$	$[\delta E(T)]^{NUV}$	$[\delta E(T)]^{MUV}$	$[\delta E(T)]^{FUV}$	$[\delta E(T)]^{EUUV}$
2000	$7,1337 \cdot 10^{-9}$	$1,8069 \cdot 10^{-11}$	$2,5021 \cdot 10^{-16}$	0,0000
5000	$3,6539 \cdot 10^{-4}$	$2,9671 \cdot 10^{-5}$	$2,5317 \cdot 10^{-7}$	$2,2017 \cdot 10^{-11}$

Окончание таблицы 4

10000	0,0165	0,0038	0,0003	3,0020·10⁻⁶
30000	0,2458	0,1366	0,0466	0,0063
60000	0,4939	0,3637	0,2024	0,0333

На основе данных таблицы 4 приходим к выводу, что при температурах от 2000 K до 10000 K приближение Вина абсолютно корректно во всех диапазонах ультрафиолетовой области спектра. Вполне разумно полагать, что достаточно качественную оценку даёт относительное отклонение на уровне 5 % и ниже, поэтому реальная верхняя граница температуры выше 10000 K и составляет 13850 K, что несложно проверить. Здесь, как и в таблице 2, все приемлемые значения $\delta E(T, \lambda)$ выделены жирным шрифтом. При температурах до 30000 K приближение Вина применимо в *FUV* и *EUUV* диапазонах. Также оно эффективно в *EUUV* диапазоне при температурах 60000 K.

Данные расчётов $\delta E(T)$ для ряда звёзд. Результаты расчётов относительных отклонений блесков $\delta E(T)$ приведены в таблице 5. В ней подтверждаются выводы предыдущего пункта на примере ряда реальных звёзд в широком диапазоне температур поверхности. Вполне очевидно, что эти результаты соответствуют общим тенденциям поведения $\delta E(T)$, следовательно, и поведения $\delta \epsilon(T)$ и $\delta L(T)$.

 Таблица 5 – Значения относительного отклонения блеска $\delta E(T)$ ряда звёзд

Звезда (T)	$\delta E(T)$	$[\delta E(T)]^{NUV}$	$[\delta E(T)]^{MUV}$	$[\delta E(T)]^{FUV}$	$[\delta E(T)]^{EUUV}$
<i>β Ориона C</i> (33000 K)		0,2789	0,1628	0,0603	0,0088
<i>β Южного Креста</i> (30000 K)		0,2458	0,1366	0,0466	0,0063
<i>Сириус B</i> (25200 K)		0,1889	0,0950	0,0276	0,0032
<i>Спика</i> (22000 K)		0,1488	0,0686	0,0174	0,0017
<i>Ахернар</i> (15000 K)		0,0625	0,0215	0,0035	0,0001
<i>Сириус A</i> (9500 K)		0,0134	2,9253·10⁻³	2,1400·10⁻⁴	1,6166·10⁻⁶
<i>Альтаир</i> (8700 K)		9,1974·10⁻³	1,8061·10⁻³	1,0758·10⁻⁴	5,1701·10⁻⁷
<i>τ Кита</i> (5300 K)		5,5664·10⁻⁴	5,0929·10⁻⁵	5,6790·10⁻⁷	8,4262·10⁻¹¹
<i>ϵ Эридана</i> (4830 K)		2,8152·10⁻⁴	2,1212·10⁻⁵	1,5315·10⁻⁷	9,5549·10⁻¹²
<i>Вольф 359</i> (3000 K)		2,8354·10⁻⁶	5,1799·10⁻⁸	1,8069·10⁻¹¹	0,0000

Заключение. Таким образом, в работе показано, что приближение Вина:

- корректно использовать во всей ультрафиолетовой области спектра при температурах поверхности звёзд ниже 13850 K;
- правомерно использовать в *EUUV* диапазоне для звёзд всех спектральных классов за исключением горячих звёзд класса *W*;
- неправомерно для использования либо неудовлетворительно работает в *NUV*, *MUV* и *FUV* диапазонах для всех звёзд спектральных классов *W*, *O* и частично *B*.

Литература

1. Кононович, Э. В. Общий курс астрономии / Э. В. Кононович, В. И. Мороз. – М. : URSS, 2022. – 544 с.
2. Carroll, B. W. An introduction to modern astrophysics / B. W. Carroll, D. A. Ostlie. – San Francisco : Pearson International Edition, 2007. – 1351 p.
3. Schmidt, W. Numerical Python in astronomy and astrophysics / W. Schmidt, M. Völschow. – Cham, Switzerland : Springer, 2021. – 260 p.
4. Definitions of solar irradiance spectral categories [Electronic resource]. – Mode of access : https://www.acttr.com/images/pdf/ISO_DIS_21348.pdf/. – Date of access : 13.02.2024.
5. The extreme-ultraviolet explorer (EUVE) [Electronic resource]. – Mode of access : <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1992-031A/>. – Date of access : 10.02.2024.
6. The telescope that captured our imagination [Electronic resource]. – Mode of access : <https://science.nasa.gov/mission/hubble/observatory/>. – Date of access : 02.02.2024.
7. Wolfram, S. Metamathematics : foundations & physicalization / S. Wolfram. – New York, 2022. – 190 p.

Расчет сил, действующих на непараллельных границах раздела аустенит / мартенсит в ферромагнитном монокристалле с памятью формы, находящемся в жесткой заделке

В.О. ОСТРИКОВ¹, О.М. ОСТРИКОВ²

Решена статическая задача о расчете сил, действующих вдоль непараллельных границ раздела аустенит / мартенсит единичной мартенситной прослойки, в механически нагруженном ферромагнитном призматическом монокристалле с памятью формы, находящемся в жесткой заделке.

Ключевые слова: мартенситная прослойка, ферромагнитный монокристалл с памятью формы, межфазная граница раздела.

The static problem of calculating the forces acting along non-parallel austenite / martensite interfaces of a single martensite layer in a mechanically loaded ferromagnetic prismatic shape memory single crystal located in a rigid embedding is solved.

Keywords: martensitic layer, ferromagnetic monocystal with shape memory, interface.

Введение. Уникальные физико-механические свойства ферромагнитных сплавов Гейслера с эффектом запоминания формы хорошо изучены с помощью экспериментальных методов исследования [1]–[6]. Растет актуальность разработки теоретических методов для прогнозирования поведения данных материалов при заданных нагрузках. Такие методы и полученные с их помощью результаты востребованы в технологиях изготовления технических систем, рабочим элементом в которых являются ферромагнитные материалы с эффектом памяти формы [7], [8]. Как было показано в [9]–[12], расчеты для инженерных приложений и развития теории бездиффузионных фазовых превращений удобно вести на основе методов механики деформируемого твердого тела [13].

Целью данной работы стало решение статической задачи о расчете сил, действующих в плоскостях границ раздела аустенит / мартенсит мартенситной прослойки в случае непараллельных границ раздела в механически нагруженном призматическом ферромагнитном монокристалле состава Гейслера, обладающим свойством памяти формы и находящемся в жесткой заделке.

1. Постановка задачи. На рисунке 1 показан фрагмент монокристалла Ni_2MnGa с непараллельными границами раздела аустенит / мартенсит (фотография любезно предоставлена Созиновым А.Л.). При соприкосновении границ раздела, как это показано на рисунке 1, они теряют свою подвижность в направлении навстречу друг другу. При этом в противоположном направлении подвижность границ сохраняется. В сечении плоскостью, параллельной плоскости рисунка 1, мартенситная прослойка имеет форму треугольника. При этом границы раздела контактируют в одной из вершин треугольника (верхняя вершина на рисунке 1).

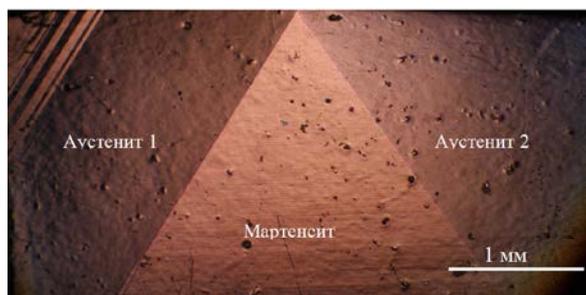


Рисунок 1 – Фрагмент монокристалла Ni_2MnGa с непараллельными соприкасающимися границами раздела аустенит / мартенсит

На рисунке 2 схематически представлен призматический монокристаллический образец с треугольной в сечении мартенситной прослойкой. Образец механически нагружен и находится в жесткой заделке.

Случай не контактирующих друг с другом границ раздела схематически представлен на рисунке 3. При этом мартенситная прослойка в рассматриваемом сечении имеет вид трапеции.

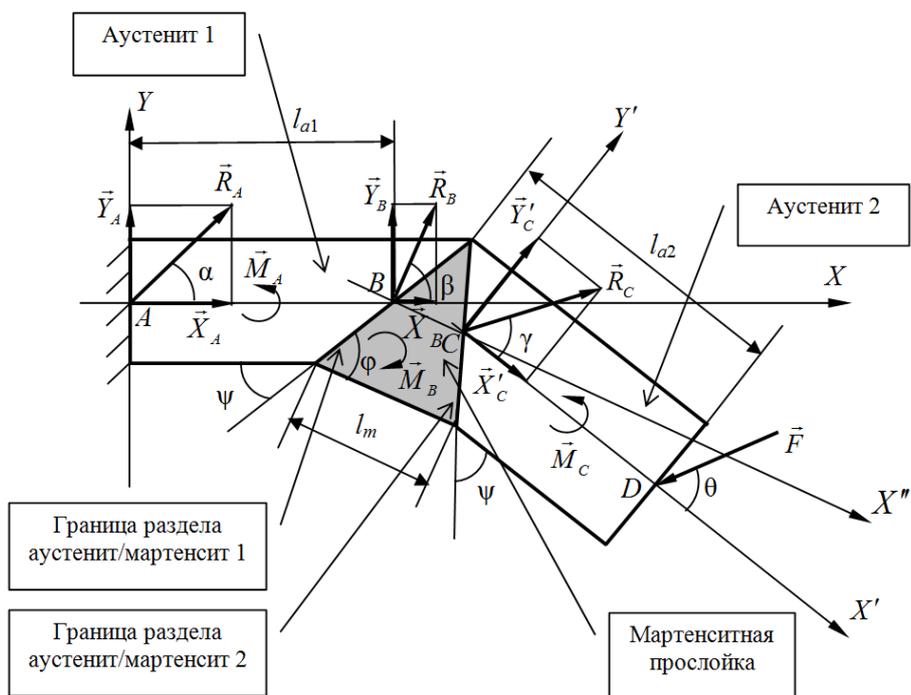


Рисунок 2 – Схематическое изображение находящегося в жесткой заделке механически нагруженного призматического монокристаллического образца с мартенситной прослойкой в случае соприкасающихся непараллельных межфазных границ

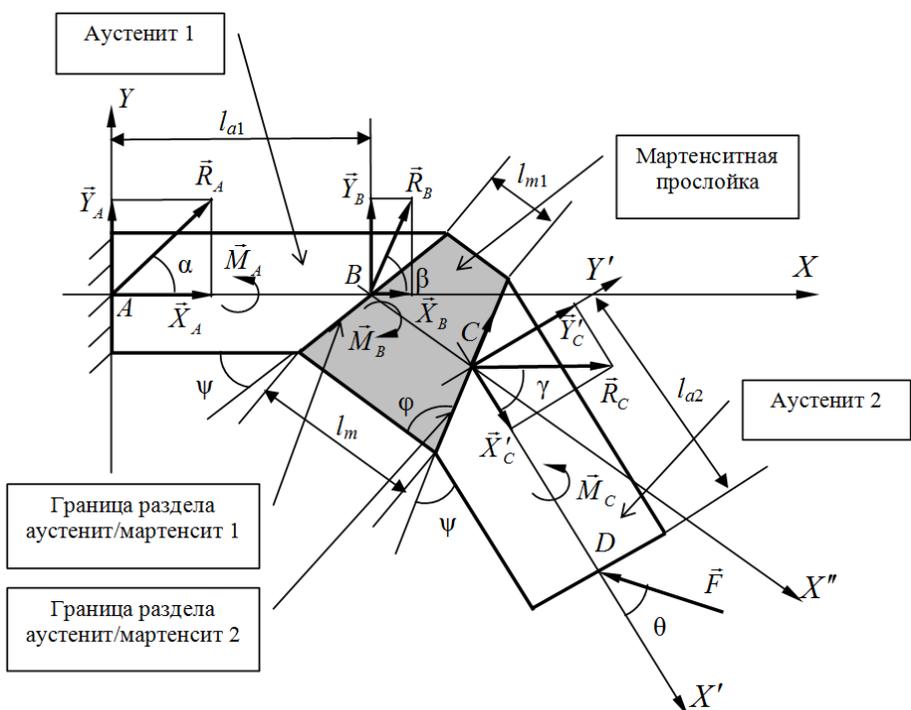


Рисунок 3 – Схематическое изображение находящегося в жесткой заделке механически нагруженного призматического монокристаллического образца с мартенситной прослойкой в случае несоприкасающихся непараллельных межфазных границ

Заданными (известными) параметрами будем считать следующие (см. рисунки 2 и 3): \vec{F} – приложенная к свободному торцу призматического образца нагрузка; θ – угол между направлением действия силы \vec{F} и осью образца; ψ – угол между плоскостью границы раздела и аустенитной поверхностью монокристалла; ϕ – угол между плоскостью границы раздела и мартенситной поверхностью монокристалла; l_{a1} и l_{a2} – параметры аустенитных частей монокристалла; l_m – длина основания треугольника или нижнего основания трапеции мартенситной части монокристалла; l_{m1} – длина верхнего основания трапеции мартенситной части монокристалла (рисунок 3).

Кроме моментов сил, к числу искомым отнесем реакцию \vec{R}_A и действующие в плоскостях границ раздела аустенит / мартенсит силы F_{ext1} и F_{ext2} .

2. Решение задачи и обсуждение результатов.

1. Для второго аустенитного объема (рисунки 2 и 3) в состоянии равновесия будем иметь:

$$\sum_i F_{ix'} = R_C \cos \gamma - F \cos \theta = 0, \quad (1)$$

$$\sum_i F_{iy'} = R_C \sin \gamma - F \sin \theta = 0. \quad (2)$$

Здесь $R_C \cos \gamma = X'_C$, $R_C \sin \gamma = Y'_C$, γ и R_C – искомый угол и реакция (рисунки 2 и 3).

Условие равновесия моментов сил для второго аустенитного объема имеет вид:

$$\sum_i M_C(F_i) = Fl_{a2} \sin \theta + M_C = 0.$$

Отсюда

$$M_C = -Fl_{a2} \sin \theta. \quad (3)$$

Следует отметить, что в (3) с правой стороны равенства все параметры известны. А из (1) и (2) следует:

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} \theta, \text{ т. е. } \gamma = \theta \text{ и } R_C = F. \quad (4)$$

2. Для мартенситного объема получим (рисунки 4 и 5):

$$\sum_i F_{ix''} = R_C \cos \gamma_1 + R_B \cos \beta_1 = 0, \quad (5)$$

$$\sum_i F_{iy''} = R_C \sin \gamma_1 + R_B \sin \beta_1 = 0. \quad (6)$$

Для моментов сил в случае соприкасающихся границ раздела (рисунок 4) будем иметь

$$\sum_i M_B(F_i) = R_C \frac{l_m}{2} \sin \gamma_1 - M_B + M_C = 0, \quad (7)$$

а для несоприкасающихся (рисунок 5) –

$$\sum_i M_B(F_i) = R_C \frac{l_m + l_{m1}}{2} \sin \gamma_1 - M_B + M_C = 0. \quad (8)$$

Тогда из (7), с учетом (3), получаем

$$M_B = R_C \frac{l_m}{2} \sin \gamma_1 - Fl_{a2} \sin \theta = F \left(\frac{l_m}{2} \sin \gamma_1 - l_{a2} \sin \theta \right). \quad (9)$$

Из (8), с учетом (3), имеем

$$M_B = R_C \frac{l_m + l_{m1}}{2} \sin \gamma_1 - Fl_{a2} \sin \theta = F \left(\frac{l_m + l_{m1}}{2} \sin \gamma_1 - l_{a2} \sin \theta \right). \quad (10)$$

Из рисунков 2, 3, 4, 5, с учетом (4), не трудно показать, что

$$\gamma_1 = \gamma - (\phi - \psi) = \theta - (\phi - \psi). \quad (11)$$

Таким образом, угол γ_1 и момент сил M_B выражаются через известные параметры, т. е. γ_1 и M_B найдены.

3. Для первого аустенитного объема в соответствии с рисунками 2 и 3 справедлива система уравнений:

$$\sum_i F_{iX} = X_A + X_B = 0, \tag{12}$$

$$\sum_i F_{iY} = Y_A + Y_B = 0, \tag{13}$$

$$\sum_i M_A(F_i) = R_B l_{a1} \sin\beta + M_A - M_B + M_C = 0. \tag{14}$$

Из (12) и (13) получаем $R_A \cos\alpha = -R_B \cos\beta$, $R_A \sin\alpha = -R_B \sin\beta$.

И далее

$$\operatorname{tg}\alpha = \operatorname{tg}\beta, \text{ т. е. } \alpha = \beta, \text{ и } R_A = -R_B. \tag{15}$$

Учитывая это, из геометрических построений, представленных на рисунках 2, 3, 4, 5, получим

$$\beta_1 = \beta - (\phi - \psi) = \alpha - (\phi - \psi). \tag{16}$$

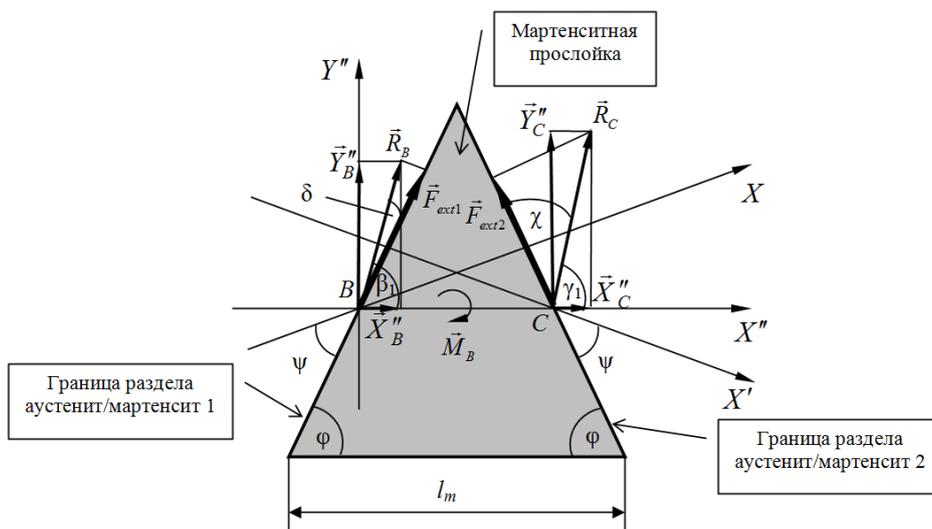


Рисунок 4 – Схематическое изображение сил, действующих на границах раздела аустенит / мартенсит в случае соприкасающихся непараллельных межфазных границ

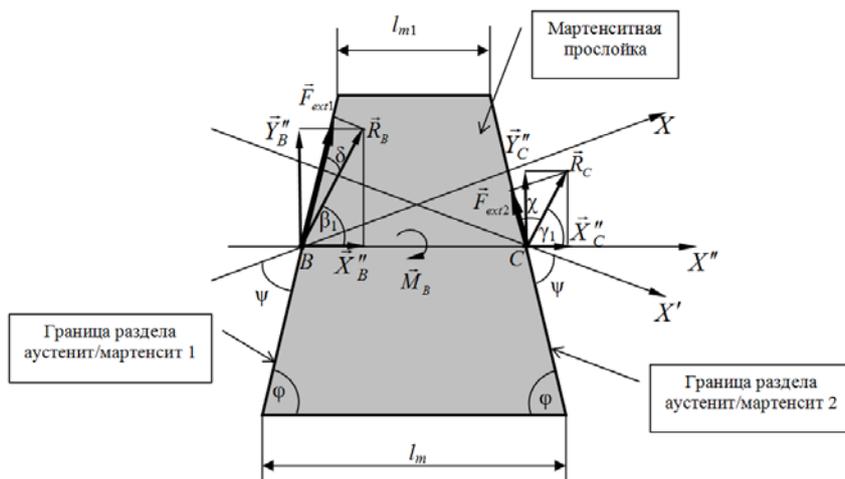


Рисунок 5 – Схематическое изображение сил, действующих на границах раздела аустенит / мартенсит в случае несоприкасающихся непараллельных межфазных границ

Из (5) и (6), с учетом (4), (11) и (15), имеем

$$R_A = F \frac{\cos(\theta - (\phi - \psi))}{\cos(\alpha - (\phi - \psi))},$$

$$R_A = F \frac{\sin(\theta - (\phi - \psi))}{\sin(\alpha - (\phi - \psi))}.$$

Отсюда следует, что

$$\alpha = \theta \text{ и } R_A = F. \quad (17)$$

Из (14) получим

$$M_A = M_B - M_C - R_B l_{a1} \sin\beta. \quad (18)$$

Подставив в (18) соотношения (3) и (9) или (10), будем иметь

$$M_A = R_C \frac{l_m}{2} \sin\gamma_1 - R_B l_{a1} \sin\beta = F \left(\frac{l_m}{2} \sin\gamma_1 + l_{a1} \sin\beta \right),$$

для ситуации, представленной на рисунке 2, и

$$M_A = R_C \frac{l_m + l_{m1}}{2} \sin\gamma_1 - R_B l_{a1} \sin\beta = F \left(\frac{l_m + l_{m1}}{2} \sin\gamma_1 + l_{a1} \sin\beta \right),$$

для ситуации, представленной на рисунке 3.

4. Для нахождения модулей сил F_{ext1} и F_{ext2} , действующих в плоскостях границ раздела аустенит/мартенсит мартенситной прослойки, воспользуемся соотношениями, полученными из геометрических построений, представленных на рисунках 4 и 5:

$$F_{ext1} = R_B \cos\delta, \quad (19)$$

$$F_{ext2} = R_C \cos\chi. \quad (20)$$

Здесь $\delta = \phi - \beta_1$, а с учетом (16) и (17) не трудно показать, что $\delta = \phi - \theta + (\phi - \psi)$.

Из рисунков 4 и 5 видно, что $\chi = \pi - \phi - \gamma_1$. Учитывая (11), получим

$$\chi = \pi - \theta - \psi.$$

Ранее было показано (соотношение (4)), что $R_C = F$. А из (15) и (17) следует, что $R_B = -F$. Тогда (19) и (20) перепишем в виде:

$$F_{ext1} = -F \cos(2\phi - \theta - \psi), \quad (21)$$

$$F_{ext2} = -F \cos(\theta + \psi). \quad (22)$$

При получении соотношения (22) были выполнены следующие преобразования [14]:

$$\cos\chi = \cos(\pi - \theta - \psi) = -\cos(-\theta - \psi) = -\cos(\theta + \psi).$$

Как видно из (21) и (22) силы F_{ext1} и F_{ext2} направлены в противоположную сторону направления показанного на рисунках 4 и 5.

Заключение. Таким образом, решена статическая задача для механически нагруженного ферромагнитного призматического монокристалла с памятью формы, находящегося в жесткой заделке, с мартенситной прослойкой, имеющей непараллельные границы. В ходе решения задачи были найдены: моменты сил, действующих на аустенитный и мартенситный объемы; реакция заделки \vec{R}_A ; силы F_{ext1} и F_{ext2} , действующие в плоскостях границ раздела аустенит / мартенсит. Адекватность разработанной расчетной схемы и достоверность полученных на ее основе результатов базируется на применении классических методов расчетов, представленных в известной учебной литературе [13], [14].

Авторы благодарят профессора А.Л. Созинова за предоставленную фотографию (рисунок 1) и обсуждение отдельных вопросов статьи.

Литература

1. 6% magnetic-field-induced strain by twin-boundary motion in ferromagnetic Ni-Mn-Ga / S. J. Murrey, M. Marioni, S. M. Allen, R. C. O'Handley // Appl. Phys. Lett. – 2000. – V. 77. – P. 886–888.
2. Saren, A. Dynamic twinning stress and viscous-like damping of twin boundary motion in magnetic shape memory alloy Ni-Mn-Ga / A. Saren, K. Ullakko // Scripta Materialia. – 2017. – V. 139. – P. 126–129.

3. Energy conversion in Ni-Mn-Ga with asymmetrical bias magnetic field / M. Veligatla, P. Lindquist, C. J. Garcia-Cervera, P. Müllner // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2022. – V. 551. – P. 169–183.
4. Twin boundary structure and mobility / D. Shilo, E. Faran, B. Karki, P. Müllner // *Acta Materialia*. – 2021. – V. 220. – P. 117–316.
5. Остриков, О. М. Исследование пластической деформации поверхности монокристалла Ni₂MnGa методом индентирования / О. М. Остриков, А. Л. Созинов, А. В. Сорока // *Инженерно-физический журнал*. – 2012. – Т. 85, № 5. – С. 1132–1141.
6. Остриков, О. М. Разрушение и сопутствующие ему эффекты в ферромагнитном монокристалле Ni₂MnGa с эффектом памяти формы / О. М. Остриков, Е. В. Шматок // *Инженерно-физический журнал*. – 2015. – Т. 88, № 1. – С. 272–279.
7. Linearly enhanced circular magnetic field actuator : pat. US 11094440B2 / P. Müllner, G. Johnston. – Publ. date 17.08.2021.
8. Ullakko, K. Magnetically controlled shape memory alloys : A new class of actuator materials / K. Ullakko // *J. Mater. Eng. Perform.* – 1996. – V. 5, № 3. – P. 405–409.
9. Остриков, В. О. Статика и динамика границы раздела аустенит / мартенсит в нагруженном призматическом монокристалле с эффектом памяти формы, находящемся в жесткой заделке / В. О. Остриков, О. М. Остриков // *Машиностроение : республик. межведомственный сб. науч. трудов / БНТУ ; гл. ред. В. К. Шелег. – Минск : БНТУ, 2022. – Вып. 33. – С. 139–147.*
10. Василевич, Ю. В. Статика и динамика границы раздела аустенит / мартенсит в призматическом ферромагнитном монокристалле с эффектом памяти формы, находящемся в жесткой заделке и магнитном поле / Ю. В. Василевич, В. О. Остриков, О. М. Остриков // *Машиностроение : республик. межведомственный сб. науч. трудов / БНТУ ; редкол.: В. К. Шелег (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2023. – Вып. 34. – С. 131–139.*
11. Василевич, Ю. В. Статика и динамика границ раздела аустенит / мартенсит мартенситной прослойки в нагруженном призматическом ферромагнитном монокристалле с эффектом памяти формы, находящемся в жесткой заделке / Ю. В. Василевич, В. О. Остриков, О. М. Остриков // *Машиностроение : республик. межведомственный сб. науч. трудов / БНТУ ; редкол.: В. К. Шелег (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2023. – Вып. 34. – С. 139–146.*
12. Остриков, В. О. Статическая и динамическая задача для единичной мартенситной прослойки в ферромагнитном монокристалле с эффектом памяти формы, находящемся в магнитном поле в жесткой заделке / В. О. Остриков, О. М. Остриков // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2023. – № 1 (54). – С. 43–46.
13. Тарг, С. М. Краткий курс теоретической механики / С. М. Тарг. – М. : Высш. шк., 2010. – 416 с.
14. Воднев, В. Т. Основные математические формулы : Справочник / В. Т. Воднев, А. Ф. Наумович, Н. Ф. Наумович. – Минск : Высш. шк., 1988. – 269 с.

¹Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого

²Белорусский государственный университет транспорта

Поступила в редакцию 04.03.2024

Краткие сообщения

УДК 57.063:595.794.23(476.2-37Гомель)

EDN: ZQEOP1

О находке аноплиуса сарматского (*Anoplius samariensis*) на территории Гомельского района

А.М. ОСТРОВСКИЙ

16.07.2023 на пойменном лугу у д. Рудня Жигальская в Гомельском районе были отловлены две особи (самки) аноплиуса сарматского (*Anoplius samariensis* (Pallas, 1771)). Это первая подтвержденная находка данного вида на юго-востоке Беларуси за последние 35 лет. Требуется дальнейшее изучение вопроса о распространении и статусе вида в Гомельском районе.

Ключевые слова: Гомельский район, *Anoplius samariensis*, находка.

On 16th July 2023, two female specimens of *Anoplius samariensis* (Pallas, 1771) were recorded in a flood plain meadow near Rudnya Zhigal'skaya village in the Gomel region. This is the first confirmed finding of this species in this area for 35 years. The issue of distribution and status of the species in the Gomel region requires further study.

Keywords: Gomel region, *Anoplius samariensis*, finding.

Введение. Род *Anoplius* Dufour, 1834 в Беларуси представлен 8 видами [1]. Один из них – аноплиус сарматский (*A. samariensis* (Pallas, 1771))¹ – занесен в 4-е издание Красной книги Республики Беларусь [2]. Статус – III категория национальной природоохранной значимости. Вид также включен в Красные книги Молдовы, Украины и некоторых субъектов Российской Федерации [3]–[11]. Предполагается, что численность этой осы сокращается вследствие разрушения ее естественных местообитаний в результате хозяйственной деятельности человека.

Цель работы – указать место новой регистрации *A. samariensis* на юго-востоке страны.

Результаты и обсуждение. 16.07.2023 на пойменном лугу у д. Рудня Жигальская в Гомельском районе энтомологическим сачком были отловлены две особи (самки) *A. samariensis* (рисунок 1). Географические координаты места находки: 52°10'57"N, 30°39'30"E.

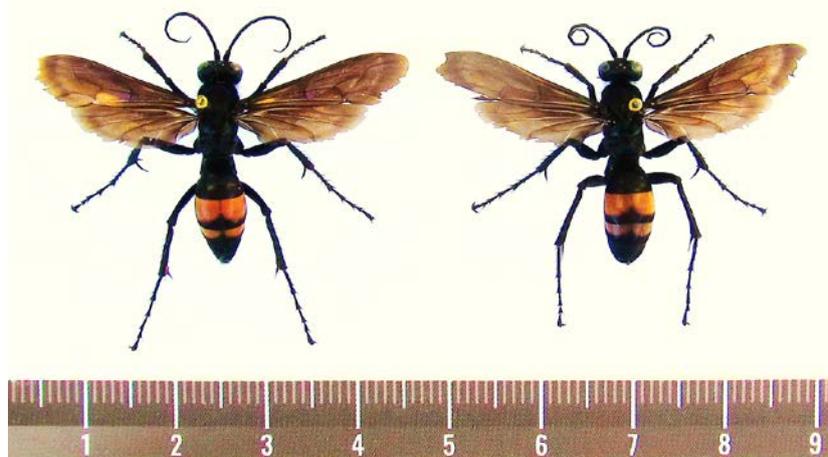


Рисунок 1 – Аноплиус сарматский (*Anoplius samariensis*), самки

¹Название «аноплиус сарматский» фигурирует во многих источниках, однако оно возникло, вероятно, по недоразумению и закрепилось, к великому сожалению, в Красной книге Республики Беларусь. Согласно же переводу видового эпитета на русский язык, данный аноплиус называется самарским.

Отловленные особи обладали характерными для этого вида внешними признаками: крупным, достигающим 2,5 см длины, черным телом с широкими красными окаймленными по заднему краю перевязями на втором и третьем тергитах брюшка, темными с металлическим отливом крыльями и глубокой срединной вырезкой на переднем крае наличника.

Место находки ос расположено в 2,5 км восточнее р. Днепр и представляет собой открытый, хорошо прогреваемый возвышенный участок пойменного луга с разреженной разнотравно-злаковой растительностью и искусственной посадкой сосны, через которую проходит слабо наезженная автомобильная дорога (рисунок 2).



Рисунок 2 – Место обнаружения вида в Гомельском районе

Уместно заметить, что провизией для личинок *A. samariensis* являются парализованные крупные пауки из семейств Araneidae, Lycosidae, Heteropodidae, Pisauridae и Gnaphosidae, помещаемые в одноячейковые гнезда в земле, причем в каждой ячейке, как правило, запасается один экземпляр добычи; иногда оса использует в качестве гнезда норку паука [2], [12]. Считается, что в условиях Беларуси наиболее вероятной добычей *A. samariensis* может являться южнорусский тарантул (*Lycosa singoriensis* (Laxmann, 1770)), распространение которого в регионе ограничено долинами крупных рек [13].

Согласно [14], в пределах места обитания данного охраняемого вида запрещаются многие хозяйственные мероприятия, в частности, применение удобрений и химических средств защиты растений, распашка земель, выжигание сухой травы и др. В этой связи необходимы мониторинговые исследования с целью выявления района распространения, численности и динамики вида, а также организации мер по его охране.

В то же время А.В. Кулак (персональное сообщение) считает *A. samariensis* не характерным для природы Беларуси видом, постоянные места обитания которого неизвестны, и предлагает исключить его из последующего издания Красной книги Республики Беларусь. По его мнению, данный вид дорожных ос на территории Беларуси имеет сверхнизкую численность и, вероятно, обитает не постоянно, не из-за неудовлетворительного состояния его местообитаний, не из-за угроз со стороны человека, а потому, что вид является в большей мере лесостепным и степным и чужд коренным биогеоценозам Белорусского Полесья.

Заключение. Подтверждено современное обитание аноплиуса сарматского на территории Гомельского района. С целью выявления новых мест обитаний вида целесообразно провести обследование пойменных луговых биотопов на участках с разреженной растительностью вдоль песчаных террас и открытых участков дорог с песчаным грунтом и откосами, особенно в местах обитания южнорусского тарантула.

Литература

1. Шляхтенок, А. С. Виды рода *Anoplius* Dufour (Hymenoptera, Pompilidae) в Беларуси / А. С. Шляхтенок // Весці НАН Беларусі. – 2012. – № 1. – С. 105–112.
2. Красная книга Республики Беларусь. Животные : редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды диких животных / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды ; гл. редкол.: И. М. Качановский (предс.), М. Е. Никифоров, В. И. Парфенов [и др.]. – 4-е изд. – Минск : Беларус. Энцыкл. імя П. Броўкі, 2015. – 320 с.
3. Cartea Roşie a Republicii Moldova / Min. Mediului al Rep. Moldova, Acad. de Ştiinţe a Moldovei, Grădina Botanică & Inst. de Zoologie, Comisia Naţ. : Valeriu Munteanu [et al.] ; col. red.: Gheorghe Duca (preşedinte) [et al.]. – 3 ed. – Ch. : Î.E.P. Ştiinţa, 2015 (Combinatul Poligr.) – 492 p.
4. Червона книга України. Тваринний світ / Міністерство охорони навколишнього природного середовища України, Національна академія наук України ; редкол.: Г. Г. Філіпчук (гол.), М. М. Мовчан, І. А. Акімов [та інш.]. – Київ : Глобалконсалтинг, 2009. – 600 с.
5. Червона книга Дніпропетровської області. (Тваринний світ) / Дніпропетровська обласна державна адміністрація, Дніпропетровська обласна організація Всеукраїнської екологічної ліги, Дніпропетровський нац. ун-т ім. Олеся Гончара ; редкол.: О. Є. Пахомов (гол.), В. Я. Гассо, К. К. Голобородько [та інш.]. – Дніпропетровськ : ТОВ «Новий друк», 2011. – 488 с.
6. Червона книга Харківської області. Тваринний світ / Харківська обласна рада, Харківський нац. ун-т ім. В.Н. Каразіна, Державне управління охорони навколишнього природного середовища у Харківській області ; редкол.: В. А. Токарський (гол.), Т. А. Атемасова, Г. О. Шандиков [та інш.]. – Харків : ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2013. – 472 с.
7. Бойко, М. Ф. Червоний список Херсонської області : Рідкісні та зникаючі види рослин, грибів та тварин / М. Ф. Бойко, М. М. Подгайний. – 2-е вид. – Херсон, 2002. – 32 с.
8. Тваринний світ Запорізької області у Червоній книзі України. Мелітопольщина : довідникове видання / Мелітопольський інститут екології та соціальних технологій ВНЗ Відкритий Міжнародний університет розвитку людини «Україна» [та інш.]; редкол.: Н. М. Сурядна, В. І. Лисенко. – Мелітополь : ТОВ «Колор-Принт», 2017. – 240 с.
9. Красная книга Чувашской Республики / Министерство природных ресурсов и экологии Чувашской Республики [и др.] ; редкол.: И. В. Исаев (гл. ред.), А. В. Дмитриев. – Чебоксары : ГУП «ИПК «Чувашия», 2010. – Т. 1, ч. 2 : Редкие и исчезающие виды животных. – 372 с.
10. Красная книга Нижегородской области / Министерство экологии и природных ресурсов Нижегородской области ; редкол.: Г. А. Ануфриев, А. И. Бакка, С. В. Бакка [и др.]. – 2-е изд. – Нижний Новгород : ДЕКОМ, 2014. – Т. 1 : Животные. – 448 с.
11. Красная книга Самарской области / Ин-т экологии Волжского бассейна РАН, Правительство Самарской области, Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Самарской области ; редкол.: Д. И. Азаров (предс.), Г. С. Розенберг, С. В. Саксонов [и др.]. – Тольятти : «Кассандра», 2009. – Т. 2 : Редкие виды животных. – 332 с.
12. Шляхтёнок, А. С. Обзор рода *Anoplius* Dufour, 1834 (Hymenoptera, Pompilidae) фауны Европы / А. С. Шляхтёнок, А. С. Лелей, В. М. Локтионов // Евразийский энтомолог. журнал. – 2012. – Т. 11 (5). – С. 167–174.
13. Ostrovsky, A. M. New records about poorly understood species of wolf spiders *Arctosa cinerea* (Fabricius, 1777) and *Lycosa singoriensis* (Laxmann, 1770) (Aranei: Lycosidae) in Belarus / A. M. Ostrovsky // Ukrainska Entomofaunistyka. – 2018. – Vol. 9, № 2. – P. 1–4.
14. Правила проведения работ по установлению специального режима охраны и использования мест обитания диких животных, относящихся к видам, включенным в Красную книгу Республики Беларусь : ТКП 17.07-01-2021(33140). – Введ. 30.09.2021. – Минск : Минприроды, 2021. – С. 45–46.

Случай полидактилии у свиной породы ландрас

А.А. САВАРИН, Л.А. ЛЕВШУНОВА

В 2023 г. в агрогородке Малые Немки Ветковского района Гомельской области выявлен один случай полидактилии у свиной (самка) породы ландрас на задней левой конечности. Данные о родословной доказывают близкородственное скрещивание. Второй палец имел две практически одинаковые по длине (около 5,2–5,3 см) и развитию фаланги пальцев. Видимых патологий костей не выявлено.

Ключевые слова: свиная, порода ландрас, полидактилия, морфо-анатомия.

In 2023, one case of polydactyly was detected in a Landrace pig (female) on the left hind limb in the agro-town of Malye Nemki, Vetkov district, the Gomel region. Pedigree data prove close inbreeding. The second finger had two almost identical finger phalanges in length (about 5,2–5,3 cm) and development. There were no visible bone pathologies.

Keywords: pig, Landrace breed, polydactyly, morphoanatomy.

Введение. Анатомические аномалии достаточно часто встречаются у свиней (не менее 1 % у новорожденных [1].) Они могут быть вызваны как наследственными, так и факторами окружающей среды. На частоту появления аномальных и патологических признаков оказывают влияние близкородственное скрещивание, нередко наблюдаемое при разведении животных в частных хозяйствах, количество опоросов у свиноматки (у «старых» свиноматок частота встречаемости патологий в потомстве увеличивается [2]).

Регистрируемая у многих видов полидактилия может контролироваться как рецессивными, так и доминантными генами [3]. В настоящее время происхождение этого морфо-анатомического изменения вызывает научную полемику [4], [5], исследуются и фенотипические вариации [6] [и др.]. Предполагается, что у свиней полидактилия имеет полигенный характер наследования [7].

Порода ландрас широко распространена и используется также для промышленного скрещивания с чистопородными и помесными матками крупной белой и других пород свиней [8].

Для выяснения причин образования и оценки влияния аномалий на жизнеспособность особей имеет важное значение их морфо-анатомическое описание.

Цель работы – обратить внимание специалистов на анализируемый случай полидактилии, высказать предположение о причине ее возникновения.

Результаты и обсуждение. В 2023 г. в частном хозяйстве в аг. Малые Немки Ветковского района выявлен один случай полидактилии у самки породы ландрас. Особь была забита в возрасте 15 месяцев. Данные о родословной этой особи фрагментарны, но и они доказывают близкородственное скрещивание (рисунок 1). От особей 4 и 5 (для самки 5 это был первый опорос) получено восемь поросят, из которых только у одной особи выявлена аномалия количества фаланг пальцев. Полидактилия у этой особи была ярко выражена на задней левой конечности (рисунок 2).

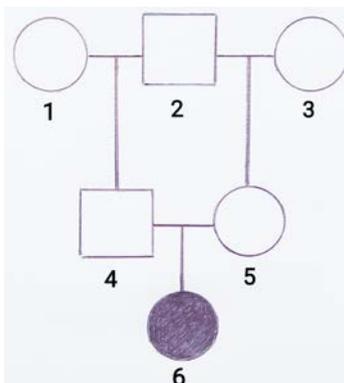


Рисунок 1 – Фрагмент родословной особи с полидактилией:
квадраты – самцы, круги – самки; черные фигура – самка с полидактилией

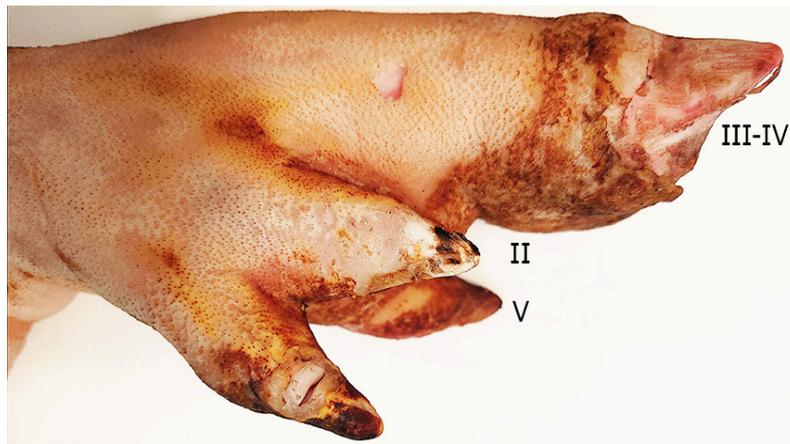


Рисунок 2 – Задняя левая конечность с полидактилией (указаны номера пальцев)

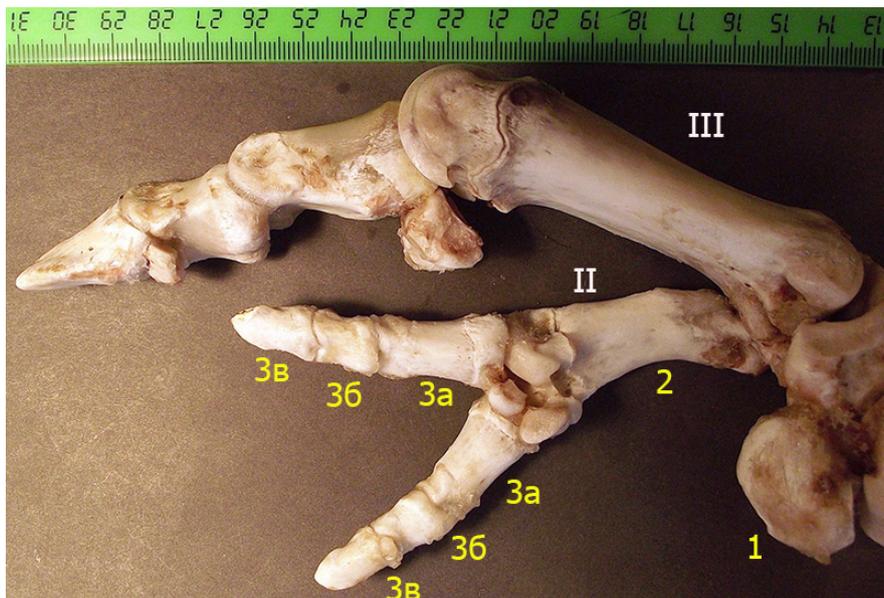


Рисунок 3 – Соразмерность костей и парность фаланг II пальца: 1 – запястье, 2 – пясть, 3 – фаланги пальцев (3а – путовая кость, 3б – венечная кость, 3в – копытцевая кость)

Как известно, у свиней в норме – 4 пальца (опорные на землю – III и IV, побочные – II и V пальцы) [9]. Обращает на себя внимание относительная соразмерность этих групп пальцев.

С целью уточнения типа полидактилии задняя конечность была проварена и полностью очищена до костей. Палец II имел две практически одинаковые по длине (около 5,2–5,3 см) и развитию фаланги пальцев (рисунок 3). Путовые кости, как и в норме, были длиннее венечных (рисунок 3, 3а и 3б соответственно).

Видимых патологий костной ткани не выявлено.

С учетом низкой двигательной активности свиньи при ее содержании подобное морфоанатомическое изменение (даже с учетом большой длины добавочных фаланг) не повлияло бы на жизнеспособность особи.

Заключение. Следует заметить, что в публикациях по полидактилии свиней, как правило, приводится описание рентгенограмм или препарата со снятой кожей, что не дает полного представления о морфологии костного материала, соразмерности костей или возможного наличия патологических изменений. В нашем случае впервые выявлен случай полидактилии у свиньи породы ландрас, у которой второй палец имел две практически одинаковые по длине (около 5,2–5,3 см) и развитию фаланги пальцев без патологии костей. Один из факторов, повлиявших на проявление признака, следует считать инбридинг. Однако нельзя полностью исключать воздействие и экологических факторов.

К сожалению, не сохранился биологический материал этой особи для цитогенетического анализа.

Литература

1. Swine Genetic Abnormalities [Electronic resource] // National Institute of Food and Agriculture. – Mode of access : <https://swine.extension.org/swine-genetic-abnormalities>. – Date of access : 15.03.2024.
2. Аномалии, пороки развития и уродства поросят : причины возникновения и профилактика / С. В. Воробиевская [и др.] // Актуальные вопросы сельскохозяйственной биологии. – 2019. – № 4 (14). – С. 103–110.
3. Polydactyl Inheritance in the Pig / D. Gorbach [et al.] // Journal of Heredity. – 2010. – № 4. – P. 469–475.
4. Lange, A. Polydactyly in development, inheritance, and evolution / A. Lange, G. B. Müller // The Quarterly Review of Biology. – 2017. – № 1. – P. 1–38.
5. Whole genome resequencing reveals an association of ABCC4 variants with preaxial polydactyly in pigs / C. Ma [et al.] // BMC Genomics. – 2020. – Article number 268. – DOI : 10.1186/s12864-020-6690-1.
6. Необычная врожденная полидактилия мини-свиней селекционной группы ИЦиГ СО РАН / С. В. Никитин [и др.] // Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2021. – № 6. – С. 652–660.
7. Козминская, А. С. Оценка адаптивного и генетического потенциала свиней, селекционно-генетический мониторинг в условиях промышленной технологии : дис... канд. с.-х. наук : 06.02.07 / А. С. Козминская ; ФГБОУ ВО «Нижегородская гос. сельскохозяйственная академия». – Н. Новгород, 2017. – 146 с.
8. Максимов, Г. В. Породы свиней : учебное пособие / Г. В. Максимов, Н. В. Иванова, А. Г. Максимов. – Персиановский : Донской ГАУ, 2018. – 184 с.
9. Fails, A. D. Anatomy and physiology of farm animals / A. D. Fails, C. Magee. – Hoboken, NJ : Wiley Blackwell, 2018. – 578 p.

Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 29.03.2024

Ответственный секретарь: *О.Г. Шляхтова*. Корректоры: *Е.Н. Федорова, И.А. Хорсун*

Подписано в печать 03.06.2024. Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 12,96. Тираж 20 экз. Заказ № 305.
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.