

ИЗВЕСТИЯ

Гомельского государственного университета
имени Ф. Скорины

№ 3(138)

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», 2023
© Educational Establishment «Francisk Skorina Gomel State
University», 2023

ИЗВЕСТИЯ

Гомельского государственного университета
имени Ф. Скорины

НАУЧНЫЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с 1999 г.
Выходит 6 раз в год

• 2023, № 3 (138) •

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ:

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

СОДЕРЖАНИЕ

Биология

Гулаков А.В., Дроздов Д.Н., Иванцов Д.Н. <i>Формирование поглощенной дозы облучения у аборигенной ихтиофауны непроточных водоемов полесского радиационно-экологического заповедника</i>	5
Дайнеко Н.М., Тимофеев С.Ф. <i>Радиологический анализ луговой растительности в пойме р. Сож Чечерского района спустя 36 лет после катастрофы на ЧАЭС</i>	10
Дроздова Н.И., Аверин В.С. <i>Исследование инвертазной и протеазной активности почвы территорий, сопредельных с полигонами твердых коммунальных отходов</i>	15
Калиниченко С.А., Калинин В.Н., Забродский В.Н. <i>Оценка параметров ресуспензии радионуклидов при выполнении мероприятий по содержанию территории зоны отчуждения ЧАЭС</i>	21
Ковалёва О.В., Соколов А.С., Карпенко А.Ф. <i>Динамика Новой климатической зоны на территории Беларуси</i>	28
Надина Н.Г., Акимова Л.Н. <i>Дигенеи чужеродного вида гастропод <i>Lithoglyphus naticoides</i> на территории ППРЭЗ</i>	33
Островский О.А., Дмитренко М.Г., Пакуль П.А., Тарантович М.В. <i>Охраняемые виды птиц Рогачёвского района</i>	39
Хох А.Н., Звягинцев В.Б. <i>Аномалии структуры годичных слоев сосны обыкновенной в зависимости от типа леса</i>	44
Храмченкова О.М. <i>Антирадикальная активность экстрактов из лишайников</i>	51
Цуриков А.Г., Болсун И.М. <i>Лихенобиота агрогородка Полесье Чечерского района</i>	56
Шаладонова М.И. <i>Компьютерные программы для генерации конформаций лигандов – потенциальных лекарственных препаратов</i>	62

ИНФОРМАТИКА

Прохоренко В.А. <i>Система адаптивного управления технологическим циклом автоматизированного производства</i>	69
---	----

МАТЕМАТИКА

Бычков П.В., Каморников С.Ф., Тютянов В.Н. <i>О центре разрешимого графа некоторых простых неабелевых групп лиева типа</i>	74
Монахов В.С., Сохор И.Л. <i>Конечные группы с пермутируемыми и с-достижимыми подгруппами</i>	79

Юань Юань, Махнев А.А., Белоусов И.Н. <i>Q-полиномиальные графы Шилла с массами пересечений</i> $\{42, 30, 12; 1, 6, 28\}$ и $\{105, 72, 24; 1, 12, 70\}$ не существуют.....	86
--	----

ФИЗИКА

Никитюк Ю.В., Семченко А.В., Прохоренко В.А., Сидский В.В., Данильченко К.Д. <i>Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования свойств полупроводниковых золь-гель слоев Zn_xMg_yO</i>	94
Семченко И.В., Хахомов С.А., Самофалов А.Л., Сомов П.В., Кравченко А.Ю. <i>Разработка модели эквивалентной электрической схемы двойной ДНК-подобной планарной спирали</i>	99
Хахомов С.А., Самофалов А.Л., Фаняев И.А., Семченко И.В., Тимошенко А.А. <i>Расчет параметров метаматериала для получения кросс-поляризационного полного отражения при отсутствии прохождения и поглощения электромагнитных волн</i>	106

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Бородич Р.В., Селькин М.В., Бородич Е.Н., Бузланов А.В., Блинец И.В. <i>О пересечении ненильпотентных максимальных подгрупп в группах с операторами</i>	111
Гончаренко Г.Г. <i>К 95-летию юбилею академика Любови Владимировны Хотылевой</i> . ..	114
Гончаренко Г.Г., Зятьков С.А. <i>Видовая идентификация особей близких видов имелей с использованием митохондриального гена COI</i>	116
Саварин А.А. <i>Регистрация мест обитаний куторы малой (<i>Neotus apotatus</i> Cabrera, 1907) в Ушачском районе Витебской области</i>	118

ОБСУЖДЕНИЯ

Говор Г.В. <i>Решение геометрической задачи «квадратура круга» построением с помощью циркуля и линейки без шкалы с делениями</i>	121
--	-----

ПЕРСОНАЛИИ

Васильев А.Ф. <i>Селькин Вадим Михайлович (к 30-летию научно-педагогической деятельности)</i>	126
---	-----

PROCEEDINGS

of Francisk Skorina Gomel State University

SCIENTIFIC, PRODUCTION AND PRACTICAL JOURNAL

Published since 1999

Released bimonthly

• 2023, № 3 (138) •

NATURAL SCIENCES:

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

• MATHEMATICS • PHYSICS

CONTENTS

BIOLOGY

Gulakov A.V., Drozdov D.N., Ivantsov D.N. <i>Formation of the absorbed dose of radiation in the native ichthyofauna of stagnant water bodies of the Polesky radiation-ecological reserve</i>	5
Daineko N.M., Timofeev S.F. <i>Radiological analysis of meadow vegetation in the floodplain of the river Sozh, Chechersk region, 36 years after the Chernobyl disaster</i>	10
Drozdova N.I., Averin V.S. <i>Study of invertase and protease activity of the soil of territories adjacent to solid municipal waste landfills</i>	15
Kalinichenko S.A., Kalinin V.N., Zabrotski V.N. <i>Evaluation of the parameters of resuspension of radionuclides during the implementation of measures to maintain exclusion zone of the CNPP...</i>	21
Kavaliova O.V., Sokolov A.S., Karpenko A.F. <i>The New climatic zone dynamics in the territory of Belarus</i>	28
Nadina N.G., Akimova L.N. <i>Digeneans of an alien gastropod species Lithoglyphus naticoides on the territory of PSRER</i>	33
Ostrovsky O.A., Dmitrenok M.G., Pakul P.A., Tarantovich M.V. <i>Protected bird species of the Rogachev district</i>	39
Khokh A.N., Zviagintsev V.B. <i>Anomalies in the structure of annual layers of Scots pine depending on the type of forest</i>	44
Khramchankova V.M. <i>Antiradical activity of lichen extracts</i>	51
Tsurikov A.G., Bolsun I.M. <i>Lichen biota of the agricultural town of Polesie, Chechersk district</i>	56
Shaladonova M.I. <i>Computer programs for the generation of conformations of ligands – potential medicines</i>	62

INFORMATION TECHNOLOGY

Prokhorenko V.A. <i>Adaptive control system for the technological cycle of automated production</i>	69
---	----

MATHEMATICS

Bychkov P.V., Kamornikov S.F., Tyutyanov V.N. <i>On the center of a solvable graph of some simple non-abelian groups of Lie type</i>	74
Monakhov V.S., Sokhor I.L. <i>Finite groups with permutal and c-reachable subgroups</i>	79
Yuan Yuan, Makhnev A.A., Belousov I.N. <i>Q-polynomial Shilla graphs with intersection arrays $\{42, 30, 12; 1, 6, 28\}$ and $\{105, 72, 24; 1, 12, 70\}$ do not exist</i>	86

PHYSICS

Nikityuk Yu.V., Semchenko A.V., Prokhorenko V.A., Sidsky V.V., Danilchenko K.D. <i>Application of artificial neural networks to predict the properties of Zn_xMg_yO semiconductor sol-gel layers</i>	94
Semchenko I.V., Khakhomov S.A., Samofalov A.L., Somov P.V., Kravchenko A.Yu. <i>Development of a model of the equivalent electrical circuit of a double DNA-like planar spiral</i>	99
Khakhomov S.A., Samofalov A.L., Faniaev I.A., Semchenko I.V., Timoshenko A.A. <i>Calculation of metamaterial parameters for obtaining cross-polarizing total reflection in the absence of transmission and absorption of electromagnetic waves</i>	106

ABSTRACTS

Borodich R.V., Selkin M.V. , Borodich E.N., Buzlanov A.V., Bliznets I.V. <i>On the intersection of non-nilpotent maximal subgroups in groups with operators</i>	111
Goncharenko G.G. <i>To the 95th anniversary of Academician Lyubov Vladimirovna Khotyleva</i>	114
Goncharenko G.G., Ziatkov S.A. <i>Species identification of individuals of related bumblebee species using the mitochondrial COI gene</i>	116
Savarin A.A. <i>Registration of Mediterranean water shrew (<i>Neomys anomalus</i> Cabrera, 1907) habitats in the Ushachy district of the Vitebsk region</i>	118

DISCUSSIONS

Govor G.V. <i>The solution of the geometric problem «squaring a circle» by construction using a compass and a ruler without a scale with divisions</i>	121
--	-----

PERSONALITY

Vasiliev A.F. <i>Selkin Vadim Mikhailovich (to the 30th anniversary of scientific and pedagogical activity)</i>	126
---	-----

Биология

57.04:535.231.16:597.551.2:556.555(476.2)

Формирование поглощенной дозы облучения у аборигенной ихтиофауны непроточных водоемов Полесского радиационно-экологического заповедника

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

В статье приводятся результаты анализа радиоэкологического состояния аборигенной ихтиофауны закрытого водного объекта, расположенного на территории Полесского радиационно-экологического заповедника. В ходе исследований установлено, что средний уровень мощности поглощенной дозы облучения у ихтиофауны видов озера Семеница была 0,108 мГр/сут. Средняя мощность дозы придонных бентофагов составила $0,082 \pm 0,019$ мГр/сут, пелагических хищников $0,134 \pm 0,012$ мГр/сут. Внешнее облучение вносит 20 %, а внутреннее 80 % в суммарную дозу облучения. Радионуклиды ^{137}Cs обуславливают формирование дозы внешнего и внутреннего облучения на 37,7 %, радионуклиды ^{90}Sr на 62,3 %. Формирование дозы внешнего облучения обуславливают радионуклиды ^{137}Cs донных отложений, вклад которых в суммарную дозу облучения составляет более 95 %, в организме радионуклиды ^{90}Sr обуславливают до 60 % дозы внутреннего облучения. Уровень суммарной мощности поглощенной дозы облучения от ^{137}Cs и ^{90}Sr для исследованного водного объекта не выходит за нижний предел скрининговой величины, и не влияет на увеличение частоты дозовых эффектов в популяциях исследованных видов.

Ключевые слова: поглощенная доза, ихтиофауна, водный объект, удельная активность.

The article presents the results of the analysis of the radioecological state of the native ichthyofauna of a closed water body located on the territory of the Polesky radiation-ecological reserve. In the course of the research, it was found that the average level of the absorbed dose rate in the ichthyofauna of the species of Lake Semenița was 0,108 mGy/day. The average dose rate for benthic benthivorous predators was $0,082 \pm 0,019$ mGy/day, for pelagic predators it was $0,134 \pm 0,012$ mGy/day. External irradiation contributes 20 %, and internal 80% to the total radiation dose. ^{137}Cs radionuclides determine the formation of external and internal exposure dose by 37,7 %, ^{90}Sr radionuclides by 62,3 %. The formation of the external exposure dose is caused by ^{137}Cs radionuclides of bottom sediments, whose contribution to the total exposure dose is more than 95 %; in the body, ^{90}Sr radionuclides determine up to 60 % of the internal exposure dose. The level of the total absorbed dose rate from ^{137}Cs and ^{90}Sr for the studied water body does not go beyond the lower limit of the screening value, and does not affect the increase in the frequency of dose effects in the populations of the studied species.

Keywords: absorbed dose, ichthyofauna, water body, specific activity.

Введение. Радиоактивное загрязнение территории Юго-Восточного Белорусского Полесья привело к экологической трансформации компонентов биогеоценозов региона. На водосборных территориях Днепра и Припяти вследствие Чернобыльской катастрофы сформировалась обширная зона загрязнения, что привело к поступлению радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr во многие водоемы, находящиеся на пострадавших территориях. В настоящее время радионуклиды ^{137}Cs и ^{90}Sr регистрируются во всех компонентах экосистем, они вовлечены в геохимические и трофические циклы. Радионуклиды ^{137}Cs и ^{90}Sr являются постоянными участниками биогеохимических процессов, включены в трофические цепи питания, обладают способностью к аккумуляции в разных трофических звеньях, поэтому могут являться дополнительным источником опасности для населения пострадавших территорий [1], [2].

Важное значение для процессов аккумуляции и миграции радионуклидов имеют водные объекты с низким темпом очищения – это непроточные озера, малопроточные старичные водоемы и каналы мелиоративной сети. Наблюдения за водными объектами закрытого типа показывают, что динамика накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr водными растениями и ихтиофауной определяется совокупностью гидрохимических особенностей экосистемы и морфофизиологией макрофитов и ихтиофауны. Накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr высшими водными растениями и

ихтиофауной обуславливают характер формирования грунтов, форму нахождения радионуклида в донных отложениях, особенности ландшафта водосборных территорий пресноводных гидробиоценозов, минерализацию водоема, концентрацию калия и кальция в воде [3].

В процессе миграции источников радиоактивного излучения по трофической цепи происходит аккумуляция радионуклидов в направлении от бентофагов к хищникам. В результате хищные виды рыб, рыбы со смешанным типом питания и придонные бентофаги непроточных и малопроточных водных объектов могут иметь различия в формировании поглощенной дозы внутреннего облучения. В этой связи научный и практический интерес представляет исследование динамики формирования поглощенной дозы внутреннего облучения у разных видов ихтиофауны непроточных водоемов, расположенных на территории радиоактивного загрязнения юго-восточных районов Белорусского Полесья.

Целью работы являлось исследование закономерностей формирования поглощенной дозы облучения у аборигенной ихтиофауны непроточных водоемов, расположенных на территории радиоактивного загрязнения.

Материалы и методы исследования. Для достижения цели исследования использовались данные удельной активности, полученные в ходе мониторинга водных биогидроценозов, расположенных на территории Полесского радиационно-экологического заповедника. Сбор данных удельной активности аборигенных видов ихтиофауны производился в 2018–2021 гг. в летне-осенний период. В качестве стационарных участков для изъятия и последующего спектрометрического анализа образцов выбраны непроточные водные объекты оз. Семеница. Озеро старичного типа находится на юго-запад от города Хойники вблизи нежилого населенного пункта Хвощевка; относится к бассейну реки Припять. Площадь зеркала около 0,21 км², длина 2,3 км, ширина 0,17 км, длина береговой линии 7,8 км. На рисунке 1 обозначено местоположение и географические координаты участка изъятия рыб и отбора проб воды и донных отложений. Для изъятия использовали трехстенные сети «Нептун», длиной 30 м, высотой 1,8 м, размер ячеей 30–70 мм; в момент лова устанавливали 2–8 сетей с разным размером ячеей. Определяли вид, пол, возраст рыб и видовой состав согласно методике [4]–[6].

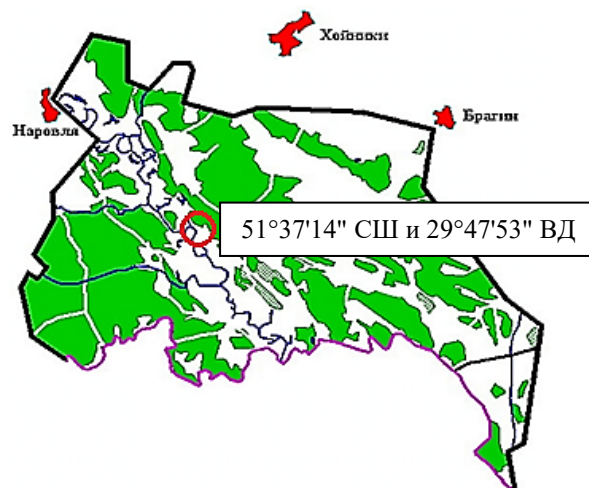


Рисунок 1 – Карта-схема места отбора проб

Для определения плотности радиоактивного загрязнения территории водного объекта проводили отбор образцов воды и донных отложений на расстоянии 50–100 см от уреза воды на глубине 30–50 см с помощью стандартного пробоотборника. Согласно [7] основное количество радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr депонируется в донных отложениях, повышенная миграция ⁹⁰Sr – 4–10 % обусловлена более высоким содержанием его в воде в сравнении с ¹³⁷Cs, 0,5–0,6 %.

Удельную активность изъятых образцов определяли методом спектрометрического анализа в лаборатории спектрометрии и радиохимии Полесского государственного радиационно-экологического заповедника; для определения активности использовали гамма-бета спектрометр МКС-АТ1315 и гамма-спектрометр «Canberra Industrias Inc». Определение

удельной активности радионуклидов производилось на килограмм сырой массы образца; относительная активность измерения в образцах не превышала 30 %. На основании значений удельной активности производился расчет поглощенной дозы внутреннего облучения на организм рыб. В ходе расчета поглощенной дозы исходили из того, что радионуклиды ^{137}Cs находились в равновесии, концентрация радионуклида в течение года не изменялась; ^{90}Sr накапливается преимущественно в костной ткани [8].

Оценку поглощенной дозы внутреннего облучения от инкорпорированных ^{137}Cs и ^{90}Sr проводили в соответствии с Рекомендациями P52.18.820-2015 «Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки» [9]. Полный вклад в мощность дозы облучения пресноводного объекта водной биоты определяли путем сложения дозы внутреннего облучения (D_{int}) инкорпорированных радионуклидов и суммы доз внешнего облучения от радионуклидов, содержащихся в воде (D_{ext_1}) и донных отложениях (D_{ext_2}):

$$D = D_{\text{int}} + D_{\text{ext}_1} + D_{\text{ext}_2}$$

Для расчетов использовали табличные значения факторов дозовой конверсии для внутреннего и внешнего облучения пресноводных рыб [7]. Для оценки мощности дозы внутреннего облучения от радионуклидов ^{137}Cs использовали фактор дозовой конверсии $1,9 \cdot 10^{-4}$ (мкГр/ч)/(Бк/кг сырого веса), ^{90}Sr $6,3 \cdot 10^{-4}$ (мкГр/ч)/(Бк/кг). Для оценки мощности дозы внешнего облучения в воде и донных отложениях использовали фактор дозовой конверсии $2,9 \cdot 10^{-4}$ (мкГр/ч)/(Бк/кг). Исследование включало оценку достоверности различий средних доз облучения рыб разных видов и трофических групп. Для оценки достоверности использовали методы параметрической статистики для статистической значимости $p \leq 0,05$. Обработка данных проводилась с помощью пакета прикладных программ *Statistica 10.0*.

Результаты исследований и их обсуждение. Ихтиофауна озера Семеница по происхождению связана с бассейном р. Припять. Анализ результатов исследования [9] показал, что в ее водах зарегистрировано 14 видов рыб, относящихся к 4 отрядам: карпообразные (Cypriniformes), окунеобразные (Perciformes), щукообразные (Esociformes), сомообразные (Siluriformes). За период проведения работ получены результаты удельной активности мышечной ткани и кости для 13 видов рыб (возраст 2 – 10 лет), относящихся к разным экологическим группам.

Проведен анализ данных облигатных и факультативных хищников: щука обыкновенная (*Esox lucius* L.), жерех (*Aspius aspius* L.), окунь обыкновенный (*Perca fluviatilis* L.). Среди «мирных» видов исследовались бентофаги карась серебряный (*Carassius auratus gibelio* B.), густера обыкновенная (*Blicca bjoerkna* L.), лещ (*Abramis brama* L.).

Среднее содержание радионуклидов в организме рыб разных трофических групп приведено в таблице 1.

Из данных, приведенных в таблице 1 видно, что между придонными бентофагами и пелагическими хищными рыбами имеются различия содержания радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr . Средняя удельная активность радионуклидов ^{137}Cs в организме придонных бентофагов составляет $59,0 \pm 20,9$ Бк/кг, в организме пелагических хищников $167,3 \pm 38,6$ Бк/кг. Распределение удельной активности радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в организме придонных бентофагов и пелагических хищников подчиняется нормальному закону. Между удельной активностью радионуклидов ^{137}Cs в организме придонных бентофагов и пелагических хищников установлено достоверное различие ($p = 0,0071$).

Таблица 1 – Содержание радиоизотопов ^{137}Cs и ^{90}Sr в организме рыб

Вид	Тип питания	Удельная активность, Бк/кг	
		^{137}Cs	^{90}Sr
Густера	Бентофаг	46	111
Карась серебряный	Бентофаг	52	133
Лещ	Бентофаг	79	72
Жерех	Пери/зоофаг	183	118
Щука	Зоофаг	130	106
Окунь	Зоофаг	189	88

Средняя удельная активность радионуклидов ^{90}Sr в организме придонных бентофагов составляет $105,3 \pm 36,7$ Бк/кг, в организме пелагических хищников $104,0 \pm 18,0$ Бк/кг. Между средней удельной активностью радионуклидов ^{90}Sr в организме придонных бентофагов и пелагических хищников не установлено достоверное различие ($p = 0,9497$).

В таблице 2 представлены данные мощности поглощенной дозы придонных бентофагов и пелагических хищников озера Семеница.

Таблица 2 – Поглощенная доза облучения некоторых видов рыб озера Семеница

Вид	Тип питания	Доза облучения, мГр/сут				Суммарная доза облучения, мГр/сут
		внешняя		внутренняя		
		¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	
Густера	Бентофаг	3,39E-03	1,15E-03	0,009	0,070	0,083
Карась сер.	Бентофаг	3,39E-03	1,15E-03	0,010	0,084	0,098
Лещ	Бентофаг	3,39E-03	1,15E-03	0,015	0,045	0,065
Жерех	Пери/зоофаг	3,51E-02	1,31E-03	0,035	0,074	0,145
Щука	Зоофаг	3,51E-02	1,31E-03	0,025	0,067	0,128
Окунь	Зоофаг	3,51E-02	1,31E-03	0,036	0,055	0,128

Из данных, приведенных в таблице 2 видно, что средний уровень мощности поглощенной дозы облучения у ихтиофауны видов озера Семеница составляет 0,108 мГр/сут. Средняя мощность дозы придонных бентофагов составила $0,082 \pm 0,019$ мГр/сут, пелагических хищников $0,134 \pm 0,012$ мГр/сут. Внешнее облучение вносит 20 %, а внутреннее 80 % в суммарную дозу облучения. Радионуклиды ^{137}Cs обуславливают формирование дозы внешнего и внутреннего облучения на 37,7 %, радионуклиды ^{90}Sr на 62,3 %. Формирование дозы внешнего облучения обуславливают радионуклиды ^{137}Cs донных отложений, вклад которых в суммарную дозу облучения более 95 %, в организме радионуклиды ^{90}Sr обуславливают до 60 % дозы внутреннего облучения.

Сравнительный анализ мощности поглощенной дозы придонных бентофагов и пелагических хищников показал достоверное различие величины дозы ($p < 0,05$). Для пелагических хищников долевым вкладом от ^{90}Sr составил 57 %, для придонных видов 43 %. Дисперсионный анализ показал, что фактор пищевого поведения рыб в замкнутом водоеме обуславливает до 60 % формирования дозы внутреннего облучения от инкорпорированных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr ($p < 0,05$) и до 40 % от содержания этих радионуклидов в воде и донных отложениях ($p < 0,05$).

Заключение. Анализ данных исследования радиозэкологического состояния аборигенной ихтиофауны придонных и пелагических видов рыб закрытого водного объекта озера Семеница показал достоверные различия средних значений поглощенных доз облучения ($p < 0,05$). Средняя мощность поглощенной дозы придонных бентофагов составила $0,082 \pm 0,019$ мГр/сут, пелагических хищников $0,134 \pm 0,012$ мГр/сут. Основной вклад в формирование поглощенной дозы внешнего облучения вносят радионуклиды ^{137}Cs и ^{90}Sr донных отложений (до 95 %). Вклад в суммарную дозу облучения от радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr от дозы внутреннего облучения у придонных бентофагов и пелагических хищников различается ($p < 0,05$). У придонных бентофагов поступление в организм ^{137}Cs обуславливает 13,4 % суммарной дозы облучения, у пелагических хищников 23,9 %. Поступление в организм придонных бентофагов ^{90}Sr обуславливает 80,5 %, в организм пелагических хищников 49,3 % суммарной дозы облучения. Вместе с тем проведенная оценка показывает, что уровень суммарной мощности поглощенной дозы облучения от ^{137}Cs и ^{90}Sr для исследованного водного объекта не выходит за нижний предел скрининговой величины и не влияет на увеличение частоты дозовых эффектов в популяциях исследованных видов.

Литература

1. Радиозэкологические 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.

2. Кузьменко, М. І. Техногенні радіонукліди у прісноводних екосистемах / М. І. Кузьменко, Д. І. Гудков, С. І. Кіреєв – К. : Наукова думка, 2010. – 263 с.
3. Жуков, П. И. Справочник по экологии пресноводных рыб / П. И. Жуков – Мн. : Наука и техника, 1988. – 310 с.
4. Правдин, И. Ф. Руководство по изучению рыб / И. Ф. Правдин – М. : Пищевая промышленность, 1966. – 374 с.
5. Брюзгин, В. Л. Методы изучения рыб по чешуе, костям и отолитам / В. Л. Брюзгин – Киев : Наукова думка, 1969. – 187 с.
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.
7. 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 научно-практическая конференция, Гомель, 2–3 июня 2022 г. : сборник материалов / М-во образования 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.
8. Рекомендации Р52.18.820-2015 Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки. – Обнинск, 2015 – 65 с.
9. Иванцов, Д. Н. База данных радиологических исследований животных / Д. Н. Иванцов // Трансграничное сотрудничество в области экологической безопасности и охраны окружающей среды : VI Международная научно-практическая конференция, Гомель, 2–3 июня 2022 г. : сборник материалов / М-во образования Республики Беларусь, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол.: А. П. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2022. – С. 42–47.

¹Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

²Полесский государственный
радиационно-экологический заповедник

Поступила в редакцию 03.03.2023

УДК 57.04:504.5:628.4.047:539.16.04:581.526.43(282.247.321.7)(476.2-37Чечерск)

Радиологический анализ луговой растительности в пойме р. Сож Чечерского района спустя 36 лет после катастрофы на ЧАЭС

Н.М. ДАЙНЕКО, С.Ф. ТИМОФЕЕВ

Наибольшее содержание цезия-137 было выявлено в почвенном слое 0–10 см. Максимальная его активность составила 5145 Бк/кг, минимальная – 266 Бк/кг. Для слоя 10–20 см эти параметры составили соответственно 2502 Бк/кг и 39 Бк/кг. Содержание радиоцезия в травостое варьирует от 40 до 98 Бк/кг при среднем значении 457 Бк/кг. Коэффициент накопления изменялся в широких пределах: от 0,02 до 2,33.

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

The highest content of the ^{137}Cs radionuclide was found in the 0–10 cm soil layer. The maximum value was 5145 Bq/kg while the minimum was 266 Bq/kg. For a soil layer of 10–20 cm, these parameters were 2502 Bq/kg and 39 Bq/kg, respectively. The content of radiocesium in herbs varied from 40 to 98 Bq/kg with an average value of 457 Bq/kg. The accumulation coefficient varied over a wide range, from 0,02 to 2,33.

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

Введение. Пойменные луга являются наиболее ценными естественными кормовыми угодьями. Значительные площади пойменных лугов имеются в пойме р. Сож, которые используются для сенокоса и выпаса. 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]–[5].

После катастрофы на Чернобыльской АЭС основой для оценки радиологической ситуации в естественных экосистемах служат данные о загрязнении почвы и наземной фитомассы долгоживущими радионуклидами. Наиболее загрязненными в Гомельской области оказались пойменные луга р. Сож. Несмотря на то, что после катастрофы прошло почти 36 лет, вопросы изучения радиоактивного загрязнения поймы реки и долгосрочный прогноз снижения плотности загрязнения почвы цезием-137 остаются актуальными. В связи с этим соответствующие работы проводят как на территории РФ так и на территории РБ [6]–[9].

Целью исследования являлась радиологическая оценка состояния луговых экосистем в пойме р. Сож Чечерского района спустя 36 лет после катастрофы на ЧАЭС.

Материалы и методы исследования. Объектом исследований служили почвенные пробы и растительные образцы наземной фитомассы луговых растений, отобранные в вегетационный период 2022 г. в фазу колошения видов-доминантов в пойме р. Сож на луговых ассоциациях *Glyceria maximae*-*Caricetum acutae* и *Deschampsietum cespitosae* 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. Длина около 4000 метров. Ширина в наиболее узкой части 130 метров, наиболее широкой части около 1800 метров (рисунок 1).



Рисунок 1 – Схема пойменного луга р. Сож в окрестностях н.п. Отор Чечерского района

Поперечный профиль пойменного луга имеет следующие параметры. Высота надпойменной террасы 125 метров, самое низкое место 119 метров. Перепад высот около 6 метров. Максимальный уклон не превышает – 3 %.

Территория н.п. Отор находится в зоне радиоактивного загрязнения 5–15 Ки/км².

Результаты исследований. Анализ результатов исследований показал, что, как правило, наибольшее содержание радионуклида было выявлено в слое 0–10 см. Максимальное значение составило 5145 Бк/кг, минимальное – 266 Бк/кг. Для слоя 10–20 см эти параметры составили соответственно 2502 и 39 Бк/кг (таблица 1).

Таблица 1 – Распределение ¹³⁷Cs по слоям, 2022 г, Бк/кг

Площадка \ Слой	1	2	3	4	6	7	8	11	14	15	16
0–10 см	266	1184	1488	2109	1559	2880	702	5145	2008	821	1091
10–20 см	1748	817	157	1288	931	214	144	2502	48	39	65

Среднее содержание радионуклида в почве варьировало от 423 Бк/кг на площадке 8 до 3823 Бк/кг на площадке 11. В пересчете на плотность радиоактивного загрязнения эти величины составили 3 и 26 Ки/км².

Для более корректной оценки распределения радиоцезия по слоям почвы произвели пересчет результатов и отразили в виде гистограммы (рисунок 2).

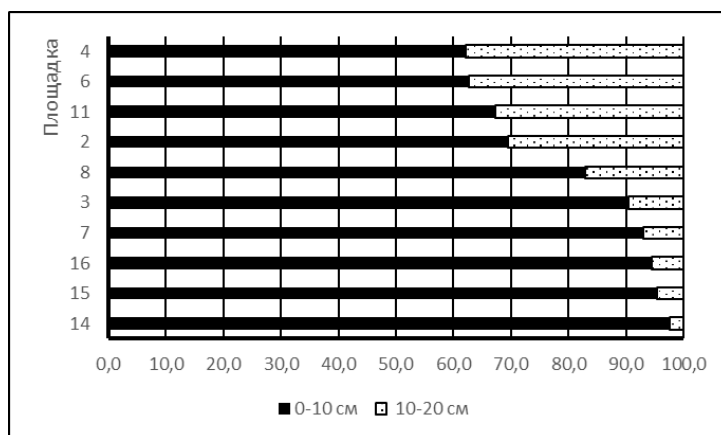


Рисунок 2 – Распределение радионуклида по слоям почвы, %

В большинстве проб основное количество радионуклида, более 80 %, находится в слое 0–10 см. В остальных пробах почвы в слое 0–10 см содержится 60–70 % радиоцезия. В слое 10–20 см выявлено от 3 до 30 % элемента.

Отсюда следует, что 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.

Исследования показали, что речная долина имеет достаточно ровную поверхность с уступами параллельными течению р. Сож.

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

Содержание радиоцезия в травостое варьирует от 40 до 986 Бк/кг при среднем значении 457 Бк/кг. Превышения нормативов (1300 Бк/кг) по данному параметру не установлено.

Анализ содержания радиоцезия в луговых растениях выявил, что наибольшая удельная активность отмечалась у представителей семейства осоковых – осоки лисьей и представителей семейства злаковых – щучки дернистой. Также в этом семействе высокая удельная активность наблюдалась у бекмании обыкновенной и полевицы тонкой. В среднем, удельная активность семейства злаковых составила 510,3 Бк/кг, а у представителей семейства осоковых 512,6 Бк/кг, у представителей лугового разнотравья – 452 Бк/кг.

В семействе злаковых разница между минимальной удельной активностью у полевицы побегообразующей и максимальной у щучки дернистой составила 887 Бк/кг, а разница между осокой лисьей на площадке № 8 и осокой лисьей на площадке № 9 составила 877 Бк/кг. Среди лугового разнотравья минимальная удельная активность отмечена у поручейника широколистного, а максимальная удельная активность наблюдалась у лапчатки гусиной. Разница составляет 730 Бк/кг (рисунок 3).

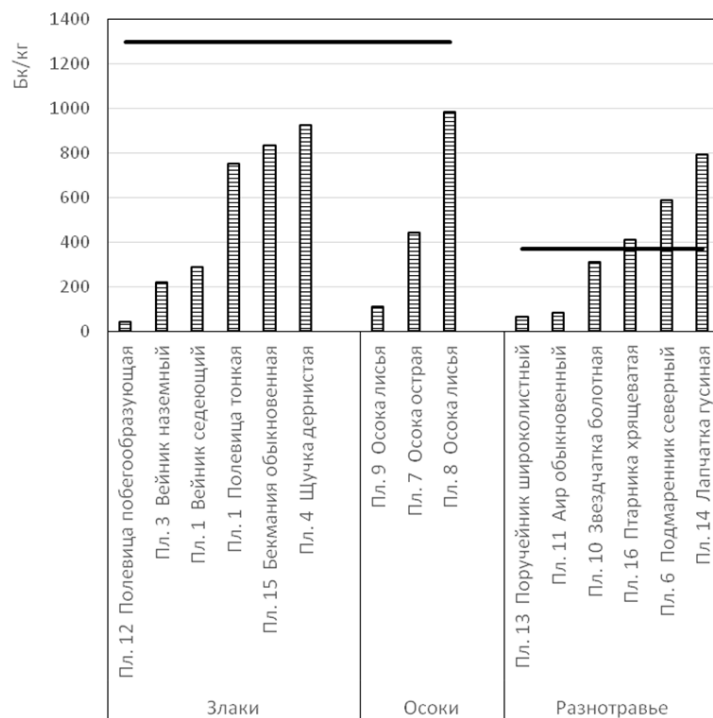


Рисунок 3 – Содержание радиоцезия в надземной фитомассе луговых растений различных агроботанических групп в пойме р. Сож, 2022 г.

Как видно из рисунка 3, удельная активность травостоя не превышала 1300 Бк/кг, и данный зеленый корм может использоваться для кормления сельскохозяйственных живот-

ных. Радиологический анализ надземной фитомассы изучаемых растений показал, что как лекарственное сырье три вида растений: птармика хрящеватая, подмаренник северный и лапчатка гусиная по удельной активности превышали РДУ/ЛТС-2004 (Республиканский допустимый уровень лекарственно-технического сырья – 370 Бк/кг) в 1,1–2,2 раза.

Важнейшим параметром позволяющим оценить миграцию радионуклида в системе почва–растение является коэффициент накопления или КН (характеризует отношение содержания радионуклида в единице массы растения (Бк/кг) к содержанию радионуклида в единице массы почвы (Бк/кг)). Этот параметр изменялся в широких пределах: от 0,02 до 2,33. Средняя величина составляла 0,81 Бк/кг:Бк/кг. Из 15 видов растений 13 растений имеют КН до 1,00. У трех видов КН более 1,00 (рисунок 4).

Таким образом, травостой пойменного луга нуждается как минимум в поверхностном улучшении.

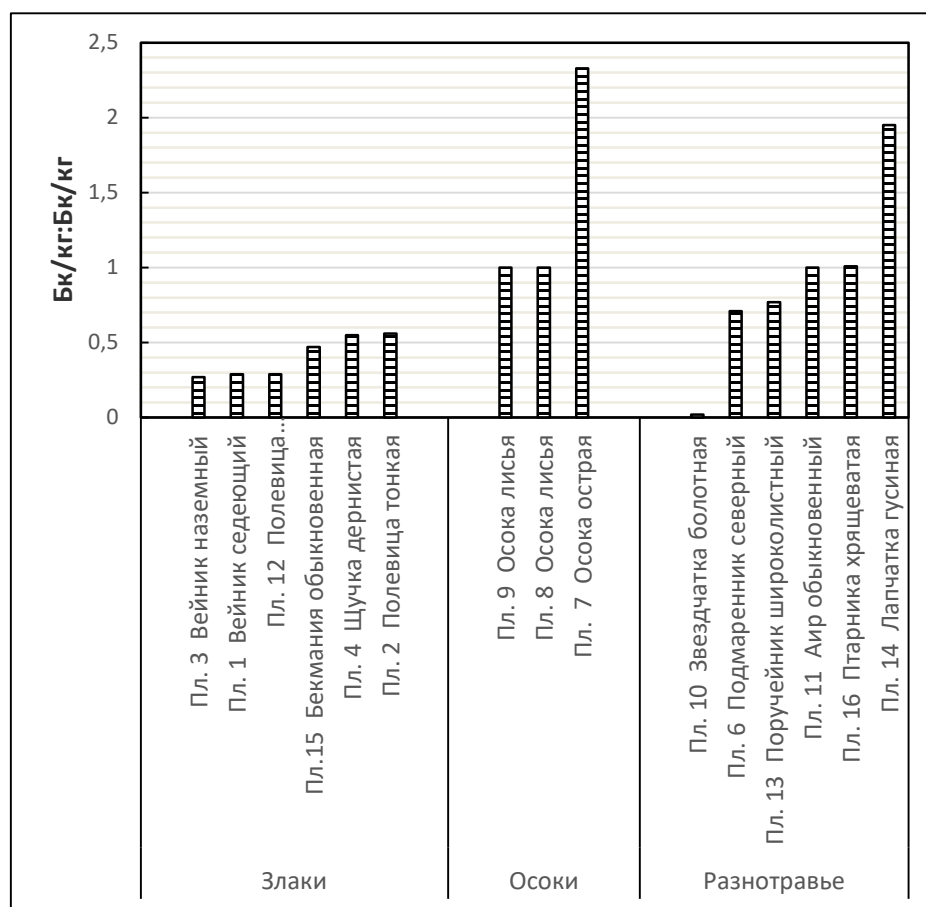


Рисунок 4 – Коэффициенты накопления радиоцезия луговыми растениями поймы р. Сож в окрестностях н.п. Отор Чечерского района

Заключение. Установлено, что в настоящее время 60–80 % радионуклида содержится в слое почвы 0–10 см, а в слое 10–20 см выявлено от 3 до 30 % элемента. Наибольшая удельная активность радиоцезия отмечалась у осоки лисьей – 986 Бк/кг и у щучки дернистой – 927 Бк/кг, а минимальная – у полевицы побегообразующей – 40 Бк/кг и поручейника широколистного – 65 Бк/кг. Проведенный анализ коэффициентов накопления радионуклидов в растениях на видовом уровне показал, что минимальное значение было у полевицы тонкой – 0,02, а максимальное у осоки острой – 2,33.

Удельная активность травостоя не превышала 1300 Бк/кг, и данный зеленый корм может использоваться для кормления сельскохозяйственных животных. Три вида растений, птармика хрящеватая, подмаренник северный и лапчатка гусиная, по содержанию радиоцезия превышали Республиканский допустимый уровень для лекарственно-технического сырья в 1,1–2,2 раза.

Литература

1. Почвы Белорусской ССР / Под ред. чл.-корр. АН БССР Т. Н. Кулаковской, акад. АН БССР П. П. Рогового и канд. с.-х. наук Н. И. Смеяна. – Минск : «Ураджай», 1974. – 328 с.
2. Почвоведение с основами геологии : учеб. пособие / А. И. Горбылева, Д. М. Андреева, В. Б. Воробьев [и др.] ; под ред. А. И. Горбышевой. – Минск : Новое знание, 2002. – 480 с.
3. География почв / Г. В. Добровольский, И. С. Урусевская. – М. : Колос, 2004. – 460 с.
4. Сапегин, Л. М. Влияние минеральных удобрений на продуктивность и ценопопуляционную структуру травостоя некоторых луговых экосистем поймы р. Сож пригорода г. Гомеля / Л. М. Сапегин, Н. М. Дайнеко, С. Ф. Тимофеев // Экологический вестник. – 2009. – № 2 (9). – С. 120–128.
5. Дайнеко, Н. М. Состав и структура пойменных лугов бассейна р. Сож : монография / Н. М. Дайнеко, С. Ф. Тимофеев. – Чернигов : Десна Полиграф, 2020. – 208 с.
6. Крупномасштабное агрохимическое и радиологическое обследование почв сельскохозяйственных угодий Беларуси. Методические указания / И. М. Богдевич (науч. ред.). – 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.

Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 24.02.2023

Исследование инвертазной и протеазной активности почвы территорий, соприкасающихся с полигонами твердых коммунальных отходов

Н.И. Дроздова, В.С. Аверин

Рассмотрена возможность использования инвертазной и протеазной активности ферментов почвы для оценки состояния территорий, соприкасающихся с полигонами твердых коммунальных отходов. На основании результатов парного корреляционного анализа установлен характер связи между активностью инвертазы и протеазы и некоторыми физико-химическими показателями почвы. Установлено, что активность инвертазы в 2021–2022 гг. характеризовалась слабым и средним уровнями, что может свидетельствовать о нарушенном состоянии почвы территорий, соприкасающихся с полигонами твердых коммунальных отходов.

Ключевые слова: полигоны твердых коммунальных отходов, почвы, биологическая активность, протеаза, инвертаза, тяжелые металлы, физико-химические показатели почвы, корреляция.

The possibility of using the invertase and protease activity of soil enzymes to assess the state of territories adjacent to municipal solid waste landfills is considered. Based on the results of paired correlation analysis, the nature of the relationship between the activity of invertase and protease and some physicochemical parameters of the soil was established. It was found that the activity of invertase in 2021–2022 was characterized by low and medium levels, which may indicate a disturbed state of the soil of the territories adjacent to solid municipal waste landfills.

Keywords: solid municipal waste landfills, soils, biological activity, protease, invertase, heavy metals, physico-chemical indicators of soil, correlation.

В настоящее время в Республике Беларусь, как и во многих других странах, самым распространенным методом обезвреживания отходов производства и потребления остается захоронение. В Беларуси насчитывалось около 164 полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО), из них 29 – на территории Гомельской области. Техногенные геохимические аномалии, формирующиеся в зонах влияния полигонов, как правило, имеют комплексный характер: загрязнению подвергаются все компоненты ландшафта – атмосферный воздух, поверхностные и подземные воды, почвы и растительность. По данным Н.А. Лысухо [1], значительная часть эксплуатируемых на территории Гомельской области полигонов ТКО была введена в эксплуатацию до 1991 г., когда начала формироваться законодательная база по вопросам обращения с отходами. Такие полигоны часто не имеют экологических паспортов и природоохранных сооружений, что может приводить к ситуациям значительного распространения загрязнений за пределы санитарно-защитных зон (СЗЗ). На соприкасающихся с СЗЗ территориях часто располагаются объекты хозяйствования, в том числе, сельскохозяйственные угодья, зоны выпаса скота, селитебные зоны. Сказанное выше определяет актуальность проведения исследований соприкасающихся территорий, не входящих в зону локальных мониторинговых наблюдений.

Ряд исследователей (Д.Г. Звягинцев, Ф.Х. Хазиев, К.Ш. Казеев, С.И. Колесников и др.) [2]–[5] отмечают перспективность использования показателей ферментативной активности почвы для ранней диагностики изменения состояния компонентов биогеосистемы. Это связано с тем, что ферментативная активность почвы является в основном результатом жизнедеятельности почвенной микробиоты и растений и ранее других почвенных показателей отражает происходящие в системе изменения. Кроме того, активность многих ферментов четко коррелирует с определенным уровнем загрязнения, что делает перспективным включение данного показателя в систему биоиндикации.

Аргументами в пользу биохимической диагностики являются относительная простота измерений и достаточно быстрый ответ, формируемый как реакция на антропогенное воздействие, что в большей степени подходит для ранней диагностики нежелательных экологических тенденций [6]. Происходящие при этом в почве модификации микробиологической и ферментативной активности со временем восстанавливаются, за исключением экстремальных нарушений состояния почвы, вызванных высокими концентрациями загрязнителей.

Несмотря на то, что биомониторинг и биоиндикация почв приобретает все большее значение при проведении научных исследований, выполнении практических производственных мероприятий, до настоящего времени не найден единый показатель, на основании которого можно было бы сделать вывод о биологическом состоянии почвы в целом. При обосновании выбора индикатора необходимо учитывать чувствительность показателей, вариабельность получаемых результатов, сложность метода и длительность анализа, универсальность применения для различных почв, селективность для различных загрязнителей и типов деградации почв [7]. Важно учитывать тот фактор, что активность ферментов представляет собой интегральный показатель, отражающий влияние различных физики-химических параметров, а также складывающихся гидротермических условий.

Цель исследования – установить приоритетные загрязнители почвы территорий, сопредельных с полигонами ТКО и оценить характер их влияния на активность почвенных ферментов инвертазы и протеазы для обоснования перспектив использования их в качестве индикаторов при биодиагностике состояния почвы.

Объект и методы исследования. В качестве объектов исследований служили образцы почвы, отобранные на территориях, сопредельных с СЗЗ полигонов ТКО с разным уровнем мощности. Отбор проб производился в июле (фаза активной вегетации) и сентябре (завершение активной вегетации) 2021–2022 гг. на глубину 0–20 см. С пробных площадок методом конверта отбирали по 5 точечных проб с формированием объединенной пробы. Почвы обладали дерново-подзолистые песчаные.

Полигон ТКО г. Гомеля расположен на 12-м километре шоссе Гомель – Калинковичи (в 4 км на юго-запад от г. Гомеля). На юге полигон граничит с полями фильтрации городских очистных сооружений, эксплуатируется с 1968 г. Данный полигон относится к категории полигонов большой мощности: объем принимаемых твердых коммунальных отходов составляет 870 тыс. м³/год. Отбор проб производился с пробных площадок, удаленных от зоны обваловки полигона на 500 м (граница СЗЗ), 650 м, 800 м, 1000 м и 2,5 км (контрольный участок в районе д. Сосновка).

Полигон ТКО г. Калинковичи располагается в пределах Горбовичского сельсовета Калинковичского района в районе реки Нетеч (мелиоративный канал № 1 г. Калинковичи, приток р. Ненач) бассейна р. Припять в западной части пригородной зоны г. Калинковичи. Полигон введен в эксплуатацию с 1961 г. Расчетный объем поступлений ТКО на полигон 110,8 тыс. м³/год, что позволяет отнести его к полигонам средней мощности. Отбор проб производился на удалении 100 м, 300 м и 550–600 м от условной границы (зоны обваловки), контрольный участок располагался на территории д. Рудня Горбовичская примерно в 2,5 км от полигона.

Определение физико-химических показателей почвы проводили по стандартным методикам: кислотность почв – потенциометрически (ГОСТ 26483); сумму обменных оснований – по Каппену (ГОСТ 27821); гидролитическую кислотность – по Каппену; гумус по Тюрину (ГОСТ 26213); подвижные фосфаты по Кирсанову (ГОСТ 26207); определение нитратов [8] и хлоридов потенциометрическим методом. Потенциальную активность инвертазы и протеазы определяли по Галстяну [9], [10]. Содержание тяжелых металлов определяли атомно-абсорбционным методом (спектрофотометр AAS NovAA 300, свидетельство о государственной поверке № 150061455-4022 от 29.06.2022) на базе КУП «Гомельская областная проектно-изыскательская станция химизации сельского хозяйства».

Из всех контролируемых параметров метеорологического состояния природной среды наибольшая значимость для настоящих исследований принадлежит количеству атмосферных осадков. Согласно наблюдениям ГУ «Гомельский областной центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» период 2021 г. характеризовался значительным варьированием количества атмосферных осадков относительно климатических норм. Норма суммы осадков в июле на основании многолетних наблюдений составляет около 100 мм. В сумме выпало 19 мм осадков, что составляет 19 % от нормы. Норма суммы осадков в сентябре (52 мм) была превышена. Выпало в сумме 99 мм осадков, что составляет 191 % от нормы. За летний сезон 2022 г. в среднем по Беларуси выпало 193 мм осадков, что составляет 86 % климатической нормы. Наименьшее количество осадков выпало в Гомельской области – 151 мм или 67 % климатической нормы. За сентябрь на территории Гомельской области вы-

пало в среднем 103,4 мм осадков или 200 % нормы. Данные погодные условия могут оказывать определенное влияние на количественный и видовой состав почвенной биоты, что в свою очередь, отражается на активности почвенных ферментов. Увеличение количества почвенной влаги может служить причиной снижения содержания подвижных форм элементов за счет их вымывания в нижележащие горизонты почвы.

Результаты и обсуждение. Оценка потенциальной биологической активности почвы территорий, сопредельных с санитарно-защитными зонами полигонов, проведена по таким показателям, как активность протеазы и инвертазы (таблица 1).

Таблица 1 – Активность ферментов почвы в различные годы наблюдений

Значения показателей	Активность ферментов			
	Инвертаза, мг глюкозы / 1 г почвы за 24 часа		Протеаза, мг глицина / 10 г почвы за 24 часа	
	2021 год	2022 год	2021 год	2022 год
min-max	1,95–6,00	3,28–20,47	2,10–33,80	7,56–46,78
среднее	3,61	14,20	10,63	20,72

Для инвертазы была зафиксирована активность на уровне $(1,95 \div 6,00)$ и $(3,28 \div 20,47)$ мг глюкозы / 1 г почвы за 24 часа, что позволяет отнести ее к категории слабой и средней активности по оценочным шкалам, предложенным Звягинцевым [3], [5], Хазиевым [2], Гапонюком и Малаховым [11], [12]. Диапазон варьирования активности протеаз в почве составлял $(2,10 \div 33,80)$ и $(7,56 \div 46,78)$ мг глицина / 10 г почвы за 24 часа, что соответствует средними и высокими показателями для данного фермента. По результатам исследований в 2022 г. отмечалось возрастание активности ферментов гидролаз: средние значения активности ферментов по выборкам в случае инвертазы увеличились в 3,9 раза, протеазы – в 1,95 раза по отношению к аналогичным показателям 2021 г.

Проведенный однофакторный дисперсионный анализ свидетельствует об отсутствии достоверных сезонных (июль–сентябрь) вариаций в активности как инвертазы ($F(1;31) = 3,8835$; $p = 0,0577$), так и протеазы ($F(4,19) = 0,254$ при $p = 0,618$), полученных по результатам измерений в 2022 г.

Выбор индикаторных ферментов должен осуществляться с учетом особенностей физико-химических показателей почвы и доминирующих загрязнителей данных территорий. Почвы экспериментальных площадок существенно не отличались по анализируемым показателям: слабокислые и близкие к нейтральным в районе Гомельского полигона ТКО ($pH_{KCl} 5,44–6,71$); кислые и слабокислые – в районе Калинковичского полигона ($pH_{KCl} 4,54–6,12$).

Содержание гумуса в почве в районе полигона ТКО г. Гомеля варьировалось от 2,4 % до 5,2 %. Диапазон значений для почв вокруг полигона ТКО г. Калинковичи составил 1,9 %–3,2 %. Содержание фосфатов и сульфатов не превышало значений ПДК [13], [14] и составляло, соответственно, для почв в районе полигона ТКО г. Гомеля $(1,25 \div 8,75)$ мг/100 г и $(2,92 \div 11,25)$ мг/кг; для почв, сопредельных с полигоном ТКО г. Калинковичи – $(1,87 \div 3,18)$ мг/100 г и $(7,85 \div 11,84)$ мг/кг соответственно.

В то же время исследованиями в 2021 году установлено, что приоритетными загрязнителями почвы территорий, сопредельных с СЗЗ полигонов ТКО г. Гомеля и г. Калинковичи, являлись нитрат-ионы, содержание которых соответственно в 35,3 % и 57,1 % проанализированных проб превышало значения ПДК (130 мг/кг) [13], [14]. Максимальная кратность превышения значений ПДК варьировалась от 1,30 до 1,95 раза. Содержание хлоридов превышало значения ПДК в 12 % проанализированных проб почвы в районе полигона ТКО г. Гомеля с максимальной кратностью превышения в 1,43 раза.

В 2022 г. выявили значительно более низкие уровни содержания как нитратов, так и хлоридов в почве. Диапазон варьирования концентраций нитрат-ионов в почве не превышал $(1,02 \div 3,89)$ мг/кг, хлоридов – $(1,80 \div 10,19)$ мг/кг, что значительно ниже предельно-допустимых концентраций. Таким образом, среди перечня проанализированных нами анионов, в 2022 г. не выявлена группа с превышением значений ПДК. Усиленный промывной режим в осенний период 2022 г. мог способствовать выносу растворимых и легкоподвижных солей в нижележащие горизонты почвы.

Обязательному контролю в почве подлежит содержание таких тяжелых металлов как кадмий, медь, свинец и цинк [15]. Для территорий, находящихся в зоне влияния полигона ТКО г. Гомеля, установлено превышение в почве ПДК подвижных форм меди [16]. В 100 % проанализированных образцов, отобранных на удалении (500 ÷ 1000) м от зоны обваловки полигона, содержание меди превышало фоновые содержания, в 80 % случаев – допустимые концентрации в 1,13–3,43 раза. В пробах на удалении 800 м от границы обваловки полигона установлено незначительное превышение уровня ОДК подвижных форм кадмия – на 3,3–6,6 % (таблица 2). Превышение ПДК подвижных форм меди и кадмия в почвах контрольных участков (2,5 км от зоны обваловки) не выявлено. Валовые содержания металлов в почвах не превышали ПДК/ОДК. Таким образом, в 2022 г. было установлено, что к приоритетным загрязнителям почвы территорий, сопредельных с полигоном ТКО г. Гомеля, относилась только медь, по результатам исследований 2021 г. – медь и кадмий.

Таблица 2– Сравнительная оценка содержания подвижных форм металлов в почве территорий, сопредельных с СЗЗ полигона ТКО г. Гомеля

В мг/кг

Параметры	Медь	Цинк	Свинец	Кадмий
2021 год				
Среднее содержание	10,64	20,31	4,12	0,33
Min-max	2,66–49,69	6,94–115,00	2,08–14,41	0,16–0,66
% проб выше ПДК/ОДК	92,3 %	2,3 %	2,3 %	33,3 %
2022 год				
Среднее содержание	5,53	9,84	3,25	0,16
Min-max	1,08–10,30	4,87–19,34	2,45–4,45	0,01–0,32
% проб выше ПДК/ОДК	80 %	–	–	20 %

Анализ содержания подвижных и валовых форм тяжелых металлов в почве в районе полигона ТКО г. Калинковичи по результатам 2022 г. не выявил превышения их ПДК/ОДК. В 2021 г. содержание подвижных форм меди, свинца и кадмия превышало ПДК/ОДК примерно в 15–20 % проанализированных образцов.

Можно предположить, что снижение содержания в почве тяжелых металлов и некоторых анионов относительно значений аналогичных периодов 2021 г. обусловлено гидрологическим режимом территории (гидротермический коэффициент в 2022 г. составлял примерно 1,5, что указывает на избыточное увлажнение). Возможен смыв поллютантов в нижележащие горизонты, вынос с растительной биомассой. Вероятно также уменьшение количества пылевых выветриваний с территории полигонов ТКО в виду высокой увлажненности.

Наблюдаемые различия в накоплении тяжелых металлов в почве территорий, сопредельных с полигонами ТКО г. Гомеля и г. Калинковичи, могут быть также связаны с различием в их физико-химических характеристиках и разной мощностью загрузки данных объектов, а, следовательно, и предполагаемой нагрузкой на окружающую среду.

Оценка влияния физико-химических показателей почвы, в том числе и приоритетных загрязнителей, на активность ферментов проведена на основе расчета парных и множественных коэффициентов корреляции и регрессии. В целом для применения методов параметрической статистики проведена оценка нормальности распределения всех параметров в выборке. Было установлено, что все представленные к анализу выборки, характеризуются нормальным распределением в рассматриваемом диапазоне значений переменных.

Анализ значений коэффициентов корреляции показывает, что сила связи между активностью ферментов и значениями некоторых физико-химических показателей в указанном выше диапазоне варьируется от слабой до средней и сильной. Так для инвертазы установлена средняя и высокая по силе корреляция активности с такими показателями как содержание валовых форм меди ($r = 0,51$), рН ($r = 0,58$), сульфатов ($r = 0,66$), с гидролитической кислотностью ($r = -0,64$), суммой обменных оснований ($r = 0,74$) при $p \leq 0,05$. В случае протеазы выявлена высокая зависимость активности от таких показателей как гидролитическая кислотность ($r = -0,83$), рН_{водн.} ($r = 0,72$), содержание подвижного фосфора ($r = -0,89$) и средняя – с содержанием сульфатов ($r = 0,62$) при $p \leq 0,05$.

При проведении процедуры множественной корреляции и регрессии результативным признаком являлись значения показателя ферментной активности $C_i = f(X_1, \dots, X_n)$. Независимыми переменными ($X_1, \dots, X_n$) служили те химические показатели почвы, которые характеризовались средней и высокой степенью связи с активностью ферментов. Результаты представлены в таблице 3 и на рисунках 7–8.

Таблица 3 – Параметры множественной корреляции и регрессии

R	R ²	F	p	a	b	c	d
для активности протеазы:							
$C_{\text{протеазы}} = a + b \cdot \text{pH}_{\text{водн}} + c \cdot \text{гидролит. кислотность} + d \cdot \text{подв. фосфор}$							
0,928	0,861	12,344	менее 0,00561	55,1078	-0,07034	-7,5712	-3,7894
для активности инвертазы:							
$C_{\text{инвертазы}} = a + b \cdot \text{pH}_{\text{водн}} + c \cdot \text{pH}_{\text{солевой}} + d \cdot \text{сульфаты}$							
0,989	0,978	22,285	менее 0,01385	69,1328	-15,5914	5,8735	1,6618

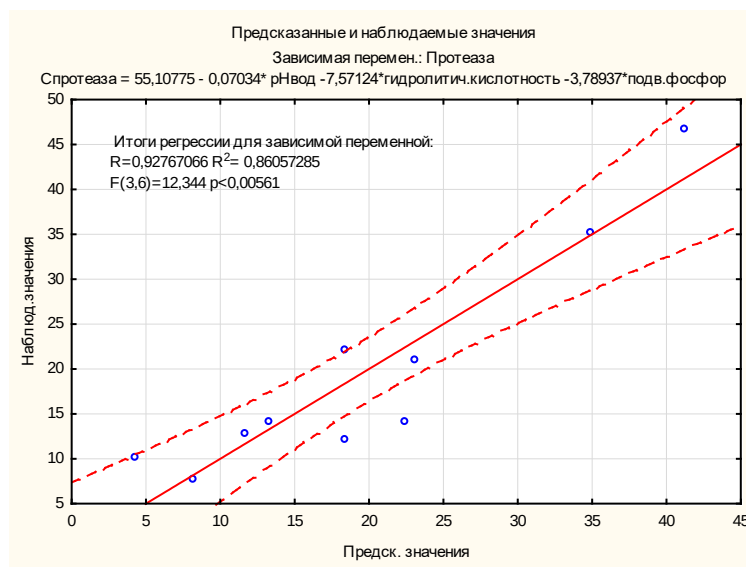


Рисунок 7 – Адекватность модели для прогноза активности протеазы

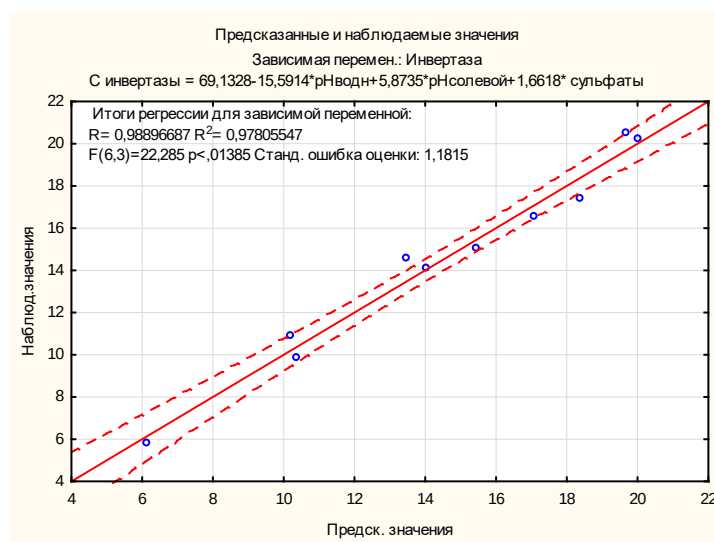


Рисунок 8 – Адекватность модели для прогноза активности инвертазы

Заключение. Установлено, что полученные в эксперименте диапазоны активностей фермента инвертазы характеризуются слабым и средним уровнями, что может свидетельствовать о нарушенном состоянии почвы территорий, сопредельных с полигонами ТКО. В то же время диапазон варьирования активности протеаз в почве отвечает средним и высоким показателям.

телям для данного фермента [2], [3]. За период наблюдений 2021–2022 гг. не выявлено достоверных сезонных (июль, сентябрь) отличий в активности рассматриваемых ферментов при общей тенденции к увеличению значений показателей в 2022 г. Установлена корреляционная зависимость активности протеазы и инвертазы от некоторых химических показателей почвы в указанном в работе диапазоне значений, имеющая как прямой, так и обратный характер. Для инвертазы выявлена средняя и высокая по силе корреляция с такими показателями как содержание валовых форм меди и сульфатов, рН и гидролитической кислотностью почвы, суммой обменных оснований ($p \leq 0,05$). Активность протеазы коррелировала с гидролитической кислотностью, рН почвы, содержанием подвижного фосфора и сульфатов ($p \leq 0,05$).

Полученные результаты позволят продолжить изучение динамики физико-химических и биохимических показателей почв для выявления возможного влияния полигонов ТКО на состояние почвенного покрова сопредельных территорий.

Литература

1. Лысухо, Н. А. Отходы производства и потребления, их влияние на природную среду : монография / Н. А. Лысухо, Д. М. Ерошина. – Минск : МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2011. – 210 с.
2. Хазиев, Ф. Х. Системно-экологический анализ ферментативной активности почв / Ф. Х. Хазиев. – М. : Наука, 1982. – 204 с.
3. Казеев, К. Ш. Биодиагностика почв : методология и методы исследований / К. Ш. Казеев, С. И. Колесников. – Ростов-на-Дону : Издательство Южного федерального университета, 2012. – 260 с.
4. Швакова, Э. В. Использование показателей ферментативной активности почв в почвенно-экологическом мониторинге / Э. В. Швакова // Потенциал современной науки. – 2015. – № 4 (12). – С. 62–66.
5. Звягинцев, Д. Г. Биологическая активность почв и шкала для оценки некоторых ее показателей / Д. Г. Звягинцев // Почвоведение. – 1978. – № 6. – С. 48–54.
6. Sariaslani, F. S. Microbial enzymes for oxidation of organic molecules / F. S. Sariaslani // Crit. Rev. Biotechnol. – 1989. – Vol. 9. – P. 171–257.
7. Деградация и охрана почв / под общ. ред. Г. В. Добровольского. – М. : Изд-во МГУ, 2002. – 654 с.
8. Охрана окружающей среды и природы. Аналитический контроль и мониторинг. Качество почвы. Определение нитратов ионометрическим методом : СТБ 17.13.05-28-2014. – Введ. 01.09.2014. – Минск : Госстандарт, 2014. – 16 с.
9. Хазиев, Ф. Х. Методы почвенной энзимологии / Ф. Х. Хазиев. – М. : Наука, 2005. – 252 с.
10. Минеев, В. Г. Практикум по агрохимии : учеб. пособ. для ун-тов / В. Г. Минеев. – М. : Изд-во МГУ, 1989. – 303 с.
11. Казеев, К. Ш. Почвоведение. Практикум : учеб. пособ. для СПО / К. Ш. Казеев, С. А. Тищенко, С. И. Колесников. – М. : Издательство Юрайт, 2017. – 257 с.
12. Гапонюк, Э. И. Комплексная система показателей экологического мониторинга почв / Э. И. Гапонюк, С. В. Малахов // Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах : труды 4-го Всесоюзного совещания. – Л. : Гидрометеиздат, 1985. – С. 3–10.
13. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.nsmos.by/content/150.html>. – Дата доступа : 14.12.2020.
14. Мониторинг земель [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.nsmos.by/uploads/archive/Sborniki/1%20SOIL%20Monitoring%202021.pdf>. – Дата доступа : 15.12.2022.
15. О локальном мониторинге окружающей среды : постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, 11.01.2017 г., № 5 : в ред. постановления Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 22.07.2020 г., № 15 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2020. – № 8/35694.
16. Перечень предельно допустимых (ПДК) и ориентировочно допустимых (ОДК) концентраций химических веществ в почве : ГН 2.1.7.12-1-2004. – Введ. 01.09.2004. – Минск : Министерство здравоохранения Республики Беларусь, 2004. – 27 с.

УДК 57.04:614.876:544.58:615.835.56

Оценка параметров ресуспензии радионуклидов при выполнении мероприятий по содержанию территории зоны отчуждения ЧАЭС

С.А. КАЛИНИЧЕНКО¹, В.Н. КАЛИНИН¹, В.Н. ЗАБРОДСКИЙ²

Исследовано содержание радионуклидов в воздушных аэрозолях при выполнении мероприятий по содержанию зоны отчуждения ЧАЭС. Объёмная активность ^{137}Cs в воздухе котельных имела небольшие величины ($1,2 \times 10^{-4}$ – $2,3 \times 10^{-4}$ Бк/м³). При чистке печи котельной содержание ^{137}Cs в аэрозолях воздуха увеличивалось до $1,1 \times 10^{-2}$ Бк/м³. При минерализации противопожарных полос в зоне отчуждения наибольшей объёмной активностью ^{137}Cs (0,516 Бк/м³), ^{241}Am (0,0023 Бк/м³) и суммарной α - β -активностью отличались образцы золы фильтров, отобранные на территории Радинского лесничества. После окончания работ удельная активность аэрозолей приземного слоя воздуха быстро снижалась. Среднее значение коэффициента ресуспензии (K_p) ^{137}Cs составило $4,95 \times 10^{-8} \text{ м}^{-1}$, с диапазоном значений $8,0 \times 10^{-10}$ – $1,31 \times 10^{-7} \text{ м}^{-1}$. Устойчивой зависимости между плотностью загрязнения почвы и коэффициентом ресуспензии не наблюдалось.

Ключевые слова: ресуспензия, радионуклиды, зона отчуждения ЧАЭС.

The content of radionuclides in air aerosols during the implementation of measures to maintain the exclusion zone of the CNPP was studied. The volumetric activity of ^{137}Cs in the air of boiler rooms was small ($1,2 \times 10^{-4}$ – $2,3 \times 10^{-4}$ Bq/m³). When cleaning the furnace of the boiler room, the content of ^{137}Cs in air aerosols increased to $1,1 \times 10^{-2}$ Bq/m³. During the mineralization of firebreaks in the exclusion zone, the highest volumetric activity of ^{137}Cs (0,516 Bq/m³), ^{241}Am (0,0023 Bq/m³) and total α - β -activity differed in filter ash samples taken on the territory of the Radinskoye forestry. After completion of the work, the specific activity of aerosols in the surface air layer rapidly decreased. The average value of the ^{137}Cs resuspension factor (RF_s) was $4,95 \times 10^{-8} \text{ м}^{-1}$, with a range of values from $8,0 \times 10^{-10}$ to $1,31 \times 10^{-7} \text{ м}^{-1}$. A stable relationship between the density of soil contamination and the resuspension coefficient was not observed.

Keywords: resuspension, radionuclides, exclusion zone of the CNPP.

Введение. Литературные данные, касающиеся переноса радионуклидов в атмосфере, несмотря на их многочисленность, остаются в значительной степени противоречивыми [1]–[9]. Вторичный ветровой перенос выпавших на почву радиоактивных веществ может произойти в результате ветрового воздействия, под влиянием естественной турбулентности атмосферы, при пожаре, проведении лесохозяйственных и противопожарных мероприятий (например, минерализации и разработке противопожарных разрывов), сельскохозяйственной деятельности (например, при проведении земляных работ, вспашке, дисковании, бороновании и т. п.). Степень вторичного ветрового переноса радионуклидов с различных поверхностей зависит от многих факторов, например, характера и возраста выпавших веществ, физических характеристик поверхности и силы ветра [2]–[5]. Параметры вторичного ветрового переноса мелких частиц с сухой поверхности значительно выше, чем с мокрой поверхности, особенно если речь идёт о сельскохозяйственных угодьях [6]–[8].

Вторичный ветровой перенос, вызванный механическими операциями, оказывает воздействие только на людей, находящихся в непосредственной близости, и не играет существенной роли при оценке радиационного воздействия на большие группы людей. Тем не менее, отдельные категории населения (т. н. критические группы или группы риска) с определённой спецификой профессионально-трудовой деятельности потенциально могут подвергаться повышенному облучению, обусловленному ингаляционным поступлением радионуклидов, вследствие пребывания в условиях повышенных концентраций радионуклидов во вдыхаемом (в ходе выполнения своих профессиональных обязанностей) воздухе. К таким категориям людей можно отнести пожарных, механизаторов и полеводов сельского хозяйства, операторов котельных и некоторые другие категории профессиональных работников.

Материалы и методы исследований. Исследования были проведены на территории зоны отчуждения аварии на Чернобыльской АЭС в «Полесском государственном радиаци-

онно-экологическом заповеднике» (ПГРЭЗ) в 2022 г. Отбор проб аэрозолей обеспечивался путём прокачки воздуха через аэрозольный фильтр FPM 1515 или FPM 1530 размером 270×230 мм (VF Nuclear, Czech) с помощью цифрового высокообъёмного воздухозаборного устройства VOPV-12 (VF Nuclear, Czech) (калибровка производителя – 2020 г.). Скорость потока воздуха колебалась от 100 до $130 \text{ м}^3/\text{ч}$. Для уточнения скорости потока воздуха, прокаченного через фильтр, применялся анемометр Testo 410-2. Объём прокачанного воздуха (Q , м^3) вычисляли по формуле [10]:

$$Q = S \times V \times t,$$

где S – площадь поперечного сечения, м^2 , V – линейная скорость воздушного потока, $\text{м}/\text{с}$, t – время покачивания воздуха, с.

В полевых условиях установка размещалась на высоте около 0,4 м от подстилающей поверхности территории воздухозабора и обеспечивалась электропитанием от мобильного бензинового генератора. После окончания прокачки выполнялись измерения активности ^{137}Cs и ^{241}Am радионуклидов в аэрозольных фильтрах на γ -спектрометре Canberra с использованием программного обеспечения Genie-2000 (набор и анализ γ -спектров). Для регистрации γ -излучения применялся блок детектирования на основе кристалла из особо чистого германия, с площадью рабочей поверхности 2000 мм^2 и толщиной чувствительной зоны 20 мм (BE2020), помещённый в свинцовую защиту $m = 1$ т. Для получения оптимальной геометрии измерения фильтр перед измерением складывался в 4 раза (16 слоёв). Расчёт эффективности регистрации выполнялся методом математического моделирования с использованием программного обеспечения LabSOCS (шаблон используемой геометрии счёта – «коробка»).

Для изучения суммарной α - β - активности аэрозольных фильтров использовалась низкофоновая установка α - β - счёта LB4100 (Canberra), укомплектованная газоразрядными детекторами, работающими на проточной газовой смеси (90 % аргон $\times$ 10 % метан). Прибор характеризуется низким уровнем фона (не более 0,7 имп/мин для β - и 0,1 имп/мин для α -частиц) и высокой эффективностью регистрации (не менее 0,45 для β - ($^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$) и 0,35 для α -частиц (^{241}Am)). В связи с небольшим объёмом измерительной камеры и необходимостью измерения тонкослойных образцов было выполнено сжигание аэрозольных фильтров в муфельной печи до золы при температуре не выше 450°C . Результатом измерений низкофоновой установки является α -счёт и β -счёт в импульсах в минуту. После вычитания фона получаем чистую скорость счёта от счётной мишени. Для расчёта активности использовались эффективности регистрации, полученные по результатам измерений стандартных источников аттестованных в БелГИМ. Измерения стандартных источников также использовались для оценки перекрёстного счёта. Возможный вклад β -излучателей в α -счёт оценивался путём измерения стандартных источников ($^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$) и колебался в интервале 0,003–0,028 %, что согласуется с данными производителя – менее 0,1 %. Таким образом, вкладом β -излучения в скорость α -счёта можно пренебречь. Следовательно, альфа-счёт от мишени свидетельствует о наличии альфа-излучающих нуклидов.

Одним из методов моделирования процесса вторичного ветрового подъёма является его описание (параметризация) при помощи коэффициента ветрового подъёма, называемого ещё коэффициентом ресуспензии (K_p) – 1 м. Коэффициент ресуспензии определяли как отношение концентрации радионуклида в воздухе (на некоторой условной высоте, обычно – 1 м) к плотности радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности этим же нуклидом.

Результаты исследований и их обсуждение. Ветровой подъём частиц пыли с поверхностного слоя почвы и других элементов подстилающей поверхности, загрязнённой радиоактивными веществами, становится одним из основных механизмов вторичного подъёма частиц, так как действует практически постоянно. Подстилающая поверхность является постоянным поверхностным источником аэрозоля с меняющейся скоростью эмиссии вещества в зависимости от метеорологических условий и характера подстилающей поверхности. K_p может принимать значения, отличающиеся на несколько порядков в зависимости от состояния подстилающей поверхности, распределения на ней радиоактивного загрязнения (как по глубине, так и по поверхности), механических воздействий на почву, метеорологических условий (влажность и температура воздуха, наличие и сила ветра).

Оценка объёмной активности (A_0) ^{137}Cs аэрозолей воздуха рабочих зон производственных помещений необходима для расчёта годового поступления ^{137}Cs в организм работающих в этих помещениях сотрудников и оценки соответствующей дозы внутреннего облучения этих сотрудников. Основная трудность дозиметрии внутреннего облучения состоит в невозможности прямыми методами измерения непосредственно зарегистрировать дозу внутреннего облучения тела или критического органа. Для исследования рабочих помещений были выбраны котельная научно-административного корпуса (НАК), котельная станции дезактивации (СД) и шишкосушилка (б.н.п. Бабчин). Также был проведён отбор пробы аэрозолей воздуха в непосредственной близости от экспериментальных сельскохозяйственных угодий, находящихся в окрестностях научно-административной части ПГРЭЗ (б.н.п. Бабчин). Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs территории данных сельхозугодий составила 644 кБк/м^2 . Результаты определения A_0 ^{137}Cs аэрозолей воздуха рабочих зон приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Объёмная активность ^{137}Cs аэрозолей воздуха рабочих зон хозяйственно-производственных помещений и в атмосферном воздухе вблизи них

Наименование помещения	Дата прокачки	Объём прокачанного воздуха, м^3	Дата измерения	Объёмная активность A_0 , Бк/м^3	Неопределённость A_0 , Бк/м^3
Котельная НАК	21.02–24.02	1801	25.02	$2,20 \cdot 10^{-4}$	$0,70 \cdot 10^{-4}$
	21.04–26.04	1487	26.04	$1,20 \cdot 10^{-4}$	$0,50 \cdot 10^{-4}$
Котельная СД	25.03	628	25.03	$1,10 \cdot 10^{-2}$	$0,22 \cdot 10^{-2}$
			13.04	$1,11 \cdot 10^{-2}$	$0,24 \cdot 10^{-2}$
	13.04	675	13.04	$2,30 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-4}$
Шишкосушилка	24.03	680	24.03	$2,12 \cdot 10^{-3}$	$0,50 \cdot 10^{-3}$
			15.04	$1,92 \cdot 10^{-3}$	$0,45 \cdot 10^{-3}$
	20.04	643	20.04	$8,12 \cdot 10^{-3}$	$1,56 \cdot 10^{-3}$
Возле шишкосушилки	15.04	644	15.04	$1,10 \cdot 10^{-4}$	$0,90 \cdot 10^{-4}$
Возле НАК	6.07–11.07 18.07–21.07	2076	26.07	$7,30 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Препараторская НАК	21.11–23.11	2550	23.11	менее МДА	менее МДА

Также было выполнено прокачивание воздуха через фильтр в помещении «препараторская» НАК. Однако значение A_0 в аэрозолях воздуха оказалось ниже МДА. Объёмная активность ^{137}Cs в воздухе котельных имела, как правило, небольшую величину за исключением 25 марта, когда работники котельной производили выгревание золы из печи котельной, что привело к росту запылённости воздуха котельной и увеличению A_0 ^{137}Cs в аэрозолях воздуха до $0,011 \text{ Бк/м}^3$. Увеличение A_0 аэрозолей воздуха в шишкосушилке в апреле по сравнению с мартом, возможно, связано с увеличением объёма или местом отбора обрабатываемого материала. Разница объёмной активности в воздухе около научно-административного корпуса и около шишкосушилки объясняется близостью научно-административного корпуса к полям, на которых ведётся сельскохозяйственная деятельность.

Для изучения влияния на вторичный ветровой подъём активности радионуклидов в приземный слой атмосферы мероприятий по содержанию зоны отчуждения были выполнены отборы проб аэрозолей приземного слоя воздуха при минерализации противопожарных полос. Воздухозаборное устройство располагалось на расстоянии 5 метров от обрабатываемой трактором противопожарной полосы. Скорость воздушного потока создаваемого воздухозаборным устройством контролировалась с помощью анемометра. Всего было выполнено 6 отборов в течение сезона в соответствии с графиком обработки противопожарных полос (29 апреля – Богусhevское лесничество квартал 139, 12 мая – Радинское лесничество квартал 90, 5 июля – Бабчинское лесничество квартал 66, 28 июля – Воротецкое лесничество квартал 41, 10 августа – Радинское лесничество квартал 43, 11 августа – Новопокровское лесничество квартал 12. Объёмные активности ^{137}Cs и ^{241}Am в аэрозольных фильтрах приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Объёмная активность ^{137}Cs и ^{241}Am аэрозолей воздуха, отобранных на местности во время выполнения мероприятий по минерализации противопожарных полос

Лесничество	Даты прокачки	Объём прокачанного воздуха, м ³	Дата измерения	Радио-нуклид	Объёмная активность А _о , Бк/м ³	Неопределённость А _о , Бк/м ³
Богушевское кв. 139	29.04.2022	532	5.05.2022	^{137}Cs	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
				^{241}Am	$6,9 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$
Радинское кв. 90	12.05.2022	304	13.05.2022	^{137}Cs	$5,2 \cdot 10^{-1}$	$0,9 \cdot 10^{-1}$
				^{241}Am	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Бабчинское кв. 66	05.07.2022	385	6.07.2022	^{137}Cs	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$0,5 \cdot 10^{-2}$
				^{241}Am	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$0,8 \cdot 10^{-4}$
Воротецкое кв. 41	28.07.2022	624	28.07.2022	^{137}Cs	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$
				^{241}Am	менее МДА	–
Радинское кв. 43	10.08.2022	280	10.08.2022	^{137}Cs	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$0,6 \cdot 10^{-2}$
				^{241}Am	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Новопокровское кв. 12 (дискование)	11.08.2022	108	11.08.2022	^{137}Cs	$9,8 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$
				^{241}Am	менее МДА	–
Новопокровское кв. 12 (после дискования)	11.08.2022	261	12.08.2022	^{137}Cs	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$
				^{241}Am	менее МДА	–

Важной особенностью полученных результатов является наличие в спектре γ -линии ^{241}Am . Америций как α -излучатель особенно опасен при попадании внутрь организма человека. Объёмные активности радионуклидов в аэрозолях приземного слоя воздуха значительно более высокие в Радинском лесничестве квартал 90. Вдыхание за год 2400 м³ такого воздуха приведёт к поступлению в организм работника дополнительно 1238,9 Бк ^{137}Cs и около 5,57 Бк ^{241}Am .

Суммарная А_о β -излучающих радионуклидов в атмосферном воздухе считается одним из наиболее информативных интегральных показателей радиационной безопасности территорий. Она является чувствительным критерием оценки интенсивности поступления в атмосферу техногенных радионуклидов в результате эксплуатации предприятий ядерного топливного цикла и других радиационных объектов, а также в результате прошлых радиационных аварий и глобальных выпадений техногенных радионуклидов. В условиях нормальной эксплуатации радиационных объектов, когда поступление β -излучающих радионуклидов техногенного происхождения в атмосферу находится на низком уровне, суммарная объёмная β -активность приземного слоя атмосферного воздуха практически целиком определяется содержанием в воздухе аэрозолей долгоживущих природных радионуклидов рядов урана (главным образом ^{238}U) и тория (^{232}Th), а также калия (^{40}K). Основными источниками поступления β -излучающих радионуклидов техногенного происхождения в атмосферу являются выбросы радиационных объектов. Поступление β -излучающих радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr и др. в атмосферу в определённой мере может быть обусловлено ветровым подъёмом радиоактивных веществ с поверхности почв, загрязнённых в результате глобальных выпадений и аварий на радиационных объектах. Физическое значение этой величины определяется арифметической суммой А_о всех долгоживущих β -излучателей в атмосферном воздухе. Воздушные аэрозоли могут содержать изотопы, которые не определяются методом γ -спектрометрии, в частности ^{90}Sr и дочерние продукты распада радона, такие как изотопы полония. Также в аэрозолях, в которых обнаружен радионуклид ^{241}Am , могут присутствовать изотопы плутония. В процессе исследований была отработана техника сжигания фильтров до состояния золы и способ приготовления счётных мишеней из полученной золы. Если масса полученной пробы золы не превышала 200 миллиграмм, то она использовалась для измерения полностью, если масса превышала 200 миллиграмм, то из пробы отбирались одна или две навески, масса которых не превышала 200 миллиграмм. Некоторые образцы подвергались дополнительному озолению, но это существенно не повлияло на их характеристики.

Результатом измерений является скорость счёта α - и β -частиц. Результат расчёта активности (таблица 3) на основе этих данных носит относительный характер, потому что состав изотопов, определяющий этот счёт, нам не известен.

Таблица 3 – Скорости счёта α - β -частиц и рассчитанные суммарные α - β -активности образцов золы фильтров с аэрозолями воздуха

Место отбора, код фильтра, объём прокачанного воздуха, м ³	Дата измерения	Фон, импульс/мин		Скорость счёта импульс/мин		Суммарная объёмная активность, Бк/м ³	
		α 23.02.22	β 25.10.22	α -срт	β -срт	α	β
Котельная НАК, AF20, 1801	16.08.22	0,06	0,66	1,48	22,86	$3,80 \cdot 10^{-5}$	$4,60 \cdot 10^{-4}$
	17.11.22	0,06	0,66	0,84	21,82	$2,10 \cdot 10^{-5}$	$4,38 \cdot 10^{-4}$
Шишкосушилка, AF21, 680	16.08.22	0,05	0,66	2,52	59,46	$1,77 \cdot 10^{-4}$	$3,22 \cdot 10^{-3}$
	17.11.22	0,05	0,66	0,56	43,62	$3,70 \cdot 10^{-5}$	$2,36 \cdot 10^{-3}$
Котельная СД, AF22, 628	17.08.22	0,02	0,64	0,66	215,58	$0,50 \cdot 10^{-4}$	$1,28 \cdot 10^{-2}$
	17.08.22	0,03	0,68	0,54	221,56	$0,40 \cdot 10^{-4}$	$1,31 \cdot 10^{-2}$
	18.08.22	0,02	0,64	1,10	232,08	$0,84 \cdot 10^{-4}$	$1,37 \cdot 10^{-2}$
	18.08.22	0,05	0,54	0,94	222,66	$0,69 \cdot 10^{-4}$	$1,32 \cdot 10^{-2}$
	17.11.22	0,02	0,64	0,46	220,72	$0,34 \cdot 10^{-4}$	$1,31 \cdot 10^{-2}$
Котельная СД, AF23, 675	16.08.22	0,02	0,64	0,50	13,06	$0,35 \cdot 10^{-4}$	$6,86 \cdot 10^{-4}$
	17.11.22	0,03	0,68	0,36	12,8	$0,24 \cdot 10^{-4}$	$6,69 \cdot 10^{-4}$
Возле шишкосушилки, AF24, 644	16.08.22	0,03	0,68	1,02	9,24	$0,75 \cdot 10^{-4}$	$4,96 \cdot 10^{-4}$
	17.11.22	0,05	0,74	0,44	7,46	$0,30 \cdot 10^{-4}$	$3,89 \cdot 10^{-4}$
Шишкосушилка, AF25, 643	16.08.22	0,05	0,74	1,76	109,16	$1,30 \cdot 10^{-4}$	$6,29 \cdot 10^{-3}$
	18.08.22	0,05	0,74	0,86	92,08	$0,61 \cdot 10^{-4}$	$5,30 \cdot 10^{-3}$
	17.11.22	0,03	0,60	0,82	71,84	$0,60 \cdot 10^{-4}$	$4,13 \cdot 10^{-3}$
Котельная НАК, AF26, 1487	16.08.22	0,03	0,60	2,24	29,66	$0,72 \cdot 10^{-4}$	$7,29 \cdot 10^{-4}$
	17.11.22	0,02	0,64	1,08	27,00	$0,35 \cdot 10^{-4}$	$6,61 \cdot 10^{-4}$
Богушевское л-во, AF27, 532	17.08.22	0,05	0,74	0,68	21,18	$1,26 \cdot 10^{-4}$	$3,13 \cdot 10^{-3}$
	17.08.22	0,03	0,60	0,40	26,74	$0,74 \cdot 10^{-4}$	$4,00 \cdot 10^{-3}$
	17.11.22	0,05	0,54	0,48	33,32	$0,86 \cdot 10^{-4}$	$5,02 \cdot 10^{-3}$
Радинское л-во, AF28, 304	17.08.22	0,02	0,64	1,38	259,74	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$1,68 \cdot 10^{-1}$
	17.08.22	0,05	0,54	1,52	260,14	$1,24 \cdot 10^{-3}$	$1,68 \cdot 10^{-1}$
	18.11.22	0,06	0,66	1,22	333,46	$9,82 \cdot 10^{-4}$	$2,16 \cdot 10^{-1}$
Бабчинское л-во, AF29, 385	16.08.22	0,02	0,64	1,00	140,04	$1,24 \cdot 10^{-4}$	$1,35 \cdot 10^{-2}$
	18.08.22	0,03	0,60	1,42	130,54	$1,76 \cdot 10^{-4}$	$1,26 \cdot 10^{-2}$
	18.11.22	0,05	0,66	0,92	104,34	$1,10 \cdot 10^{-4}$	$1,00 \cdot 10^{-2}$
Возле НАК, AF30, 2076	18.08.22	0,06	0,66	0,82	15,80	$0,80 \cdot 10^{-4}$	$1,22 \cdot 10^{-3}$
	18.08.22	0,05	0,66	0,14	13,30	$0,10 \cdot 10^{-4}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$
	18.11.22	0,02	0,64	0,44	14,78	$0,44 \cdot 10^{-4}$	$1,14 \cdot 10^{-3}$
Воротецкое л-во, AF31, 624	16.08.22	0,05	0,54	0,58	11,44	$0,41 \cdot 10^{-4}$	$6,51 \cdot 10^{-4}$
	18.11.22	0,03	0,68	0,34	10,40	$0,24 \cdot 10^{-4}$	$5,81 \cdot 10^{-4}$
Радинское л-во, AF32, 280	18.11.22	0,05	0,74	1,34	117,28	$2,25 \cdot 10^{-4}$	$1,55 \cdot 10^{-2}$
Новопокровское л-во, AF33А, 108	18.11.22	0,05	0,74	0,46	17,00	$1,85 \cdot 10^{-4}$	$5,61 \cdot 10^{-3}$
Новопокровское л-во, AF33Б, 261	18.11.22	0,02	0,64	0,34	9,72	$0,60 \cdot 10^{-4}$	$1,30 \cdot 10^{-3}$

Для расчёта активности используется значение эффективности регистрации α - β -частиц полученное с использованием стандартного источника. Для определения эффективности регистрации β -частиц обычно используется стандартный источник ^{90}Sr , а для α -частиц ^{239}Pu . Мы использовали для определения эффективности регистрации низкофонового счётчика аттестованные в БелГИМ источники ^{90}Sr и ^{241}Am . Значение эффективности регистрации составило для источника ^{90}Sr – $0,447 \pm 0,028$, для ^{241}Am эффективность равна $0,342 \pm 0,042$. Также была определена эффективность регистрации β -частиц для контрольных источников ^{137}Cs . Его величина составила $0,338 \pm 0,038$. Эти значения и были использованы для расчёта суммарной α - β -активности. Таким образом, наибольшей суммарной α - и β -активностью отличались образцы золы фильтров, отобранные при минерализации противопожарных полос, особенно при работах на территории Радинского лесничества (отбор 12 мая).

Среднее значение активности ^{137}Cs в аэрозолях приземного слоя воздуха на территории заповедной зоны при выполнении минерализации противопожарных полос $84,6 \text{ мБк/м}^3$ с диапазоном значений $0,42\text{--}516 \text{ мБк/м}^3$. Среднее значение коэффициента ресуспензии было равно $4,95 \times 10^{-8} \text{ м}^{-1}$, диапазон его значений $8,0 \times 10^{-10}\text{--}1,31 \times 10^{-7} \text{ м}^{-1}$. Зависимости величины коэффициента ресуспензии от плотности загрязнения территории в наших экспериментах не прослеживается (рисунок 1).

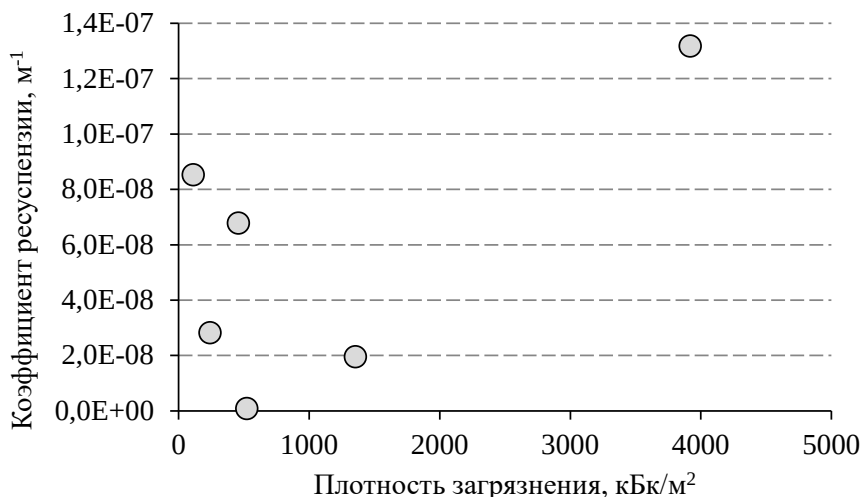


Рисунок 1 – Зависимость между плотностью загрязнения и коэффициентом ресуспензии

Вместе с тем, отбор двух проб аэрозолей приземного слоя воздуха в Новопокровском лесничестве (одного во время минерализации противопожарной полосы, другого после окончания работы) показал, что после окончания работы активность ^{137}Cs в аэрозолях приземного слоя воздуха быстро уменьшается. Наименьший K_p был получен в Воротецком лесничестве, а наименьшая плотность загрязнения почвы в Новопокровском лесничестве. Наибольшая плотность загрязнения и наибольший коэффициент ресуспензии отмечен в Радинском лесничестве (выезд 12 мая). Устойчивой зависимости между плотностью загрязнения почвы и коэффициентом ресуспензии не наблюдается. Видимо, интенсивность ресуспензии обусловлена, прежде всего, динамичностью ветрового подъёма. Существенное влияние на K_p могут оказывать погодные условия, в частности сила ветра и его порывистость.

Заключение. В работе были исследованы воздушные аэрозоли рабочих помещений б.н.п. Бабчин: котельная научно-административного корпуса, котельная станции дезактивации, шишкосушилка, «препараторская» лаборатории спектрометрии и радиохимии. Значение A_0 в аэрозолях воздуха научно-административного корпуса оказалось ниже МДА. Объёмная активность ^{137}Cs в воздухе котельных имела, как правило, небольшие величины ($1,2 \times 10^{-4}\text{--}2,3 \times 10^{-4} \text{ Бк/м}^3$) за исключением одного отбора, во время чистки печи котельной, что привело к росту запылённости воздуха и увеличению A_0 ^{137}Cs в аэрозолях воздуха до $1,1 \times 10^{-2} \text{ Бк/м}^3$. Увеличение A_0 аэрозолей воздуха в шишкосушилке в апреле ($8,12 \times 10^{-3} \text{ Бк/м}^3$) по сравнению с мартом ($2,12 \times 10^{-3} \text{ Бк/м}^3$) вероятно связано с увеличением объёма обрабатываемого материала и местом его отбора. Разница объёмной активности в воздухе около научно административного корпуса и около шишкосушилки объясняется близостью научно административного корпуса к полям, на которых ведётся сельскохозяйственная деятельность.

При исследовании содержания ^{137}Cs и ^{241}Am в аэрозолях приземного слоя воздуха во время минерализации противопожарных полос в зоне отчуждения значительно более высокие объёмные активности радионуклидов отмечены в аэрозолях приземного слоя воздуха Радинского лесничества (для ^{137}Cs – $0,516 \text{ Бк/м}^3$, для ^{241}Am – $0,0023 \text{ Бк/м}^3$), для которого характерна и более высокая плотность загрязнения почвы. Наибольшей суммарной α - и β -активностью также отличались образцы золы фильтров, отобранные нами при минерализации противопожарных полос на территории Радинского лесничества. Среднее значение ак-

тивности ^{137}Cs в аэрозолях приземного слоя воздуха при выполнении минерализации противопожарных полос составило $84,6 \text{ мБк/м}^3$ с диапазоном значений $0,42\text{--}516,0 \text{ мБк/м}^3$. Отбор проб аэрозолей приземного слоя воздуха в Новопокровском лесничестве показал, что после окончания работ активность ^{137}Cs в аэрозолях приземного слоя воздуха быстро уменьшается.

Среднее значение коэффициента ресуспензии ^{137}Cs составило $4,95 \times 10^{-8} \text{ м}^{-1}$, с диапазоном значений $8,0 \times 10^{-10}\text{--}1,31 \times 10^{-7} \text{ м}^{-1}$. Устойчивой зависимости между плотностью загрязнения почвы и коэффициентом ресуспензии не наблюдалось. Существенное влияние на K_p могут оказывать динамические параметры ветрового подъема и погодные условия.

Литература

1. Yoschenko, V. I. Resuspension and redistribution of radionuclides during grassland and forest fires in the Chernobyl exclusion zone : part II. Modeling the transport process / V. I. Yoschenko [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2006. – V. 87, № 3. – P. 260–278.
2. Evangeliou, N. Fire evolution in the radioactive forests of Ukraine and Belarus : future risks for the population and the environment / N. Evangeliou [et al.] // Ecological Monographs. – 2015. – V. 85, № 1. – P. 49–72.
3. Гаргер, Е. К. Ветровой подъем радиоактивного аэрозоля / Е. К. Гаргер // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2008. – Вип. 10. – С. 111–120.
4. Kashparov, V. A. The results of experimental research of the forest fires on the radioactive contamination of environment and the assessment of doses to fire fighters / V. A. Kashparov [et al.] // Aerosols. – 1998. – V. 4a, № 6. – P. 34–36.
5. Kashparov, V. A. Forest fires in the territory contaminated as a result of the Chernobyl accident : radioactive aerosol resuspension and exposure of fire-fighters / V. A. Kashparov [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2000. – V. 51, № 3. – P. 281–298.
6. Garger, E. Resuspension and deposition of radionuclides under various conditions / E. Garger [et al.] // The radiological consequences of the Chernobyl accident ; ed. A. Karaoglou [et al.]. – ECSC-EC-EAEC, Brussels Luxembourg, 1996. – P. 109–121.
7. Гаргер, Е. К. Вторичный подъем радиоактивного аэрозоля в приземном слое атмосферы : монография / Е. К. Гаргер // НАН Украины. – Чернобыль (Киев обл.) : Ин-т проблем безопасности АЭС, 2008. – 192 с.
8. Стамат, И. П. Суммарная объемная бета-активность атмосферного воздуха как интегральный критерий оценки выбросов в атмосферу природных и техногенных радионуклидов / И. П. Стамат // Радиационная гигиена. – 2015. – Т. 8, № 4. – С. 74–82.
9. Критерии оценки радиационного воздействия : Гигиенический норматив : утв. постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь, 28 дек. 2021 г., № 213 // Нац. реестр правовых актов Республики Беларусь. – 2013. – 8/26850.
10. Радиационный контроль. Отбор проб атмосферного воздуха. Общие требования : СТБ 1058-2016. – Введ. 29.12.2016. – Минск : БелГИМ, 2016. – 8 с.

¹Полесский государственный
радиационно-экологический заповедник

²Республиканский центр по гидрометеорологии,
контролю радиоактивного загрязнения
и мониторингу окружающей среды

Поступила в редакцию 07.03.2023

Динамика Новой климатической зоны на территории Беларуси

О.В. КОВАЛЁВА, А.С. СОКОЛОВ, А.Ф. КАРПЕНКО

Окружающая среда и климатические условия взаимосвязаны. Климат на Земле меняется, и существенную негативную роль в этом процессе играют антропогенные факторы. Неблагоприятное антропогенное воздействие на климат происходит в результате развития производства и связанного с этим увеличения выбросов парниковых газов. В Беларуси за период с 1989 по 2015 гг. среднегодовая температура воздуха на 1,3°C превысила климатическую норму. В результате потепления в республике произошло изменение границ агроклиматических зон. На юге Белорусского Полесья образовалась Новая, более теплая агроклиматическая область. В статье рассматривается динамика расширения Новой климатической зоны на территории Беларуси. К 2030 г. следует ожидать около 55,7 % территории республики в рамках данной зоны.

Ключевые слова: климат, зоны, динамика, Беларусь.

There is a strong interrelationship between climatic conditions and the environment. The climate on Earth is changing, and a significant negative role in this process is being played by anthropogenic factors. Adverse anthropogenic impact on climate change originates from ever growing manufacturing and other human activities causing the growth of greenhouse gas emissions. The average yearly air temperature in Belarus (1989–2015) has exceeded the climate normal by 1,3 degrees Celsius. The rise in temperature changes the margins of agro-climatic regions of the country. As a result, the southern part of the Belarusian Polesie has formed a new and much warmer agro-climatic area. Studied in this work is the expansion dynamics of this new climatic zone in Belarus. It is expected to encompass approximately 55,7 % of the total Belarus territory by 2030.

Keywords: climate, zones, dynamics, Belarus.

Введение. Человеческая деятельность и развитие общества во многом зависят от климатических условий, характерных для каждой страны. Под климатом местности понимается многолетний режим погоды, определяемый географическими условиями этой местности; является результатом непрерывно протекающих в атмосфере многочисленных процессов и, прежде всего таких, как приток, преобразование, отдача и перенос разных форм энергии, испарение, конденсация, перенос влаги и т. д. [1].

Установлено, что в результате развития производства и связанного с этим увеличения выбросов таких парниковых газов, как углекислый газ, метан и других, а также уничтожения лесов и болот, загрязнения морей и океанов снижается способность данных экосистем поглощать нарастающие количества парниковых газов. Отмечаемые негативные изменения окружающей среды отрицательно могут влиять практически на все стороны, как экономической деятельности человека, так и на его здоровье [2], [3].

По наблюдениям белорусских исследователей в республике, начиная с 1989 г., за 26 лет, среднегодовая температура воздуха на 1,3°C превысила климатическую норму. В 2015 г. она составила +8,5°C, что на 2,7°C оказалось выше нормы и самой высокой за весь период с 1881 г. [4], [5].

Известно, что с 1973 г. в Беларуси была внедрена схема районирования территории, в основе которой для выделения агроклиматических зон используются суммы температур выше 10°C. В соответствии с этой схемой, территорию республики условно разделили на следующие три агроклиматические области: Северную с суммой температур воздуха выше 10°C менее 2200, соответственно Центральную – 2200–2400°C и Южную – 2100–2600°C [6]. Однако, в результате изменения климатических условий стали изменяться и границы данных агроклиматических зон. Так, за период потепления 1989–2015 гг. в Южной появилась Новая или IV агроклиматическая зона с суммой температур более 2600°C [4], [7]. В административном отношении IV агроклиматическая область разместилась в южных районах Брестской и Гомельской областей или в южной части Полесской провинции. Она отличается самой короткой и теплой зимой и наиболее продолжительным вегетационным периодом (рисунок 1) [4].

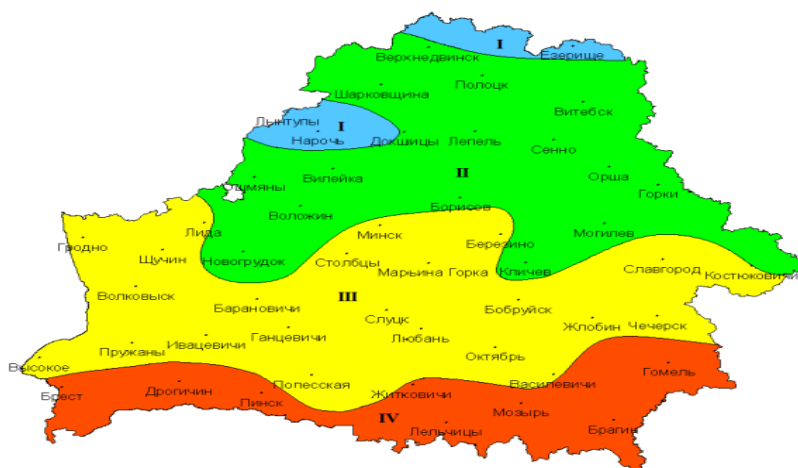


Рисунок 1 – Границы агроклиматических областей за период потепления 1989–2015 гг. по состоянию на 2015 г.: I – Северная, II – Центральная, III – Южная, IV – Новая [4]

В результате этих изменений в республике наблюдаются теплые зимы, не стала исключением и зима текущего года, происходит раннее наступление весны, увеличились продолжительность и теплообеспеченность периода вегетации, а также повторяемость засух, высоких температур воздуха и др. Данные природные изменения оказывают существенное влияние на все отрасли экономики и особенно на сельскохозяйственную и лесную [8], [9], [10]. В вегетационный период растений в восточных и особенно в южных районах Беларуси уже отмечается существенный недостаток влагообеспеченности сельскохозяйственных культур, пересыхание пахотного слоя и другие проявления засух. При недостатке влаги почвы наиболее уязвимы от климатических условий и подвержены климатообусловленным рискам. Поэтому минимизация данных рисков должна рассматриваться как важнейшая цель адаптации аграрного сектора к изменяющемуся климату. Следовательно, актуальной и практически востребованной является оценка степени уязвимости почв Беларуси к негативному воздействию проявления засух и засушливых явлений и других погодно-климатических факторов, как в современных, так и в ожидаемых в будущем условиях внешней среды [3], [6], [8].

В этой связи разработку организационных, экономических, правовых, агрономических и многих других мер реагирования на изменения климатических условий следует считать одной из важнейших государственных задач современной Республики Беларусь. Для реагирования на изменения климата необходимы прогнозные показатели его изменения на ближайшие годы и десятилетия, так как проблему существования природной среды и экономики в новых климатических условиях в настоящее время нельзя считать решенной.

Цель работы заключалась в рассмотрении динамики расширения Новой климатической зоны на территории Беларуси на период до 2030 г.

Материал и методы исследований. Материалы работы – сценарии изменения границ агроклиматических зон Беларуси [3], [9]. Методы исследований – геоинформационный, картографический, статистический, а также использованы общенаучные методы – анализа и синтеза, индукции и дедукции, аналогии и моделирования, абстрагирования и конкретизации.

Результаты исследования и их обсуждение. Следует отметить, что отличительной особенностью Новой зоны являются частые продолжительные засухи и другие засушливые явления, которые приводят к истощению запасов почвенной влаги и нарушению водного баланса растений, особенно на легких песчаных и супесчаных почвах юга Беларуси.

По оценкам многих ученых глобальное потепление в ближайшие десятилетия будет продолжаться, поэтому можно ожидать дальнейшего смещения к северу границ Новой зоны. Это подтверждается нашими расчетами сценариев изменения границ по состоянию на 2015, 2022 и 2030 гг. (рисунок 2, таблица 1).



Рисунок 2 – Площадь Новой агроклиматической зоны: а – на 2015 г., б – на 2022 г., в – на 2030 г.

Оценка расширения Новой климатической зоны на территории Беларуси свидетельствует, что за период с 2015 по 2022 гг. её общая площадь увеличилась на 3334 тыс. га, с 2022 г. по 2030 г. может ещё увеличиться на 4416 тыс. га. В числе данных площадей под влиянием Новой зоной соответственно оказались 1346 тыс. га сельскохозяйственных земель и ещё должны оказаться 2130 тыс. га. Наряду с 1605 тыс. га пахотных земель в 2022 г. их прирост к 2030 г. может составить около 1412 тыс. га.

Таблица 1 – Показатели площади земель Новой климатической зоны по состоянию на 2015, 2022 и 2030 гг., тыс. га

Показатель	2015	2022	2030
Общая площадь	3806	7140	11556
Пахотных земель	774	1605	3017
Под постоянными культурами	18	35	68
Луговых	573	1072	1744
из них улучшенных	410	782	1248
Всего сельскохозяйственных	1365	2711	4841
Лесных	1733	3179	4875
Древесно-кустарниковая растительность	79	143	228
Под болотами	250	416	525
Под водными объектами	87	169	240
Осушенных, всего	785	1481	2175
Осушенных, с/х	661	1281	1876

К 2030 г., из-за расширения Новой зоны, под её влиянием окажутся ещё 1696 тыс. га лесных земель, 109 тыс. га под болотами, 71 тыс. га под водными объектами, 594 тыс. га осушенных земель.

Доля земель под влиянием Новой климатической зоны в Республике Беларусь прирастет с 2022 г. по 2030 г. на 21,3 %, а с 2015 по 2030 гг. – на 37,4 % (таблица 2). Общая площадь земель с 34,4 % в 2022 г. может расшириться до 55,7 % от общей площади Беларуси.

Таблица 2 – Доля площадей земель Новой зоны от общей площади Беларуси, %

Показатель	2015	2022	2030
Общая площадь	18,3	34,4	55,7
Пахотных земель	3,7	7,7	14,5
Под постоянными культурами	0,1	0,2	0,3
Луговых	2,8	5,2	8,4
из них улучшенных	2,0	3,8	6,0
Всего сельскохозяйственных	6,6	13,0	23,3
Лесных	8,3	15,3	23,4
Древесно-кустарниковая растительность	0,4	0,7	1,1
Под болотами	1,2	2,0	2,5
Под водными объектами	0,4	0,8	1,2
Осушенных, всего	3,8	7,1	10,5
Осушенных, с/х	3,2	6,2	9,0

При этом удельный вес сельскохозяйственных земель с 2022 г. прирастет на 10,3 %, пахотных земель на 6,8 %, лесных – на 8,1 %, под болотами – на 0,5 %, под водными объектами – на 0,4 %, осушенных – на 3,4 %.

При анализе площадей земель Новой климатической зоны можно увидеть, что к 2030 г. в их структуре увеличится количество пахотных земель на 3,6 %, сельскохозяйственных – на 3,9 % и уменьшится – лесных на 2,3 %, под болотами – на 1,3 %, под водными объектами – на 0,3 % и осушенных земель – на 1,9 % (таблица 3).

Таблица 3 – Доля отдельных категорий земель в общей площади Новой зоны, %

Показатель	2015	2022	2030
Общая площадь	100	100	100
Пахотных земель	20,3	22,5	26,1
Под постоянными культурами	0,5	0,5	0,6
Луговых	15,1	15,0	15,1
из них улучшенных	10,8	11,0	10,8
Всего сельскохозяйственных	35,9	38,0	41,9
Лесных	45,5	44,5	42,2
Древесно-кустарниковая растительность	2,1	2,0	2,0
Под болотами	6,6	5,8	4,5
Под водными объектами	2,3	2,4	2,1
Осушенных, всего	20,6	20,7	18,8
Осушенных, с/х	17,4	17,9	16,2

Выводы. В Республике Беларусь продолжается изменение границ агроклиматических областей: Северная агроклиматическая область практически распалась, а на юге Полесья образовалась более теплая Новая область. Доля земель под влиянием Новой климатической зоны в Республике Беларусь прирастет с 2022 г. по 2030 г. на 21,3 %, В южных районах республики возрастает проблема дефляции почв. В Белорусском Полесье наиболее остро ощущаются последствия изменения климата, так как здесь преобладают легкие песчаные, супесчаные и торфяные почвы, отличающиеся низкой антидефляционной устойчивостью.

При дальнейшем потеплении следует ожидать в сельском и лесном хозяйствах увеличения площадей лесов и торфяных болот с повышенной степенью пожарной опасности, а также с большей вероятностью распространения вредителей и болезней растений, что, в свою очередь, может неблагоприятно сказываться на экономике данных отраслей.

Для смягчения последствий потепления климата необходимо создание сортов теплолюбивых культур и их внедрение в южных регионах Гомельской и Брестской областей. Также целесообразно более интенсивное насыщение севооборотов озимыми, теплолюбивыми культурами, которые более пригодны для возделывания на легких почвах. Для сохранения в почве влаги требуются способы обработки почвы с более щадящими и экологичными её формами, оставляющими на поверхности растительные остатки, а также помогающими снегозадержанию и обладающими антидефляционной способностью.

Увеличение числа засушливых явлений на территории республики и отсутствие организационных, экономических, правовых, агрономических и других мер реагирования на эти изменения могут приводить не только к значительному экономическому ущербу, но и негативно влиять на биоразнообразие [9], [10].

Вместе с тем, следует отметить и положительную сторону этой ситуации: агроклиматические условия становятся благоприятными для возделывания сельскохозяйственных теплолюбивых культур, которые ранее являлись нетипичными для нашей территории. К таким культурам относятся кукуруза, соя, подсолнечник, просо, сорговые культур, арбузы и др.

Изменение границ агроклиматических областей требует правильных оценок складывающихся агроклиматических условий внутри каждой области и своевременной на неё реакции со стороны аграриев.

Литература

1. Экологическое право : учеб. пособие / С. А. Балашенко [и др.] ; под ред. Т. И. Макаровой, В. Е. Лизгаро. – Минск : БГУ, 2008. – 379 с.
2. Климатические изменения : взгляд из России / Под ред. В. И. Данилова-Данильяна. – М. : ТЕИС, 2003. – 416 с.
3. Куликов, Я. К. Агроэкология : учеб. пособие / Я. К. Куликов. – Минск : Выш. шк., 2012. – 319 с.
4. Проект ClimaEAST «Агроклиматическое зонирование территории Беларуси с учетом изменения климата в рамках разработки национальной стратегии адаптации сельского хозяйства к изменению климата в Республике Беларусь» / В. Мельник, В. Яцухно, Н. Денисов, Л. Николаева, М. Фалолеева. – Минск-Женева, 2017. – 84 с.
5. Мельник, В. И. Особенности изменения климата на территории Республики Беларусь за последние десятилетия / В. И. Мельник, Е. В. Комаровская // Научно-методическое обеспечение деятельности по охране окружающей среды: проблемы и перспективы : сб. научных трудов. – Минск : Бел НИЦ «Экология», 2011. – С. 77–84.
6. Шкляр, А. Х. Климатические ресурсы Белоруссии и использование их в сельском хозяйстве / А. Х. Шкляр. – Минск : Выш. шк., 1973. – 300 с.
7. Давыденко, О. В. Агроклиматическое районирование Беларуси в условиях изменения климата / О. В. Давыденко // Вестник БГУ. – 2009. Сер. 2, № 1. – С. 106–110.
8. Мельник, В. И. Влияние изменения климата на агроклиматические ресурсы и продуктивность основных сельскохозяйственных культур Беларуси : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.23 / В. И. Мельник. – Минск, 2004. – 21 с.
9. Динамика лесистости Беларуси [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://greenbelarus.info/articles/23-07-2019/chto-takoe-normalnyy-les-dialog-v-semi-voprosah-i-otvetah>. – Дата доступа : 25.02.2021.
10. Эколого-ориентированное развитие лесного хозяйства Беларуси в условиях климатических изменений : учеб. пособие для доп. образования / И. В. Войтов, В. Г. Шатравко, Н. Н. Юревич, А. В. Ледницкий [и др.]. – Минск : БГТУ, 2019. – 201 с.

Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 31.05.2022

Дигенеи чужеродного вида гастропод *Lithoglyphus naticoides* на территории ПГРЭЗ

Н.Г. НАДИНА, Л.Н. АКИМОВА

В работе представлены результаты обследования чужеродного вида гастропод *Lithoglyphus naticoides* из реки Припять с территории ПГРЭЗ. Выявлено одиннадцать видов дигеней, сопряженных с данным видом гастропод. Установлены показатели зараженности *L. naticoides* каждым видом дигеней. Доминировал по встречаемости комплекс видов *Apophallus muehlingi* / *A. donicus*, зараженность гастропод им достигала 6,91 %. Другие виды дигеней отмечались гораздо реже и зараженность ими не превышала 1,76 %.

Ключевые слова: чужеродный вид, *Lithoglyphus naticoides*, дигенеи, ПГРЭЗ, Припять.

The results of a survey of an alien gastropod species *Lithoglyphus naticoides* from the Pripyat River on the territory of the PSRER are presented. Eleven species of the digeneans associated with this species of gastropods have been identified. The prevalence infestation by each species of digeneans from *L. naticoides* are established. The species complex *Apophallus muehlingi* / *A. donicus* was dominant, the infestation of gastropods with it reached 6,91 %. Other digenean species were noted much less frequently and the prevalence of gastropods with them did not exceed 1,76 %.

Keywords: alien species, *Lithoglyphus naticoides*, digeneans, PSRER, Pripyat.

Введение. Чужеродный для территории Беларуси вид водных гастропод *Lithoglyphus naticoides* (C. Pfeiffer, 1828) является представителем Понто-Азовской фауны. В плиоцене данный вид был распространен от Западной Европы до Западной Сибири [1, с. 36]. В период оледенений его ареал сократился до пресноводных бассейнов Черного и Азовского морей, а в голоцене вновь начал расширяться [1, с. 36], [2, с. 1199], [3, с. 393], [4, с. 376]. Данный процесс продолжается и в настоящее время [5, с. 113], [6, с. 263], [2, с. 1199], [7, с. 14], [8, с. 364]. На территории Беларуси *L. naticoides* впервые упоминается в начале прошлого века в бассейне р. Припять [9, с. 91].

На территорию Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ) гастроподы *L. naticoides* попали с территории Украины по Центральному инвазионному коридору. Вместе с ними на территории Беларуси попали и ассоциированные с ними дигенеи (Trematoda: Digenea), разнообразие которых совсем недавно начало изучаться отечественными исследователями [10, с. 84]. В связи с этим цель нашей работы – представить данные по таксономическому разнообразию сопряженных с данным видом гастропод дигеней и показателям зараженности ими на территории ПГРЭЗ.

Материалы и методы. Сборы гастропод проводились в реке Припять на территории ПГРЭЗ в период с 2018 г. по 2021 г. За период исследований собрано и обследовано 6018 экз. гастропод: 815 экз. в 2018 г., 2245 экз. в 2019 г., 2402 экз. в 2020 г. и 556 экз. в 2021 г.

Объектами исследований служили дигенеи на стадии церкарии. Церкарии – это свободно плавающие личинки амфимиктного поколения дигеней, которые для продолжения жизненного цикла должны покинуть моллюсков и попасть в следующего хозяина.

Источником церкарий служили зараженные дигенейми моллюски. Качественный сбор гастропод осуществлялся вручную на мелководье (до 0,5 м). Собранных гастропод помещали в пластиковые емкости с крышкой, сливали воду и транспортировали, избегая нагревания емкостей. При исследовании моллюсков на зараженность дигенейми использовали метод вскрытия. Основным условием изучения морфологии церкарий является работа исключительно с живым материалом.

Под зараженностью моллюсков дигенейми – экстенсивностью инвазии (ЭИ) – принималось отношение количества зараженных особей к общему количеству обследованных, выраженное в процентах.

Результаты. Обследование гастропод *L. naticoides* в отдельные годы исследований показало, что их средняя зараженность дигенейми находилась в небольшом интервале от 9,3 %

до 12,3 % (рисунок 1). Общая средняя зараженность гастропод за весь период исследований составила $10,7 \pm 2,1$ %.

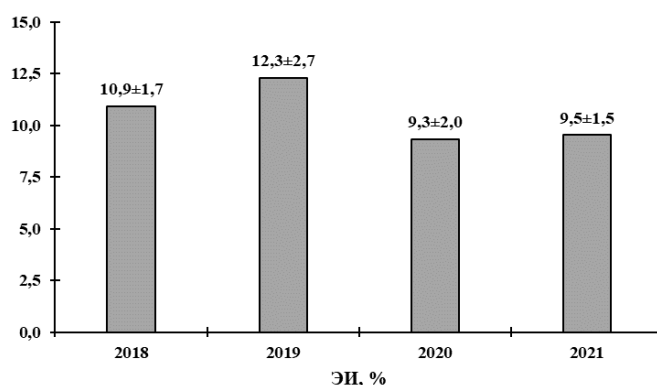


Рисунок 1 – Средняя зараженность гастропод *Lithoglyphus naticoides* дигенейми в отдельные годы исследований на территории ПГРЭЗ

На основании морфологического строения церкарий и в соответствии с описанием церкарий разными авторами определен их таксономический состав [11, с. 91], [12, с. 11], [13, с. 467], [14, с. 170–175], [15, с. 253].

Таблица 1 – Разнообразие дигеней на стадии церкарии, ассоциированных с гастроподами *Lithoglyphus naticoides*, и показатель зараженности (ЭИ, %) в отдельные годы исследований

Вид, семейство и надсемейство дигеней	2018	2019	2020	2021
Надсемейство Schistosomatoidea Stiles & Hassall, 1898				
Семейство Aporocotylidae Odhner, 1912				
<i>Sanguinicola volgensis</i> (Rašin, 1929)	2,0	–	–	3,4
Надсемейство Echinostomatoidea Looss, 1902				
Семейство Echinostomatidae Looss, 1899				
<i>Echinochasmus</i> sp.	–	0,04	–	–
Надсемейство Pronocephaloidea Looss, 1899				
Семейство Notocotylidae Lühe, 1909				
<i>Notocotylus</i> sp.	0,2	0,1	0,2	–
Надсемейство Opecoeloidea Ozaki, 1925				
Семейство Opecoelidae Ozaki, 1925				
<i>Nicolla skrjabini</i> (Iwanitzky, 1928)	–	–	0,1	–
Надсемейство Opisthorchioidea Looss, 1899				
Семейство Heterophyidae Leiper, 1909				
<i>Apophallus</i> spp.	5,3	8,7	6,5	3,8
Надсемейство Monorchioidea Odhner, 1911				
Семейство Lissorchiidae Magath, 1917				
<i>Palaeorchis</i> sp.	0,5	0,4	0,2	0,4
Надсемейство Microphalloidea Ward, 1901				
species incertae sedis				
<i>Xiphidiocercariae</i> sp. I Odening, 1971	–	0,5	0,3	1,3
<i>Xiphidiocercariae</i> sp. II Odening, 1971	0,1	0,3	0,3	–
Семейство Microphallidae Ward, 1901				
Microphallidae gen. sp.	0,7	0,1	0,2	0,4
Семейство Phaneropsolidae Mehra, 1935				
<i>Lecithodolffusia</i> sp.	2,1	2,2	1,5	0,7

Всего нами отмечено 11 видов дигеней из 8 семейств и 7 надсемейств, из которых только для 4 видов известен жизненный цикл – *Sanguinicola volgensis*, *Nicolla skrjabini*, *Apophallus muehlingi* (Jagerskiold, 1899) и *A. donicus* (Skrjabin & Lindtrop, 1919).

Дигеней рода *Apophallus* представлены в наших исследованиях комплексом видов *Apophallus muehlingi* / *A. donicus*. Согласно литературным данным, оба вида на стадии церкарии имеют идентичную морфологию и близкие метрические показатели [13, с. 465–466].

Также оба данных вида регистрировались у рыб в реке Припять [16, с. 204–205], поэтому мы считаем вполне обоснованным в своих исследованиях использование комплекса видов *Apophallus muehlingi* / *A. donicus* (далее по тексту используется *Apophallus* spp., подразумевающий комплекс двух видов).

Следующие 4 вида на основании морфологии церкарий определены на уровне рода (*Echinochasmus*, *Notocotylus*, *Palaeorchis* и *Lecithodolffusia*), еще один вид определен на уровне семейства (*Microphallidae*) и два вида имеют неясное систематическое положение (для них описана только стадия церкарии), но по морфологическому строению их можно отнести к представителям надсемейства *Microphalloidea*.

На рисунке 2 представлены численные значения общей средней зараженности гастропод дигениями со стандартным отклонением для гастропод *L. naticoides* за весь период исследований.

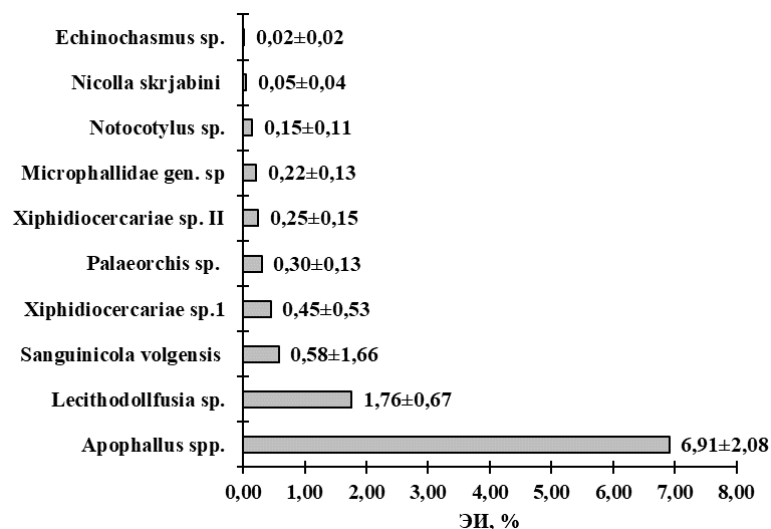


Рисунок 2 – Общая средняя зараженность гастропод *Lithoglyphus naticoides* дигениями со стандартным отклонением за период 2018–2021 гг. исследований на территории ПГРЭЗ

Среди зарегистрированных дигений абсолютным доминантом по встречаемости являются дигении комплекса видов *Apophallus* spp., ими было заражено 6,91 % гастропод *L. naticoides*. Далее следуют дигении рода *Lecithodolffusia* – 1,76 %. Общая средняя зараженность остальными видами дигений была меньше одного процента и находилась в диапазоне от 0,02 % до 0,58 %.

Только два вида дигений (*Lecithodolffusia* sp. и *Palaeorchis* sp) и один комплекс видов (*Apophallus* spp.) отмечались у гастропод *L. naticoides* ежегодно за весь период исследований (рисунок 3).

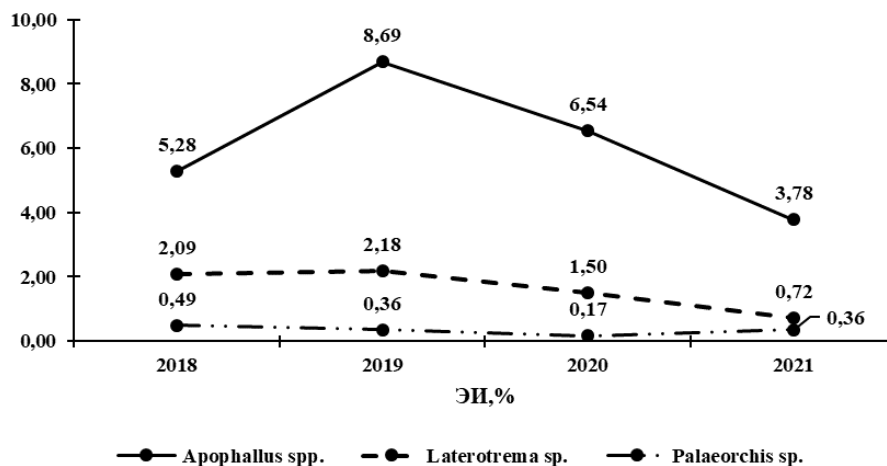


Рисунок 3 – Средняя зараженность гастропод *Lithoglyphus naticoides* комплексом видов *Apophallus* spp. и видами *Lecithodolffusia* sp. и *Palaeorchis* sp. в отдельные годы исследований на территории ПГРЭЗ

Как следует из рисунка 3, изменения зараженности гастропод комплексом видов *Apophallus* spp. в отдельные годы исследований находились в диапазоне пяти процентов, для вида *Laterotrema* sp. не более полутора процентов, а для вида *Palaeorchis* sp. около трети процента.

В таблице 2 приведены данные по зараженности *L. naticoides* конкретными видами дигеней, зарегистрированных на территории ПГРЭЗ (наши данные), и данные, полученные исследователями в Германии [14, с. 169], Литве [15, с. 252] и России [17, с. 100–103], [18, с. 53–54]. Для собственных данных по зараженности гастропод дигенейми в таблице 2 приводятся минимальные и максимальные значения в отдельные годы исследований за весь период.

Таблица 2 – Показатели зараженности гастропод *L. naticoides* видами дигеней, регистрируемыми на территории ПГРЭЗ (наши данные), Германии, Литвы и России

Виды дигеней	Prevalence or interval of prevalence, %			
	Наши данные	Германия	Литва	Россия
<i>Sanguinicola volgensis</i>	2,0–3,4	0,7	2,8	1,8–3,6
<i>Echinochasmus</i> sp.	0,04	–	0,2	–
<i>Notocotylus</i> sp.	0,1–0,2	0,2	0,2	–
<i>Nicolla skrjabini</i>	0,1	0,7	0,1	0,6–1,8
<i>Apophallus muehlingi</i> / <i>A. donicus</i>	3,8–8,7	16,6	18,8	34,5–63,7
<i>Palaeorchis</i> sp.	0,2–0,5	2,2	0,6	12,1–15,5
<i>Xiphidiocercariae</i> sp. I	0,3–12,8	0,4	3,9	–
<i>Xiphidiocercariae</i> sp. II	0,2–4,9	0,4	0,1	–

Для начала отметим, что практически во всех странах, где проводились подобные исследования, представлен вид *A. muehlingi*, а морфометрически идентичный ему вид *A. donicum* на стадии церкарии не упоминается. При этом у рыб в местах сбора гастропод в России [17, с. 102] и Германии [13, с. 460–461] вид *A. donicus* присутствовал. Поэтому вполне вероятно, что в ряде случаев у авторов могли быть оба вида, но из-за сложности дифференциации видов указывался только один вид. Из таблицы 2 видно, что у всех исследователей зараженность гастропод дигенейми рода *Apophallus* имеет самые высокие показатели, достигая 63,7 % в России. Для остальных видов дигеней зараженность у гастропод примерно соответствует нашим данным с территории ПГРЭЗ. Два вида на стадии церкарии регистрировались только на территории Беларуси – *Microphallidae* gen. sp. и *Lecithodollfusia* sp. [10, с. 155].

При наличии данных по видовому разнообразию дигеней на стадии церкарии существует один прикладной аспект, который выражается в том, что если церкарии идентифицированы до вида или рода, то для них известен класс дефинитивных хозяев, у которых они будут паразитировать на стадии мариты [19, с. 435], [20, с. 48, 393], [21, с. 128, 181, 458, 503]. В нашем случае даже для видов, которые были определены только до уровня надсемейства (*Xiphidiocercariae* sp. I и sp. II) или семейства (*Microphallidae* gen. sp.), также можно указать класс (или классы) дефинитивных хозяев. Это позволяет нам проанализировать, как зарегистрированные нами виды дигеней будут распределены по классам дефинитивных хозяев. У млекопитающих (класс Mammalia) свой жизненный цикл заканчивают зарегистрированных 5 видов – *A. donicus*, *Notocotylus* sp., *Microphallidae* gen. sp., *Lecithodollfusia* sp.; *Xiphidiocercariae* sp. I и *Xiphidiocercariae* sp. II; у птиц (класс Aves) семь видов – *Echinochasmus* sp., *Notocotylus* sp., *A. muehlingi*, *Microphallidae* gen. sp., *Lecithodollfusia* sp., *Xiphidiocercariae* sp. I и *Xiphidiocercariae* sp. II; у рыб (класс Actinopterygii) три вида – *S. volgensis*, *N. skrjabini* и *Palaeorchis* sp. Их распределение в процентном соотношении по дефинитивным хозяевам представлено на рисунке 4.

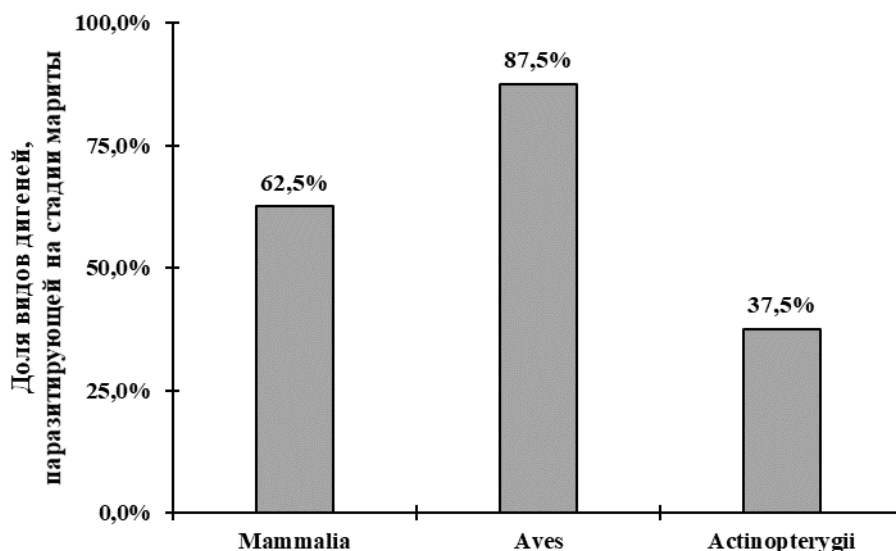


Рисунок 4 – Распределение зарегистрированных видов дигеней, сопряженных с гастроподами *L. naticoides*, по классам их дефинитивных хозяев

Как видно из рисунка 4, наибольшее количество видов дигеней, в жизненном цикле которых гастроподы *L. naticoides* выполняют роль промежуточных хозяев, на стадии мариты паразитирует у птиц. Затем в качестве дефинитивных хозяев следуют млекопитающие. Меньше всего видов развивается с участием рыб. Таким образом, на территории Беларуси циркуляция видов дигеней, сопряженных с гастроподами *L. naticoides*, происходит преимущественно с участием птиц и млекопитающих.

Заключение. Как показали наши исследования, на территории ПГРЭЗ фауна дигеней, сопряженных с гастроподами *L. naticoides*, представлена 11 видами, из которых только для четырех известны жизненные циклы и стадия церкарии соотнесена со стадией мариты. Два вида дигеней (*Lecithodolffusia* sp. и *Palaeorchis* sp.) и один комплекс видов (*Apophallus* spp.) отмечались у гастропод *L. naticoides* ежегодно на протяжении всего периода исследований. Показано, что циркуляция видов дигеней, сопряженных с гастроподами *L. naticoides*, происходит преимущественно с участием представителей класса Aves и Mammalia.

Литература

1. Старобогатов, Я. И. Фауна моллюсков и зоогеографическое районирование континентальных водоемов земного шара / Я. И. Старобогатов. – Ленинград : Наука, 1970. – 372 с.
2. Grigorovich, I. A. Patterns and mechanisms of aquatic invertebrate introductions in the Ponto-Caspian region / I. A. Grigorovich [et al.] // Can. J. Fish. Aquat. Sci. – 2002. – Vol. 59. – P. 1189–1208.
3. Jazdzewski, K. Invasive Ponto-Caspian species in waters of the Vistula and Oder basins and southern Baltic Sea / K. Jazdzewski, A. Konopacka // Invasive Aquatic Species of Europe. Distribution, Impacts and Management. – Boston : London Kluwer Academic Publishers, 2002. – P. 373–383.
4. Nehring, S. Biological invasions into German waters : an evaluation of the importance of different humanmediated vectors for nonindigenius macrozoobenthos species / S. Nehring // Invasive Aquatic Species of Europe. Distribution, Impacts and Management. – Boston : London Kluwer Academic Publishers, 2002. – P. 373–383.
5. Devin, S. Changes in functional biodiversity in an invaded freshwater ecosystem : The Moselle River / S. Devin [et al.] // Hydrobiologia. – 2005. – Vol. 542. – P. 113–120.
6. Gollasch, S. National checklist for aquatic alien species in Germany / S. Gollasch, S. Nering // Aquatic Invasions. – 2006. – Vol. 1, № 4. – P. 245–269.
7. Tittizer, T. Aquatische Neozoen im Makrozoobenthos der Binnenwasserstraßen Deutschlands / T. Tittizer [et al.] // Lauterbornia. – 2000. – Vol. 39. – P. 1–72.
8. Van der Verde, G. Invasions by alien species in inland freshwater bodies in Western Europe : The Rhine delta / G. Van der Verde [et al.] // Invasive Aquatic Species of Europe. Distribution, Impacts and Management. – Boston : London Kluwer Academic Publishers, 2002. – P. 360–372.

9. Розен, О. В. Моллюски, собранные в Пинском и Мозырском уездах Минской губернии / О. В. Розен // Труды студенческого кружка для исследований русской природы, состоящего при Московском императорском университете/ Под ред. Н. В. Воронкова [и др.]. – М. : Университетская типография, 1907. – Т. 3. – 93 с.
10. Акимова, Л. Н. Современное состояние фауны дигеней (Trematoda: Digenea) брюхоногих моллюсков (Mollusca: Gastropoda) в водных экосистемах Беларуси / Л. Н. Акимова. – Минск : Беларус. навука, 2016. – 243 с.
11. Акимова, Л. Н. Первое обнаружение церкарий семейства Microphallidae Ward, 1901 (Trematoda) у *Lithoglyphus naticoides* Pfeiffer, 1828 (Mollusca: Hydrobiidae) в Беларуси / Л. Н. Акимова, Е. И. Бычкова // Озёрные экосистемы : биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды : IV Междунар. науч. конф., Минск–Нарочь, 12–17 сентября 2011 г. / БГУ ; редкол.: Т. М. Михеева. – Минск : Изд. центр БГУ, 2011. – С. 91–92.
12. Стенько, Р. П. Жизненный цикл трематоды *Crowcrocaecum skrjabini* (Iwanitzky, 1928) (Allocreadiata, Opcoelidae) / Р. П. Стенько // Паразитология. – 1976. – Т. 10, № 1. – С. 9–11.
13. Odening, K. Der Lebenszyklus des Trematoden *Apophallus donicus* in Berlin im Vergleich *A. muehlingi* / K. Odening // Biologisches Zentralblatt. – 1973. – Vol. 92. – P. 455–494.
14. Odening, K. Der trematodenbefall von *Lithoglyphus naticoides* (Gastropoda) im Berliner Müggelsee 1968 / K. Odening // Parasitolog. Schr. Reihe. – 1971. – Vol. 21. – P. 169–178.
15. Staneviciute, G. Digenean parasites in prosobranch snail *Lithoglyphus naticoides* population with the morphological description of *Echinochasmus* sp. cercaria / G. Staneviciute, R. Petkeviciute, V. Kiseliene // Ekologija. – 2008. – Vol. 54, № 4. – P. 251–255.
16. Бычкова, Е. И. Гельминты позвоночных животных и человека на территории Беларуси: каталог / Е. И. Бычкова [и др.] ; Нац. акад. наук Беларуси, Науч.-практ. центр по биоресурсам. – Минск : Беларус. навука, 2017. – 316 с.
17. Тютин, А. В. Паразиты гидробионтов-вселенцев в бассейне верхней Волги / А. В. Тютин [и др.] // Российский журнал биологических инвазий. – 2012. – № 4 – С. 96–105.
18. Тютин, А. В. Первое обнаружение черноморского моллюска *Lithoglyphus naticoides* (Gastropoda) и ассоциированных с ним видоспецифичных трематод в бассейне верхней Волги / А. В. Тютин, Ю. В. Слынько // Российский журнал биологических инвазий. – 2008. – № 1. – С. 23–30.
19. Keys to the Trematoda. Volume 1 / D. I. Gibson, A. Jones, R. A. Bray ; CABI Publishing Wallingford & Natural History Museum. – London, 2002. – 521 p.
20. Keys to the Trematoda. Volume 2 / A. Jones, R. A. Bray, D. I. Gibson ; CABI Publishing Wallingford & Natural History Museum. – London, 2005. – 745 p.
21. Keys to the Trematoda. Volume 3 / R. A. Bray, A. Jones, D. I. Gibson ; CABI Publishing Wallingford & Natural History Museum. – London, 2008. – 848 p.

Охраняемые виды птиц Рогачёвского района

О.А. ОСТРОВСКИЙ, М.Г. ДМИТРЕНОК, П.А. ПАКУЛЬ, М.В. ТАРАНОВИЧ

Авторами собраны воедино опубликованные и неопубликованные сведения о редких птицах Рогачёвского района Гомельской области с 1980-х гг. прошлого столетия. Проанализированы результаты научных исследований, проведённых на территории района в нынешнем столетии, включая собственные исследования в 2010, 2011, 2014, 2017, 2019 и 2020 гг. Приводится список охраняемых видов птиц Рогачёвского района, который включает 25 видов птиц, внесённых в Красную книгу Республики Беларусь. Приведены сведения по распространению и фенологии редких птиц. Для ряда гнездящихся птиц сообщаются краткие сведения о находках гнёзд.

Ключевые слова: птицы, Красная книга, Рогачёвский район, Гомельская область.

The authors have collected together the published and unpublished information about the rare birds of the Rogachev district of the Gomel region since the 1980s. The results of the scientific research conducted on the territory of the district in the current century, including the authors' own studies in 2010, 2011, 2014, 2017, 2019 and 2020, are analyzed. A list of protected bird species of the Rogachev district is given. This list includes 25 species of birds listed in the Red Book of the Republic of Belarus. The information on the distribution and phenology of rare birds is given. For some nesting birds, brief information about nests is reported.

Keywords: birds, the Red data book, Rogachev district, Gomel region.

Введение. Опубликованные в прошлом столетии сведения по некоторым редким видам птиц Рогачёвского района (чёрный аист *Ciconia nigra*, серый журавль *Grus grus*, малая чайка *Larus minutus*, малая крачка *Sterna albifrons*, обыкновенный зимородок *Alcedo atthis*, зелёный дятел *Picus viridis*) можно найти во втором издании Красной книги БССР [1]. Орнитологические исследования, включавшие Рогачёвский район, проводились сотрудниками Института зоологии НАН Беларуси в 2004 г. В 2005 г. была проведена инвентаризация охраняемых видов животных долины Днепра на территории Рогачёвского района. В 2011 г. были проведены целенаправленные работы по выявлению редких лесных видов животных Рогачёвского района. Однако в результате выполнения всех этих работ список охраняемых видов птиц (16 видов) всё же не был достаточно полным.

В 2019 г. нами проведены обследование ранее известных мест обитания охраняемых видов птиц и поиск новых мест обитания птиц, относящихся к видам, включённым в Красную книгу Республики Беларусь на территории ГЛХУ «Рогачёвский лесхоз». В результате исследований был дополнен список «краснокнижных» видов птиц. Новые выявленные места обитания охраняемых видов птиц, требующие охраны, нанесены на планы лесоустройства. Разработаны проекты паспортов и охранных обязательств по местам обитания видов животных, включённых в Красную книгу Республики Беларусь.

Материалы и методы исследований. Выявление охраняемых видов птиц проводилось с конца июня по конец ноября 2019 года на территории ГЛХУ «Рогачёвский лесхоз» Гомельской области с использованием спутниковых карт и карт лесоустройства. В статью также включены данные по встречам редких видов птиц на территории Рогачёвского района в апреле 2010 г., в июне и ноябре 2011 г., в период с 21 по 25 июля 2014 г., при обследовании поймы Друти и Днепра в пределах Рогачёвского района 04.06.2017 г. и 07.07.2020 г. Кроме собственных данных в статью включены личные сообщения о встречах редких видов птиц других авторов.

Авторы выражают искреннюю благодарность Д.В. Астапенко, Э.А. Монгину за помощь в организации и проведении полевых исследований, М.В. Колоскову, А.В. Кулаку, Д.А. Кителю, Д.И. Шамовичу, В.Н. Лебедько, А.О. Саулову за предоставленную информацию о встречах птиц.

Основные применявшиеся методики учётов охраняемых видов животных:

1. Маршрутный учёт птиц.

Учёты проводили по просекам и дорогам. Длина маршрута составляла не менее 1 км. Ширина учётной полосы для мелких видов птиц с небольшими гнездовыми территориями (большинство видов певчих воробьиных птиц) – 100 м (по 50 м в каждую сторону от учётчика). Для птиц с крупными гнездовыми участками (дятлы) учёт проводился на полосу 600 м (300 м в каждую сторону).

Учёт водоплавающих и околоводных птиц (утки, чайковые) проводился в пойме р. Друть в пределах Рогачёвского района с использованием байдарки. Помимо русла реки обследовались пойменные водоёмы (старицы, озёра). Регистрировались попавшие в поле зрения пары, одиночные птицы и стаи.

2. Визуальный метод учёта дневных хищных птиц и чёрного аиста.

Выявление гнездовых территорий хищных птиц и чёрного аиста осуществлялось визуальным методом (с помощью бинокля и зрительной трубы (20–60х) из серии учётных точек, расположенных в 500–1000 м от опушки обследуемого лесного массива). Дальнейший поиск жилых гнёзд проводился на выявленных территориях путём прочесывания леса, проводились проверки уже известных гнёзд.

3. Метод пеленгации по голосам.

Для ряда видов птиц, голоса которых слышны на большом расстоянии (совы), применялся метод пеленгации по голосам. Учёты сов проводились в сентябре в вечернее время (около 30 минут после наступления сумерек). Выбранная площадка прослушивалась из ряда точек не менее чем 2-мя учётчиками. Из каждой точки записывался азимут на вокализирующую птицу, затем по пересечениям азимутов вычислялось и заносилось на карту местоположение птиц. Для учёта также использовалась звуковая приманка (проигрывание голоса птицы с помощью звуковоспроизводящего оборудования).

Результаты исследований. Список редких видов птиц Рогачёвского района включает 25 видов птиц, занесённых в Красную книгу Республики Беларусь (таблица).

Таблица – Список охраняемых видов птиц Рогачёвского района

№ п/п	Систематическое положение	Статус охраны в Беларуси*
Отряд Аистообразные – Ciconiiformes		
Семейство: Аистовые – Ciconiidae		
1	Чёрный аист – <i>Ciconia nigra</i>	III
Семейство: Цаплевые – Ardeidae		
2	Большая выпь – <i>Botaurus stellaris</i>	III
Отряд Гусеобразные – Anseriformes		
Семейство: Утиные – Anatidae		
3	Большой крохаль – <i>Mergus merganser</i>	III
Отряд Ястребообразные – Accipitriformes		
Семейство: Ястребиные – Accipitridae		
4	Чёрный коршун – <i>Milvus migrans</i>	III
5	Орлан-белохвост – <i>Haliaeetus albicilla</i>	I
6	Малый подорлик – <i>Aquila pomarina</i>	III
Отряд Соколообразные – Falconiformes		
Семейство: Соколиные – Falconidae		
7	Обыкновенная пустельга – <i>Falco tinnunculus</i>	III
8	Чеглок – <i>Falco subbuteo</i>	IV
Отряд Журавлеобразные – Gruiformes		
Семейство: Пастушковые – Rallidae		
9	Коростель – <i>Crex crex</i>	III
Семейство: Журавлиные – Gruidae		
10	Серый журавль – <i>Grus grus</i>	III
Отряд Ржанкообразные – Charadriiformes		
Семейство: Кулики-сороки – Haematopodidae		
11	Кулик-сорока – <i>Haematopus ostralegus</i>	III
Семейство: Бекасовые – Scolopacidae		

Окончание таблицы

12	Турухтан – <i>Philomachus pugnax</i>	III
13	Гаршнеп – <i>Limicola falcinellus</i>	IV
14	Дупель – <i>Gallinago media</i>	II
Семейство: Чайковые – Laridae		
15	Малая чайка – <i>Larus minutus</i>	III
Семейство: Крачковые – Sternidae		
16	Малая крачка – <i>Sterna albifrons</i>	II
Отряд СOVOобразные – Strigiformes		
Семейство: Совиные – Strigidae		
17	Филин – <i>Bubo bubo</i>	II
18	Воробьиный сыч – <i>Glaucidium passerinum</i>	IV
19	Болотная сова – <i>Asio flammeus</i>	IV
Отряд Ракшеобразные – Coraciiformes		
Семейство: Зимородковые – Alcedinidae		
20	Обыкновенный зимородок – <i>Alcedo atthis</i>	III
Семейство: Сизоворонковые – Coraciidae		
21	Сизоворонка – <i>Coracias garrulus</i>	I
Отряд Дятлообразные – Piciformes		
Семейство: Дятловые – Picidae		
22	Зелёный дятел – <i>Picus viridis</i>	III
23	Белоспинный дятел – <i>Dendrocopos leucotos</i>	IV
Отряд Воробьинообразные – Passeriformes		
Семейство: Мухоловковые – Muscicapidae		
24	Мухоловка-белошейка – <i>Ficedula albicollis</i>	IV
Семейство: Овсянковые – Emberizidae		
25	Садовая овсянка – <i>Emberiza hortulana</i>	II

Примечание: статус охраны в Беларуси (категории Красной книги Республики Беларусь): I – находящиеся на грани исчезновения, II – исчезающие, III – уязвимые, IV – потенциально уязвимые [2].

В систематическом плане охраняемые птицы данной территории относятся к 10 отрядам и 17 семействам. Два вида (кулик-сорока и дупель) внесены в Красный список Международного союза охраны природы и являются близкими к угрожаемым видам [3].

Ниже представлены сведения по встречам редких видов птиц на территории Рогачёвского района в разные годы.

Большая выпь. Местообитание вида выявлено в 2011 г. на затопленных и заросших тростником торфоразработках вблизи д. Озерище (сообщение М.В. Колоскова).

Чёрный аист. Одиночные взрослые птицы встречались 09.07.2019 г. в пойме р. Добрицы и севернее д. Малая Крушиновка. Взрослая птица наблюдалась на уже известном охраняемом гнезде чёрных аистов в период гнездования 20.06.2019 г. вблизи д. Партизаны. В первой половине июля в 1,7 км от этого гнезда найдено еще одно жилое гнездо чёрного аиста на дубе (сообщение А.В. Кулака). Недалеко от этого гнезда, в пойме Днепра, 11.07.2019 г. наблюдались 3 чёрных аиста. Ещё одно известное охраняемое гнездо чёрных аистов находится западнее д. Ходосовичи. Таким образом, в Рогачевском районе гнездится не менее 3 пар чёрного аиста.

Большой крохаль. Одиночная самка отмечена в гнездовой период 04.06.2017 г. на р. Друти у д. Озераны.

Малый подорлик. В 2011 г. найдено гнездо малых подорликов в заболоченном пойменном черноольшанике вблизи д. Слобода. В 2019 г. это гнездо найдено обвалившимся. Охотящаяся птица отмечена 10.07.2019 г. вблизи д. Большая Крушиновка. Птица с кормом (полевка) наблюдалась дважды 10.07.2019 г. на опушке леса вблизи д. Турсковый. Там же 25.09.2019 г. в старовозрастном черноольшанике найдено гнездо малого подорлика на ольхе, на высоте 18 метров. В 2 км от д. Свержень 11.07.2019 г. найдено гнездо другой пары малых подорликов, на ели, на боковой ветке, на высоте 16–18 м. В гнезде вместе со взрослой птицей находился полуоперённый птенец. Одиночная птица отмечена 26.09.2019 г. вблизи д. Виричье. Также подтверждены 2 уже известных места гнездования малых подорликов на территории Рогачёвского опытно-производственного лесничества.

Чёрный коршун. Вероятно, гнездится, но поиск гнёзд не проводился. Охотящиеся одиночные птицы наблюдались 04.06.2017 г. в пойме Друти у д. Озераны и 10–11.07.2019 г. в пойме Днепра, в 2 км к северо-западу от д. Свержень.

Орлан-белохвост. Взрослая птица наблюдалась 21.11.2019 г. сидящей на поле между деревнями Малая Крушиновка и Добротино (на границе Рогачёвского и Кировского р-нов).

Чеглок. Вероятно, гнездится, однако поиск гнёзд не проводился. Одиночные птицы отмечены 04.06.2017 г. в пойме Друти вблизи д. Колосы, 11.07.2019 г. в пойме Днепра, в 2 км к северо-западу от д. Свержень, 07.07.2020 г. на вырубке вблизи д. Новый Кривск.

Обыкновенная пустельга. Вероятно, гнездится, однако поиск гнёзд не проводился. Одиночная птица наблюдалась в начале июля 2019 г. в лесном массиве южнее д. Дуброва.

Серый журавль. Места обитания серого журавля были выявлены на территории района ещё в 1982 г. [1]. По одной паре журавлей выявлено 22.07.2014 г. восточнее озера Крушиновского и на верховом болоте Дикий Мох (между деревнями Ходосовичи и Малые Козловичи. Пара журавлей наблюдалась 09.07.2019 г. в пойме р. Добрицы, севернее д. Малая Крушиновка, а 23.09.2019 г. здесь отмечена на ночёвке стая журавлей. Ещё одна пара журавлей отмечена 10.07.2019 г. в пойме Днепра, в 2 км к северо-западу от д. Свержень. Также подтверждены 2 уже известных местообитания в районе д. Селец.

Коростель. Регистрировался в июне 2011 г. пойме Днепра вблизи д. Свержень, д. Зборов и санатория «Приднепровский». В пойме Друти у д. Озераны 04.06.2017 г. на участке пойменного луга площадью 2,3 км² по голосам отмечено 6 самцов коростеля. В тот же день по берегам р. Друти от д. Озераны до д. Колосы (длина 19 км) по голосам отмечено ещё 5 самцов коростеля. В пойме р. Добрицы, севернее д. Малая Крушиновка 09.07.2019 г. на участке пойменного луга площадью 0,5 км² по голосам отмечены 3 самца коростеля.

Филин. Одна особь наблюдалась 19.11.2019 г. в черноольшанике к северо-западу от д. Ходосовичи.

Воробьиный сыч. Две птицы отмечены по голосам 23.09.2019 г. в южной части лесного массива в 2 км к северу от д. Малая Крушиновка, и две птицы – 24.09.2019 г. 2,5 км к северу от д. Свержень. Одиночные птицы по голосам отмечены 25.09.2019 г. в лесных массивах в 2 км южнее д. Дуброва и в 1 км к западу от д. Перекоп.

Болотная сова. Одиночная особь наблюдалась 09.07.2019 г. на заболоченной системе мелиоративных каналов (урочище Борки) на границе Рогачёвского и Кировского районов (сообщение В.Н. Лебедько, А.О. Саулова).

Кулик-сорока. Пара отмечена 07.07.2020 г. на берегу Днепра напротив д. Гадиловичи.

Турухтан. Стая мигрирующих птиц наблюдалась в окрестностях санатория «Приднепровский» в октябре 2005 г.

Малая чайка и малая крачка. Места гнездования обоих видов выявлены на территории района в начале 1980-х гг. в пойме Днепра [1], [4].

Гаршнеп. Одиночная особь отмечена на скошенном осоковом лугу 11.07.2019 г. в пойме Днепра, в 2 км к северо-западу от д. Свержень.

Дупель. В июне 2011 г. в пойме Днепра к северо-западу от д. Свержень выявлен ток (не менее 5 самцов). В том же районе на скошенном осоковом лугу 11.07.2019 г. отмечена одиночная птица.

Обыкновенный зимородок. Известные с 2011 г. места гнездования (как минимум двух пар) в обрывах правого берега Днепра южнее д. Вицин и вблизи санатория «Приднепровский» подтверждены в 2019 г.

Сизоворонока. Одиночная птица наблюдалась 25.06.2020 г. на проводах ЛЭП вблизи д. Новый Кривск (сообщение Д. Кителю, Д. Шамовича).

Зелёный дятел. Регистрировался в апреле 2010 г. в дубраве к юго-западу от д. Виков. Отмечен по крику в период кочевок 26.09.2019 г. у д. Заозерье на берегу озера Крушиновского.

Белоспинный дятел. Одиночные особи наблюдались в июне 2019 г. в старовозрастной дубраве в 2 км к северо-востоку от д. Днепропетровский, 21.11.2019 г. в полосе смешанного заболоченного леса в 2 км к северу от г. Рогачёва и в старовозрастной дубраве в 2 км к северу от д. Малая Крушиновка.

Мухоловка-белошейка. Поющие самцы отмечены в июне 2019 г.: в сосняке в 1 км к северо-западу от д. Ходосовичи; в старовозрастной дубраве в 2 км к северо-востоку от д. Днепровский; в участке смешанного леса, в 3 км к северу от д. Свержень.

Садовая овсянка. Отмечена в июне 2011 г. на пойменном лугу в 2 км к западу от д. Виков.

Заключение. В результате наших исследований в 2017, 2019, 2020 гг. список охраняемых видов птиц Рогачёвского района дополнен ещё 9 видами, включёнными в Красную книгу Республики Беларусь (большой крохаль, орлан-белохвост, филин, воробьиный сыч, болотная сова, кулик-сорока, гаршнеп, сизоворонка, мухоловка-белошейка). Весь список включает 25 видов птиц, 2 вида из которых (кулик-сорока и дупель) внесены в Красный список Международного союза охраны природы и являются близкими к угрожаемым видам. Полученные сведения представляют научную и природоохранную значимость и могут быть использованы при подготовке очередного издания Красной книги Республики Беларусь. Увеличение количества охраняемых видов птиц на территории района не свидетельствует о появлении или изменении мест обитаний для этих видов, а отражает лишь недостаток опубликованных работ по орнитофауне района. Следует также отметить, что проведёнными нами исследованиями охвачено только около 2/3 территории Рогачёвского района, и они не являются полными. Регистрации многих видов носят случайный характер. Для уточнения списка редких видов необходимы дополнительные исследования по орнитофауне региона.

Литература

1. Чырвоная кніга Рэспублікі Беларусь : Рэдкія і тыя, што знаходзяцца пад пагрозай знікнення віды жывёл і раслін / Беларус. Энцыкл.; Гал. рэдкал.: А. М. Дарафееў (старш.) [і інш.]. – Мінск : БелЭн, 1993 – 560 с.
2. Красная книга Республики Беларусь. Животные : редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды диких животных / 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. Красный список МСОП видов, находящихся под угрозой исчезновения [Электронный ресурс] // The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2022-1. – Режим доступа : <https://www.iucnredlist.org>. – Дата доступа : 17.08.2022.
4. Наумчик, А. В. Состояние редких видов чайковых птиц Белоруссии и пути их охраны / А. В. Наумчик // Организация работ по выявлению и охране редких и находящихся под угрозой исчезновения видов животных и растений, занесенных в Красные книги СССР и БССР. – Минск : БелНИИНТИ, 1985. – С. 139–141.

Научно-практический центр
НАН Беларуси по биоресурсам

Поступила в редакцию 28.10.2022

Аномалии структуры годовичных слоев сосны обыкновенной в зависимости от типа леса

А.Н. Хох, В.Б. Звягинцев

По результатам микроскопического исследования на кернх древесины из сосняка мшистого было выявлено 109 аномалий структуры и 8 выпавших годовичных слоев, в то время как для сосняка багульникового – 259 и 85 соответственно, т. е. с ухудшением условий роста количество аномалий увеличилось в 2,9 раза, а выпавших слоев – в 10,6 раза. Стабилизированная частота (Fstab) их встречаемости составила 1,08 для ВПП №1 и 0,77 для ВПП № 3 (сосняк мшистый), 2,34 для ВПП № 2 и 3,1 для ВПП № 4 (сосняк багульниковый); при этом для сосняков, произрастающих в Брестском лесхозе, по сравнению с ГПУ НП «Браславские озера» Fstab меньше в 1,32 раза для сосняка мшистого и 1,4 раза для сосняка багульникового. Вне зависимости от типа леса ведущим типом аномалий структуры годовичных слоев на всех исследованных ВПП являются флуктуации плотности поздней древесины (тип IADF L) – в сосняке мшистом они составляют 44,4 % от всех аномалий, в сосняке багульниковом – 29 %. При этом 92,4 % из всех обнаруженных нарушений приходится на следующие годы: 1920, 1928, 1930, 1940, 1944, 1946, 1952, 1958, 1963, 1964, 1971, 1977, 1981, 1982, 1983, 1984, 1988, 1990, 1991, 1992, 1994, 1999, 2000, 2002, 2010 и 2015.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, условия произрастания, выпавшие кольца, аномалии структуры, почвенно-гидрологический режим.

According to the results of microscopic examination, 109 structural anomalies and 8 fallen out annual tree layers were revealed on cores of wood from the mossy pine forest, while for the ledum pine forest – 259 anomalies and 85 fallen annual tree layers, i. e. with the deterioration of growth conditions, the number of anomalies increased 2,9 times, and the number of fallen layers – 10,6 times. The stabilized frequency (Fstab) of their occurrence was 1,08 for TSP № 1 and 0,77 for TSP № 3 (mossy pine forest), 2,34 for TSP № 2 and 3,1 for TSP № 4 (ledum pine forest); at the same time, for pine forests growing in the Brest forestry, in comparison with the SNP «Braslavskie Oзера», Fstab is 1,32 times less for mossy pine forest and 1,4 times for ledum pine forest. Regardless of the type of forest, the leading type of anomalies in the structure of annual layers on all studied TSP is density fluctuations of late wood (type IADF L) – in the mossy pine forest they make up 44,4 % of all anomalies, in the ledum pine forest – 29 %. Moreover, 92,4 % of all the detected violations occurred in the following years: 1920, 1928, 1930, 1940, 1944, 1946, 1952, 1958, 1963, 1964, 1971, 1977, 1981, 1982, 1983, 1984, 1988, 1990, 1991, 1992, 1994, 1999, 2000, 2002, 2010 and 2015.

Keywords: Scots pine, growing conditions, missing rings, structural anomalies, soil-hydrological regime.

Введение. Известно, что в начале периода роста (весной и до середины лета) формируются трахеиды большого диаметра с тонкой клеточной стенкой, а с середины лета и до осени (в условиях Беларуси в отдельные годы до октября) – диаметр образующихся трахеид уменьшается, а клеточная стенка становится толще. В результате в годовичном слое (далее – ГС) четко различаются по размерам, цвету и плотности зоны ранней и поздней древесины. Переход между клетками ранней и поздней древесины внутри ГС постепенный, в то время как между клетками поздней древесины предыдущего слоя и ранней последующего – резкий. В течение вегетационного сезона у деревьев обычно образуется один годовичный слой. В благоприятный год нарастает широкий годовичный слой, в неблагоприятный – узкий. Однако бывают случаи, когда под влиянием внешних неблагоприятных факторов возникают нарушения структуры ГК. Так, из-за временных засух, весенних заморозков, объединения ассимиляционного аппарата насекомыми и т. д. начавшиеся весной рост дерева и отложение ранней древесины могут резко замедлиться, и тогда камбий откладывает более плотную древесину. Когда условия становятся более благоприятными, происходит возобновление образования крупных тонкостенных клеток. В результате этого годовичный прирост древесины выглядит как два слоя. Такое явление называется флуктуация плотности древесины (IADF).

В особо неблагоприятные годы (продолжительные засухи, холод, пожары и т. д.) камбий может совсем не отложить ГС древесины, либо прирост будет настолько мал (< 2 слоев

клеток), что образовавшийся слой невозможно отличить от соседних. Как следствие этого в одних случаях годичные слои выпадают полностью, а в других – частично, только в каком-либо секторе окружности ствола.

В конце весны под влиянием поздних заморозков у хвойных деревьев могут формироваться морозобойные повреждения, состоящие из нескольких последовательно переходящих друг в друга слоев деформированных клеток, искривленных сердцевинных лучей и патологических смоляных ходов.

Аномалии структуры ГК обуславливаются широким спектром микроклиматических, фитоценологических, лесопатологических, лесоводственных, рекреационных воздействий на растения и локальную среду их обитания. Доказано, что восприимчивость к их образованию зависит от многих индивидуальных характеристик дерева, таких как возраст, толщина ствола, высота дерева [1, с. 29], [2], скорость роста [3], [4] или уровень конкуренции [5]. При этом следует отметить, что, несмотря на то, что чрезвычайно большую роль в изменчивости ширины годичных слоев сосновых насаждений играют почвенно-экологические условия среды, исследований, связанных с анализом нарушений анатомической структуры и выпавших ГС в образцах древесины из контрастных местообитаний, не проводилось.

Цель работы – провести сравнительный анализ аномалий структуры годичных слоев сосны обыкновенной в контрастных экологических условиях и выявить различия в частоте их встречаемости у деревьев, произрастающий в сосняке мшистом (*Pinetum pleurozium*) и сосняке багульниковом (*Pinetum ledosum*).

Рабочая гипотеза базировалась на предположении о том, что на гидроморфных почвах частота встречаемости аномалий структуры годичных слоев увеличивается.

Материал и методика исследований. В работе использованы буровые керны с 4-х временных пробных площадей (далее – ВПП), заложенных во время полевых работ в 2016–2017 гг. на территории Брестской и Витебской областей Беларуси. Керны отбирались у 40-ка деревьев сосны высших классов Крафта возрастным буром «Haglof» с противоположных сторон перпендикулярно продольной оси ствола дерева на высоте 0,2 м от поверхности земли. Такая высота отбора позволила оценить число аномалий структуры годичных слоев, возникших под действием микролокальных условий произрастания деревьев и слабых приземных заморозков [6].

Определение состава и структуры сосновых насаждений на них проводилось с использованием общепринятых в геоботанике, лесоводстве и лесной таксации методов [7]. При характеристике ВПП учитывались стандартные характеристики: относительное положение места, состав пород, средний диаметр, высота и возраст модельных деревьев, почвенные характеристики, густота, состав подроста, его высота и возраст.

У всех деревьев на пробной площади измерялся диаметр стволов на высоте 1,3 м и общая высота. Каждому дереву присваивался класс Крафта. Краткая характеристика исследованных древостоев приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Таксационные показатели древостоев сосны обыкновенной

№ ВПП	Лесхоз	Лесничество	Квартал	Тип леса	ТЛУ	Состав	Возраст, лет	Класс бонитета	Полнота	Высота (h), м	Диаметр на высоте 1,3 м (d), см	h/d, %
1	ГПУ НП «Браславские озера»	Браславское	42	С.мш	B2	10С + Е	130	I	0,9	23	24	96
2		Замошское	183	С.баг	A5	10С	170	Va	0,7	19	22	86
3	Брестский	Брестское	106	С.мш	A2	10С	120	I	0,8	24	28	86
4		Брестское	106	С.баг	A5	10С	150	IV	0,6	19	24	79

В лабораторных условиях буровые керны замачивались на 10–15 минут в горячей воде, а затем ножом пистолетным с выдвижным трапецевидным лезвием в поперечном направлении срезали верхнюю часть толщиной 1–1,5 мм. Для удобства обрезки и предотвращения разлома

кern предварительно закрепляли с помощью винтов на металлическом кернодержателе. Старались добиться максимально ровной плоскости и избежать образования царапин и др. изъянов на поверхности образца. Далее керны сканировали на планшетном сканере Epson Perfection V19 с разрешением 1200 dpi. Измерение ширины ГК у образцов проводилось с помощью автоматизированного рабочего места «DendroExp» (с точностью до 0,01 мм) [8]. Серии датировались посредством сочетания графической перекрестной датировки [9] и кросс-корреляционного анализа в пакете специализированных программ для дендрохронологических исследований – DPL [10]. Результатом работы стало построение 4-х ДКХ. Они были стандартизированы скользящим сплайном в 2/3 длины каждой серии в программе ARSTAN [11].

Нарушения структуры годовичных слоев выявлялись путем визуального осмотра образцов с помощью стереоскопического микроскопа Leica S4E (Leica Microsystems) при 30-кратном увеличении. В работе учитывался период с 1916 по 2016 г., т. е. минимальный средний возраст (ВПП № 3) за вычетом первых 20 лет жизни деревьев, поскольку в этот период они получают повреждения даже при незначительных заморозках из-за тонкого теплоизоляционного слоя коры, а потому не вполне адекватно отражают экологические условия роста.

На рисунках 1 и 2 представлены все типы аномальных структур, которые анализировались при проведении исследования:

- 1) IADF L – слой клеток ранних трахеид в пределах поздней древесины;
- 2) IADF L+ – постепенный переход от ранней древесины к поздней (промежуточные трахеиды);
- 3) IADF E – слой клеток поздних трахеид в пределах ранней древесины;
- 4) IADF E+ – постепенный переход от поздней древесины к ранней (промежуточные трахеиды);
- 5) f – морозобойное повреждение (слой искривленных трахеид);
- 6) m – выпавший слой (в отличие от остальных аномалий выступает интегральным индикатором температурного режима вегетационного сезона в целом [12]).

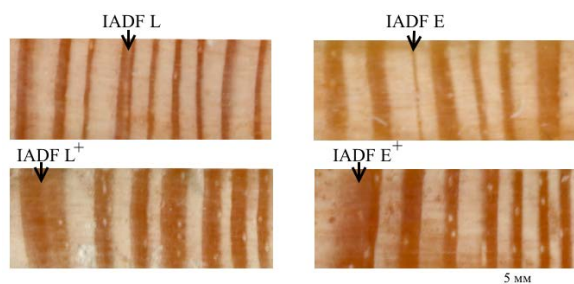


Рисунок 1 – Флуктуации плотности древесины внутри годовичных слоев

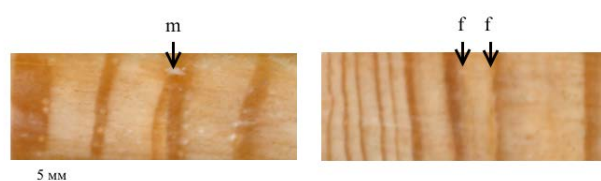


Рисунок 2 – Частично выпавший слой (m) и морозобойные повреждения (f)

Частота аномалий структуры ГК (F_{rel}) и стабилизированная частота (F_{stab}) рассчитывались по следующим формулам [1, с. 22]:

$$F_{rel} = \left(\frac{n_x}{N} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$F_{stab} = \left(\frac{n_x}{N} \right) \times N^{0,5} \quad (2)$$

где n_x – количество аномалий; N – количество исследованных годовичных слоев.

Статистическая обработка материалов исследования проводилась с использованием статистических пакетов Microsoft Excel v.10.0, SPSS v.22.0 и Statistica v.10.0. Применялись следующие методы: одномерная описательная статистика для каждого из исследуемых параметров, двухфакторный дисперсионный анализ ANOVA, кластерный анализ.

Результаты исследований и их обсуждение. На основании рассчитанных параметров радиального прироста по каждой ВПП построены обобщенные древесно-кольцевые хронологии (далее – ДКХ). В таблице 2 приведены статистические показатели качественной оценки имеющегося дендрохронологического материала (номер ДКХ соответствует номеру ВПП).

Таблица 2 – Статистические показатели обобщенных ДКХ

№ ДКХ	M_x , мм	min, мм	max, мм	S_x	m_x	CV, %	COR	SNS	SNR	EPS
1	1,23	0,6	2,5	0,53	0,09	43,4	0,68	0,13	85	0,988
2	0,63	0,31	1,34	0,19	0,03	30,2	0,69	0,20	89	0,989
3	1,52	0,51	2,80	0,54	0,09	35,7	0,70	0,14	93	0,989
4	0,76	0,45	1,61	0,20	0,03	26,3	0,68	0,19	85	0,988

Примечание: M_x – среднее арифметическое значение ширины годичного слоя; min, max – минимальное и максимальное значения ширины годичного слоя; S_x – среднее квадратическое отклонение; m_x – ошибка среднего; CV – коэффициент вариации; COR – средний межсерийный коэффициент корреляции; SNS* – коэффициент чувствительности; SNR* – коэффициент «сигнал-шум»; EPS* – выраженный сигнал популяции; * расчет проводился по формулам, изложенным в работе Д.В. Тишина, Н.А. Чижиковой (2018) [13].

Анализ полученных результатов показал, что ширина годичных слоев у исследованных деревьев сосны из мшистого типа леса варьируется от 0,51 до 2,8 мм, а из багульникового типа леса – от 0,31 до 1,61 мм. Результаты двухфакторного дисперсионного анализа показали достоверное влияние фактора «тип леса» ($F = 105,6$, $p < 0,001$) и фактора «географическая широта» ($F = 8$, $p = 0,005$) на среднюю ширину годичного слоя, взаимодействие факторов ($F = 1,1$, $p = 0,3$) не доказано ($R^2 = 0,41$).

Величина стандартного отклонения максимальна у деревьев, произрастающих на ВПП № 3 (0,54), а минимальна – у деревьев с ВПП № 2 (0,19). Самый высокий коэффициент вариации характерен для ДКХ № 1 (43,4 %), самый низкий – для ДКХ № 4 (26,3 %). Деревья на каждой ВПП отличаются высокой синхронностью погодичной изменчивости радиального прироста, что подтверждается высокими межсерийными коэффициентами; среднее значение составляет 0,69.

Коэффициенты чувствительности колеблются от 0,13 до 0,20; при этом установлен их рост при повышении влажности почвы (SNS для сосняка мшистого составляет 0,14; SNS для сосняка багульникового составляет 0,20). Двухфакторный дисперсионный анализ (географическая широта, тип леса) доказал достоверное влияние фактора «тип леса» на величину коэффициента чувствительности ($F = 148,6$, $p < 0,001$), в то время как влияние фактора «географическая широта» ($F = 0,21$, $p = 0,65$) и взаимодействие факторов ($F = 2,1$, $p = 0,16$) доказано не было ($R^2 = 0,79$).

Рассчитанные отношения сигнал-шум (SNR) составили от 85 до 93, т. е. обобщенные хронологии содержат достаточно высокую изменчивость, объясняющуюся влиянием климатических факторов (сравнение по данному параметру правомерно, поскольку объем выборок одинаков для всех ДКХ [14]).

Среднее значение EPS составило 0,99, что позволяет считать полученные ДКХ достаточно представительными, т. е. ширина годичных слоев за каждый год адекватно отражает прирост всей совокупности (пороговое значение EPS = 0,85 [15]).

По результатам микроскопического исследования на кернах древесины было выявлено 368 аномалий структуры и 93 выпавших ГС. Дифференцированные результаты с рассчитанной частотой встречаемости приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Аномалии ГС

Параметр	ВПП № 1	ВПП № 2	ВПП № 3	ВПП № 4
n_x	68	196	49	148
IADF L	26 (38 %)	60 (31 %)	26 (53 %)	40 (27 %)
IADF L ⁺	14 (21 %)	35 (18 %)	12 (24 %)	21 (14 %)
IADF E	5 (7 %)	19 (10 %)	3 (6 %)	14 (9 %)
IADF E ⁺	4 (6 %)	17 (9 %)	–	5 (3 %)
f	13 (19 %)	19 (10 %)	6 (12 %)	29 (20 %)
m	6 (9 %)	46 (23 %)	2 (4 %)	39 (26 %)
F_{rel}	1,70	4,90	1,23	3,70
F_{stab}	1,08	3,10	0,77	2,34

В результате анализа распределения аномалий, зафиксированных на образцах с ВПП № 1, было выявлено, что флуктуации плотности поздней древесины (IADF L и IADF L⁺) составляют 59 %, флуктуации плотности ранней древесины (IADF E и IADF E⁺) – 13 %, морозобойные повреждения (f) – 19 % и выпавшие слои (m) – 9 % от общего числа зафиксированных аномалий. Для ВПП № 2 флуктуации плотности поздней древесины (IADF L и IADF L⁺) составляют 49 %, флуктуации плотности ранней древесины (IADF E и IADF E⁺) – 19 %, морозобойные повреждения (f) – 10 % и выпавшие слои (m) – 23 % от общего числа зафиксированных аномалий. Для ВПП № 3 флуктуации плотности поздней древесины (IADF L и IADF L⁺) составляют 77 %, флуктуации плотности ранней древесины (IADF E и IADF E⁺) – 6 %, морозобойные повреждения (f) – 12 % и выпавшие слои (m) – 4 % от общего числа зафиксированных аномалий. Для ВПП № 4 флуктуации плотности поздней древесины (IADF L и IADF L⁺) составляют 41 %, флуктуации плотности ранней древесины (IADF E и IADF E⁺) – 12 %, морозобойные повреждения (f) – 20 % и выпавшие слои (m) – 26 % от общего числа зафиксированных аномалий. Таким образом, ведущим типом аномалий структуры ГС на исследованных ВПП являются флуктуации плотности поздней древесины (тип IADF L: 152 из 461).

Далее проводился кластерный анализ данных из таблицы 3 с целью объединения сравниваемых ВПП № 1–4 в группы, обладающие сходными характеристиками (кластеры). Предварительно данные были стандартизованы: из значений каждого из 9-ти признаков вычиталось его среднее и делилось на стандартное отклонение. Стандартизация проводилась для того, чтобы размерность данных и их вариабельность не влияла на результаты анализа. Полученные результаты представлены на дендрограмме (рисунок 3).

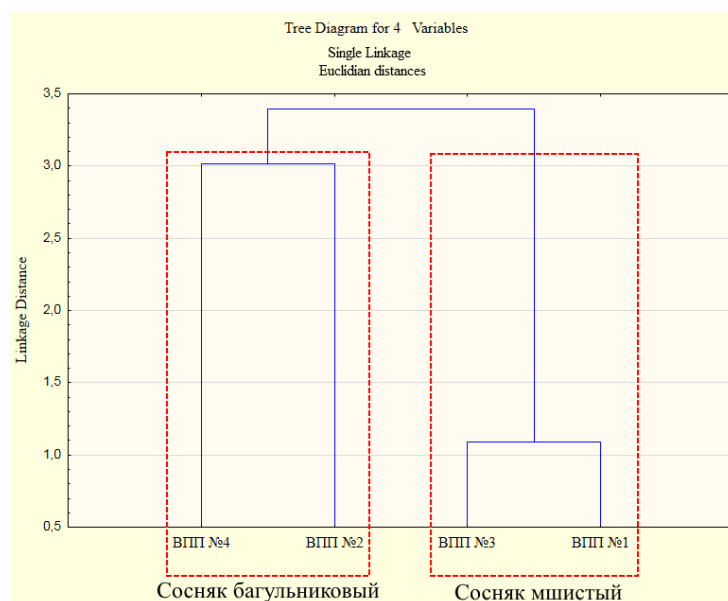


Рисунок 3 – Связь между исследованными ДКХ № 1–4 по результатам кластерного анализа

Как видно из рисунка 3, отчетливо выделяются два кластера: первый (ВПП № 2 и ВПП № 4 – сосняк багульниковый), второй (ВПП № 1 и ВПП № 3 – сосняк мшистый). Таким образом, видовое и процентное соотношение аномалий и выпавших ГС позволяет судить о типе леса, в котором выросло дерево; при этом влияние географической широты в данном случае гораздо слабее (так, например, средняя разница в общем количестве аномалий между типами леса составляет 113,5, а между одним и тем же типом леса с разной географической широтой – 33,5). Таким образом, можно предположить, что специфика образования аномалий структуры ГС подчиняется неким общим правилам, на основании которых типы леса могут быть дифференцированы.

По нарушениям структуры и выпавшим ГС выделено 26 дат экстремальных событий, на которые приходится 92,4 % из всех обнаруженных аномалий (таблица 4).

Таблица 3 – Годы с самой высокой частотой образования аномалий структуры и выпавших ГС

ВПП № 1	ВПП № 2	ВПП № 3	ВПП № 4
	1920		
1928	1928	1928	1928
	1930		
1940	1940		
	1944		1944
			1946
	1952		
		1958	
			1963
	1964		
1971	1971	1971	
	1977		1977
			1981
			1982
	1983		
1984		1984	
	1988		
1990		1990	
1991	1991		1991
		1992	
		1994	
1999		1999	
	2000		2000
	2002		
2010		2010	
2015			

Анализируя годы с самой высокой частотой образования аномалий структуры и выпавших ГС, можно отметить наличие определенных ассоциаций с засушливыми условиями для сосняков мшистых (так, в 1992, 1999, 2002, 2010 и 2015 гг. на территории Беларуси были зафиксированы обширные и интенсивные засухи), с весенне-летними заморозками для сосняков багульниковых (были зафиксированы на территории Беларуси заморозки в 1977, 1982, 1983, 1984, 1990, 1991, 2000 и 2002 гг.). Восемь событий прослеживается по 2-м ВПП – это 1940, 1944, 1977, 1984, 1990, 1999 и 2000 и 2010 гг. (причем 7 из 8 совпадают по типу леса), два по трем – это 1971 и 1991 гг., одно событие прослеживается по всем ВПП – это 1928 г. (характеризуется самым холодным летом, когда средняя температура составила + 14,6 °С [16]).

Обращение к такому показателю, как минимумы прироста (годы, в которые у 80 и > % деревьев из ДКХ прирост текущего года уменьшился более чем на 20 % по сравнению с предыдущим годом), продемонстрировало что они не имеют совпадений с аномалиями и выпавшими годичными слоями. Так, например, для ДКХ № 3 было выделено 9 минимумов прироста (1918, 1934, 1942, 1943, 1947, 1958, 1963, 1979 и 1988), что не совпало с годами с самой высокой частотой образования аномалий структуры и выпавших ГС (рисунок 4). Аналогичные результаты были получены для оставшихся 3-х ДКХ.

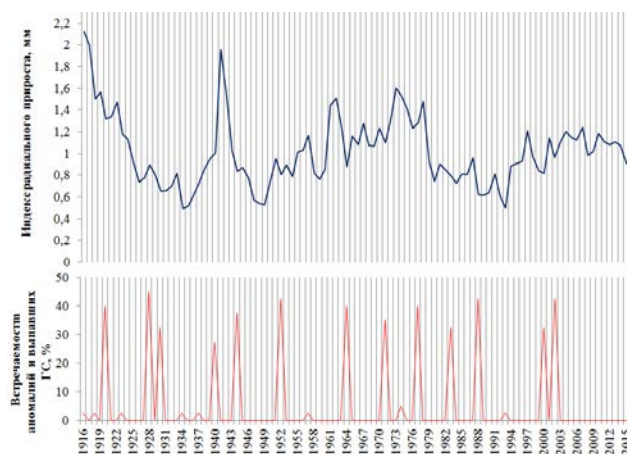


Рисунок 4 – Стандартизированная ДКХ № 3 и с аномалиями и выпавшими ГС

Заключение. В ходе проведенного исследования выявлены аномальные структуры и выпавшие ГС сосновых насаждений, выросших в контрастных условиях произрастания. Показано, что наиболее чувствительными являются деревья сосны с ВПП № 2 ($F_{stab} = 3,10$) и ВПП № 4 ($F_{stab} = 2,34$), т. е. сосняк багульниковый характеризуется большим числом аномалий ГС (в 2,9 раза больше). При этом, конечно, следует отметить, что абсолютного совпадения образования аномалий и выпавших ГС у разных деревьев на ВПП не наблюдается, поскольку на изменения внешних условий каждое дерево реагирует по-своему и степень ответных реакций древесных организмов различна. Также как специфическую особенность можно отметить резкое увеличение (в 10,6 раз) количества выпавших годовичных слоев у деревьев в сосняке багульниковом по сравнению с сосняком мшистым, что свидетельствует об более острой реакции на погодные условия конкретного года растений в экстремальных местопроизрастаниях. Периоды особо неблагоприятные для жизнедеятельности деревьев находят отражение в значительном снижении деятельности камбия.

В целом, результаты работы показали, что структуру годовичных слоев можно рассматривать как отражение особенностей сезонного роста деревьев сосны обыкновенной, а образование аномалий и выпавших ГС во многом определяется почвенно-гидрологическими условиями территории. С ухудшением условий по богатству почвы и увлажнению частота образования аномалий и выпавших годовичных слоев увеличивается.

Литература

1. Rigling, A. Ecological interpretation of tree-ring width and intraannual density fluctuations in *Pinus sylvestris* on dry sites in the central Alps and Siberia / A. Rigling [et al.] // Canadian Journal of Forest Research. – 2001. – Vol. 31, № 1. – P. 18–31.
2. Vieira, J. Age-dependent responses of tree-ring growth and intra-annual density fluctuations of *Pinus pinaster* to Mediterranean climate / J. Vieira, F. Campelo, C. Nabais // Trees. – 2009. – Vol. 23, № 2. – P. 257–265.
3. Olivar, J. Climate impact on growth dynamic and intra-annual density fluctuations in Aleppo pine (*Pinus halepensis*) trees of different crown classes / J. Olivar [et al.] // Dendrochronologia. – 2012. – Vol. 30, № 1. – P. 35–47.
4. Campelo, F. Which matters most for the formation of intra-annual density fluctuations in *Pinus pinaster*: age or size? / F. Campelo [et al.] // Trees. – 2015. – Vol. 29, № 1. – P. 237–245.
5. Copenheaver, C. A. Causation of false ring formation in *Pinus banksiana*: a comparison of age, canopy class, climate and growth rate / C. A. Copenheaver [et al.] // Forest Ecology and Management. – 2006. – Vol. 236, № 2–3. – P. 348–355.
6. Gurskaya, M. A. Distribution of frost injuries in the wood of conifers / M. A. Gurskaya, S. G. Shiyatov // Russian Journal of Ecology. – 2006. – Vol. 37, № 1. – P. 7–12.
7. Мелехов, И. С. Лесоведение / И. С. Мелехов. – М.: МГУЛ, 2004. – 398 с.
8. Хох, А. Н. Автоматизированное рабочее место «DendroExp» как инструмент для рационализации проведения дендрохронологических экспертных исследований / А. Н. Хох, Д. Е. Кузменков // Криміналістичний вісник : наук.-практ. зб. / В.В. Черней [голов. ред.]. – К., 2017. – № 1 (27). – С. 133–140.
9. Douglass, A. E. Climatic cycles and tree-growth. A study of the annual rings of trees in relation to climate and solar activity / A. E. Douglass. – Wash.: Carnegie Inst., 1919. – Vol. 1. – 127 p.
10. Cook, E. R. Guide for computer program ARSTAN / E. R. Cook, R. L. Holmes // The international tree-ring data bank program library version. – 1996. – Vol. 2. – P. 75–87.
11. Holmes, R. L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement / R. L. Holmes // Tree-ring Bull. – 1983. – Vol. 43. – P. 69–78.
12. Ваганов, Е. А. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Субарктике / Е. А. Ваганов, С. Г. Шиятов, В. С. Мазепа. – Новосибирск: Наука, 1996. – 246 с.
13. Тишин, Д. В. Дендрохронология / Д. В. Тишин, Н. А. Чижилова. – Казань, 2018. – 34 с.
14. Матвеев, С. М. Дендроклиматический анализ 200-летнего древостоя сосны обыкновенной в Воронежском биосферном заповеднике / С. М. Матвеев, Д. А. Тимащук // Лесоведение. – 2019. – № 2. – С. 93–104.
15. Wigley, T. M. L. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology / T. M. L. Wigley, K. R. Briffa, P. D. Jones // Journal of Applied Meteorology and Climatology. – 1984. – Vol. 23, № 2. – P. 201–213.
16. Атлас опасных метеорологических явлений на территории Беларуси: учеб. пособие / В. Ф. Логинов [и др.]. – М.: Мещер. Ф-л ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова, 2016. – 58 с.

Антирадикальная активность экстрактов из лишайников

О.М. ХРАМЧЕНКОВА

Изучали антирадикальную активность ацетонового, бензольного, метанольного, этанольного и этилацетатного экстрактов из лишайников *Cladonia arbuscula*, *Evernia prunastri*, *Hypogymnia physodes*, *Ramalina pollinaria* и *Xanthoria parietina*. Применяли ДФПГ-тест и метод обесцвечивания β -каротина. Для позитивного контроля использовали α -токоферол. Показано, что экстракты из *E. prunastri*, *H. physodes* и *R. pollinaria* обладают выраженной активностью в отношении ДФПГ, тогда как методом обесцвечивания β -каротина антирадикальная активность подтверждается для экстрактов из *E. prunastri* и *R. pollinaria*.

Ключевые слова: экстракты из лишайников, антирадикальная активность, 1,1-дифенил-2-пикрилгидразил (ДФПГ), линолевая кислота, обесцвечивание β -каротина, α -токоферол, процент ингибирования, спектрофотометрия.

The antiradical activity of acetone, benzene, methanol, ethanol, and ethyl acetate extracts from the lichens *Cladonia arbuscula*, *Evernia prunastri*, *Hypogymnia physodes*, *Ramalina pollinaria*, and *Xanthoria parietina* was studied. The 1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl radical scavenging capacity (DPPH) and the β -carotene bleaching assay were used; α -tocopherol was used as a positive control. It was shown that extracts from *E. prunastri*, *H. physodes* and *R. pollinaria* had a pronounced activity against DPPH, while antiradical activity was confirmed by the β -carotene bleaching assay for the extracts from *E. prunastri* and *R. pollinaria*.

Keywords: lichen extracts, antiradical activity, 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH), linoleic acid, β -carotene bleaching, α -tocopherol, percent inhibition, spectrophotometry.

Введение. Различного рода окислительные процессы постоянно протекают в живых системах. Многие из них связаны с образованием свободных радикалов – высоко реакционноспособных частиц с одним или несколькими неспаренными электронами на внешней электронной оболочке. Свободные радикалы вступают в характерные химические реакции с веществами живых систем, вызывая нарушения метаболизма, в том числе – дегенеративные, что приводит к появлению различных патологий. Ингибирование и/или нейтрализацию окислительного действия свободных радикалов осуществляют антиоксиданты, как являющиеся естественными продуктами жизнедеятельности, так и привнесенные извне.

В настоящее время весьма актуальным является скрининг антиоксидантных свойств веществ природного происхождения, а также комплексов таких веществ, чаще всего являющихся экстрактами из различных природных объектов. Одним из таких объектов являются экстракты из лишайников, рассматриваемых в настоящее время в качестве симбиотических ассоциаций микобионта (гриба) и фотобионта, называемого также фикобионом, так как он представлен микроскопическими зелеными водорослями и/или цианобактериями. Лишайников известно более 25000 видов, каждый из них содержит в гифах микобионта уникальные лишайниковые вещества, обладающие высокой и разнообразной биологической активностью [1]–[3].

В работе [4] нами обобщены научные данные об антиоксидантной активности экстрактов из лишайников. Показано, что имеющиеся результаты оценки антиоксидантных свойств экстрактов из лишайников разрозненны, противоречивы и зачастую не могут быть сопоставлены между собой. Основные причины существующего положения дел сводятся к следующему: на предмет антиоксидантных свойств проанализировано менее одной сотой части видов лишайников, а если учесть, что для получения экстрактов используется около десяти различных экстрагентов, то указанная доля исследованности уменьшается еще на порядок. Применяемые методы оценки антиоксидантной активности экстрактов из лишайников неспецифичны, базируются на реакциях, отсутствующих в живых системах, требуют использования концентраций, не характерных для живых клеток, не исключают влияния иных меха-

низмов на реализацию и величину регистрируемого показателя. Наконец, зачастую антиоксидантная активность анализируемых экстрактов из лишайников оказывается ниже таковой для известных «классических» антиоксидантов. Особую трудность при сравнении данных составляет частое отсутствие внятного протокола анализа и представления результатов исследования в неких общих единицах измерения.

Антирадикальные свойства экстрактов из лишайников характеризуют их способность реагировать со свободными радикалами, внесенными или генерированными в исследуемой системе. В настоящей работе мы использовали следующие методические подходы: к исследованию приняли ацетоновые, бензольные, метанольные, этанольные и этилацетатные экстракты из пяти видов лишайников, широко распространенных в Беларуси и образующих значимые скопления биомассы в местах произрастания; 2) для оценки антирадикальной активности использовали ДФПГ-тест и метод обесцвечивания β -каротина, для которых прописан протокол анализа в сравнительно свежих научных публикациях [5]–[7]; для положительного контроля в обоих случаях использовали α -токоферол, что позволяет сравнивать результаты анализов между собой и с полученными ранее другими исследователями [4].

ДФПГ-тест является методом определения именно антирадикальной активности изучаемой субстанции, так как в ходе анализа ею восстанавливается стабильный свободный радикал 1,1-дифенил-2-пикрилгидразил (ДФПГ) – рисунок 1 [4].

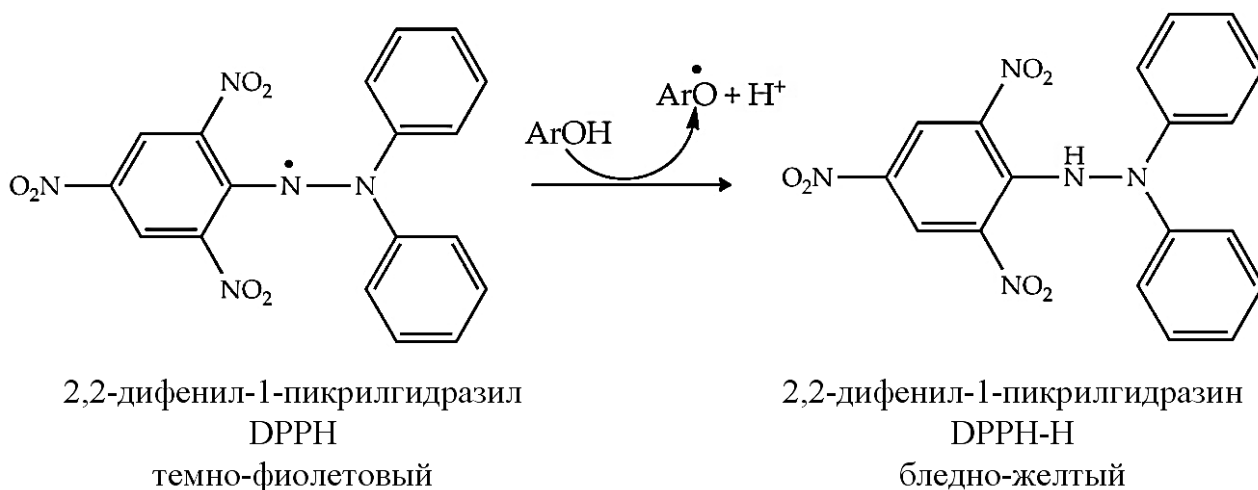


Рисунок 1 – Схема восстановления 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила

Раствор ДФПГ темно-фиолетового цвета с максимумом поглощения при 517 нм, под действием исследуемых веществ постепенно обесцвечивается до бледно-желтого цвета, а его оптическая плотность при 517 нм является мерой антирадикальной активности изучаемого экстракта.

Другим способом оценки антирадикальных свойств природных веществ является так называемый метод обесцвечивания β -каротина. В процессе приготовления реакционной смеси за счет неферментативного окисления линолевой кислоты генерируется пероксильный радикал, который реагирует с β -каротином, образуя стабильный β -каротиновый радикал. В результате оранжево-желтый раствор обесцвечивается. Компоненты экстрактов из лишайников конкурируют с пероксильным радикалом – рисунок 2 [4]. Путем регистрации оптической плотности раствора при 470 нм (типичная длина волны поглощения β -каротина) отслеживается окисление каротин-линолевой эмульсии.

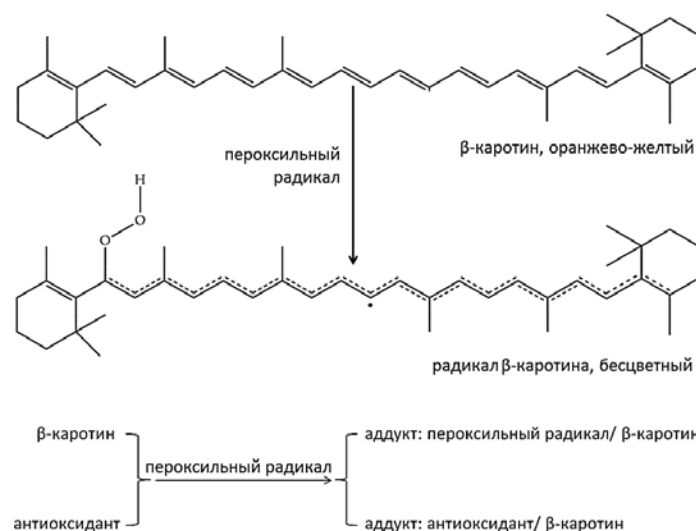


Рисунок 2 – Обесцвечивание β -каротина при окислении линолевой кислоты

Настоящее исследование посвящено скринингу антирадикальных свойств экстрактов из пяти видов лишайников, распространенных в Беларуси.

Методы исследований. Образцы лишайников *Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot., *Evernia prunastri* (L.) Ach., *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., *Ramalina pollinaria* (Westr.) Ach. и *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr. высушивали до воздушно-сухого состояния, измельчали. Навески биомассы экстрагировали в аппарате Сокслета ацетоном, бензолом, метанолом, этилацетатом и этанолом. Растворители удаляли, экстракты высушивали, растворяли в метаноле в концентрации 1 мг/мл.

ДФПГ-тест. Использовали методические подходы, изложенные в [8]–[10]. ДФПГ разводили метанолом до концентрации 1 мМ/л; α -токоферол использовали в концентрации 1 омг/мл. Равные объемы (2 мл) растворов ДФПГ и экстрактов из лишайников или раствора α -токоферола смешивали, инкубировали 30 мин в темноте при комнатной температуре, после чего измеряли оптическую плотность растворов при 517 нм.

Процент ингибирования ДФПГ вычисляли по формуле:

$$I\% = \frac{A_c - A_s}{A_c} \cdot 100;$$

где, A_c – оптическая плотность «холостой» пробы; A_s – оптическая плотность образца.

Обесцвечивание β -каротина. Использовали методические подходы, изложенные в [11]–[14]. В 50 мл хлороформа растворяли 10 мг β -каротина. Готовили реакционную смесь: к 1 мл раствора β -каротина приливали 20 мкл линолевой кислоты, добавляли 0,2 мг эмульгатора ТВИН-20, 0,2 мл раствора экстракта из лишайников (или α -токоферола) и 50 мл дистиллированной воды, предварительно насыщенной кислородом. Смесь энергично встряхивали на протяжении 15 минут, после чего измеряли оптическую плотность при 470 нм. Затем образцы инкубировали в темноте при комнатной температуре на протяжении 48 ч, после чего снова определяли их оптическую плотность при 470 нм.

Антирадикальную активность вычисляли по формуле:

$$\text{АРА}\% = 100 \cdot \left[1 - \frac{A_{\text{о6}}^0 - A_{\text{о6}}^{48}}{A_{\text{к}}^0 - A_{\text{к}}^{48}} \right],$$

где $A_{\text{о6}}^0$, $A_{\text{о6}}^{48}$ – оптическая плотность реакционной смеси с образцом (раствор экстракта из лишайника в метаноле) через 0 ч и 48 ч инкубации, соответственно; $A_{\text{к}}^0$, $A_{\text{к}}^{48}$ – оптическая плотность реакционной смеси с контролем (метанолом без экстракта из лишайника) через 0 ч и 48 ч инкубации, соответственно.

Все спектрофотометрические измерения производили на УФ-спектрофотометре Solar PB 2201, измерительные кюветы – кварцевые.

Анализ результатов исследования производили с помощью программного продукта Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение. Часть проанализированных нами экстрактов из лишайников обладает выраженной антирадикальной активностью (ингибируют ДФПГ более, чем наполовину) – таблица 1.

Таблица 1 – Ингибирование ДФПГ экстрактами из лишайников

В процентах

Используемый экстрагент	Вид лишайника				
	<i>C. arbuscula</i>	<i>E. prunastri</i>	<i>H. physodes</i>	<i>R. pollinaria</i>	<i>X. parietina</i>
Ацетон	42,4 ± 0,84	47,9 ± 0,65	64,6 ± 0,81	52,4 ± 0,49	36,9 ± 0,37
Бензол	52,6 ± 0,57	58,5 ± 0,49	67,4 ± 0,92	54,8 ± 0,49	40,5 ± 0,18
Метанол	72,6 ± 0,75	79,5 ± 0,89	70,3 ± 0,97	75,8 ± 0,91	41,2 ± 0,55
Этанол	57,4 ± 0,69	64,5 ± 0,52	60,1 ± 0,69	71,8 ± 0,79	41,9 ± 0,46
Этилацетат	45,2 ± 0,37	54,8 ± 0,49	62,3 ± 0,55	67,9 ± 0,89	41,5 ± 0,31

Определенный нами процент ингибирования ДФПГ α -токоферолом составляет 61,8 ± 0,96. Это согласуется с результатом, приведенным в [15]–[17 Kosanic]. Антирадикальными свойствами обладают ацетоновые и бензольные экстракты из *H. physodes*; все метанольные экстракты, за исключением *X. parietina*; этанольные из *E. prunastri* и *R. pollinaria*; этилацетатные из *H. physodes* и *R. pollinaria*. По результатам ДФПГ-теста можно заключить, что экстракты из *E. prunastri*, *H. physodes* и *R. pollinaria*, по-видимому, обладают наибольшим антирадикальным потенциалом.

Если сравнивать антирадикальные свойства экстрактов из лишайников с данными, полученными для других «классических» антиоксидантов, взятых в ДПФГ-тест, в той же концентрации, что и в настоящем исследовании, то оказывается, что экстракты из лишайников «слабее» аскорбиновой кислоты [18], [19]) или бутилгидрокситолуола [20], [21], для которых процент ингибирования выше 90.

Общепринятым является соображение, что никакое исследование антиоксидантных свойств каких бы то ни было субстанций природного происхождения не является правомочным, если используется один вид теста. Поэтому для выяснения антирадикальной активности изучаемых экстрактов из лишайников мы использовали систему, где свободные радикалы генерируются за счет неферментативного окисления линолевой кислоты кислородом – то есть использовали метод обесцвечивания β -каротина – таблица 2.

Таблица 2 – Обесцвечивание β -каротина экстрактами из лишайников

В процентах

Используемый экстрагент	Вид лишайника				
	<i>C. arbuscula</i>	<i>E. prunastri</i>	<i>H. physodes</i>	<i>R. pollinaria</i>	<i>X. parietina</i>
Ацетон	39,2 ± 0,49	58,3 ± 0,52	49,4 ± 0,69	67,3 ± 0,27	36,9 ± 0,45
Бензол	28,4 ± 0,78	62,2 ± 0,61	41,5 ± 0,88	71,4 ± 0,53	40,5 ± 0,57
Метанол	29,6 ± 0,34	68,7 ± 0,59	50,7 ± 0,45	69,5 ± 0,39	41,2 ± 0,78
Этанол	24,1 ± 0,51	63,5 ± 0,74	47,2 ± 0,58	65,3 ± 0,83	41,9 ± 0,64
Этилацетат	22,6 ± 0,98	61,8 ± 0,84	45,6 ± 0,75	69,9 ± 0,67	41,5 ± 0,92

Определенный нами процент обесцвечивания β -каротина α -токоферолом составляет 51,2 ± 0,62, что согласуется с работой [14]. Согласно полученным данным, выраженными антирадикальными свойствами обладают все экстракты из *E. prunastri* и *R. pollinaria*. В работе [12] для *R. pollinaria* приводится значение процента ингибирования 26 ± 1, *E. prunastri* – и 46 ± 2; в обоих случаях – для метанольных экстрактов.

Поскольку ДФПГ-тест чаще всего употребляется для оценки антирадикальных свойств экстрактов из лишайников, а метод обесцвечивания β -каротина лишь подтверждает эти результаты, заключим, что нами установлена высокая антирадикальная активность метанольных и этанольных экстрактов из *E. prunastri*, а также метанольных, этанольных и этилацетатных экстрактов из *R. pollinaria*.

Заключение. Оценивали антирадикальные свойства экстрактов из лишайников *Cladonia arbuscula*, *Evernia prunastri*, *Hypogymnia physodes*, *Ramalina pollinaria* и *Xanthoria parietina*, полученных методом экстракции по Сокслету с использованием ацетона, бензола, метанола, этанола и этилацетата в качестве экстрагентов. Применяли ДФПГ-тест и метод

обесцвечивания β -каротина. Показано, что экстракты из *E. prunastri*, *H. physodes* и *R. pollinaria* обладают выраженной активностью в отношении ДФПГ, тогда как методом обесцвечивания β -каротина антирадикальная активность подтверждается для экстрактов из *E. prunastri* и *R. pollinaria*.

Литература

1. Gokilavani, R. Biological properties of lichens – A review / R. Gokilavani, H. Rehana // Plant Arch. – 2020. – Vol. 20. – P. 3777–3783.
2. Fernández-Moriano, C. Antioxidant potential of lichen species and their secondary metabolites. A systematic review / C. Fernández-Moriano, M. P. Gómez-Serranillos, A. Crespo // Pharmaceutical Biology. – 2016. – Vol. 54 (1). – P. 1–17.
3. Ranković, B. Lichen secondary metabolites : bioactive properties and pharmaceutical potential / B. Ranković. – Cham : Springer International Publishing, 2015. – 202 p.
4. Храменкова, О. М. Антиоксидантные и цитотоксические свойства экстрактов из лишайников / О. М. Храменкова. – Гомель, 2022. – 221 с.
5. Munteanu, I. G. Analytical methods used in determining antioxidant activity : A review / I. G. Munteanu, C. Apetrei // International Journal of Molecular Sciences. – 2021. – Vol. 22 (7). – P. 3380–3409.
6. Guidelines for antioxidant assays for food components / F. Xiao [et al.] // Food Frontiers. – 2020. – Vol. 1 (1). – P. 60–69.
7. The versatility of antioxidant assays in food science and safety – Chemistry, applications, strengths, and limitations / N. Bibi Sadeer [et al.] // Antioxidants. – 2020. – Vol. 9 (8). – P. 709–747.
8. HPLC fingerprint analysis with the antioxidant and cytotoxic activities of selected lichens combined with the chemometric calculations / A. Hawrył [et al.] // Molecules. – 2020. – Vol. 25 (18). – P. 4301.
9. Usnic acid content and antioxidant activity of three lichen extracts / A. Koptina [et al.] // Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии. – 2012. – Т. 10 (2). – С. 68.
10. Antimicrobial and antioxidant activity of *Evernia prunastri* extracts and their isolates / A. Shcherbakova [et al.] // World Journal of Microbiology and Biotechnology. – 2021. – Vol. 37 (8). – P. 1–14.
11. Antioxidant and Antimicrobial Properties of the Lichens *Cladonia foliacea.*, *Dermatocarpon miniatum.*, *Evernia divaricata.*, *Evernia prunastri.*, and *Neofuscella pulla* / A. Aslan [et al.] // Pharmaceutical Biology. – 2006. – Vol. 44 (4). – P. 247–252.
12. Screening the antioxidant and antimicrobial properties of the lichens *Parmelia saxatilis*, *Platismatia glauca*, *Ramalina pollinaria*, *Ramalina polymorpha* and *Umbilicaria nylanderiana* / M. Gulluce [et al.] // Phytomedicine. – 2006. – Vol. 13 (7). – P. 515–521.
13. Antioxidant capacities, phenolic profile and cytotoxic effects of saxicolous lichens from trans-Himalayan cold desert of Ladakh / J. Kumar [et al.] // PloS one. – 2014. – Vol. 9 (6). – P. e98696.
14. Comparative evaluation of antioxidant activity and total phenolic content of selected lichen species from Malaysia / C. Stanly [et al.] // J. Pharm Res. – 2011. – Vol. 4 (8). – P. 2824–2827.
15. Biological activities and chemical composition of lichens from Serbia / M. Kosanic [et al.] // Excli Journal. – 2014. – Vol. 13. – P. 1226–1238.
16. Kosanić, M. Investigation of selected Serbian lichens for antioxidant, antimicrobial and anticancer properties / M. Kosanić, B. Ranković, T. Stanojković // J. Anim Plant Sci. – 2013. – Vol. 23. – P. 1628–1633.
17. Kosanić, M. Antioxidant, antimicrobial and anticancer activities of three *Parmelia* species / M. Kosanić, B. Ranković, T. Stanojković // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2012. – Vol. 92 (9). – P. 1909–1916.
18. Study on determination of bioactive potentials of certain lichens // Acta Alimentaria / A. I. Korkmaz [et al.]. – 2018. – Vol. 47 (1). – P. 80–87.
19. Study of antibacterial and antioxidant activities of saxicolous lichen *Xanthoparmelia stenophylla* / A. G. Simonyan [et al.] // Proceedings of the YSU B : Chemical and Biological Sciences. – 2020. – Vol. 54, Iss. 2 (252). – P. 132–137.
20. Antimicrobial and Antioxidant Activities of Extracts and Lichen Acids Obtained from Some *Umbilicaria* Species from Central Anatolia, Turkey / T. Z. Buçukoglu [et al.] // Journal of food processing and preservation. – 2013. – Vol. 37 (6). – P. 1103–1110.
21. Karaahmet, Z. Antioxidant and Antibacterial Potencies of *Xanthoparmelia conspersa* (Ehrh. ex Ach.) Hale and *Dermatocarpon miniatum* (L.) W. Mann. Lichens from Black Sea Region in Turkey / Z. Karaahmet, K. Kinalioğlu, S. Aydın // Gümüşhane Univ. J. Sci. Tech. Inst. – 2019. – Vol. 9. – P. 415–424.

УДК 57.063:582.29(476.2-37Чечерск)

Лихенобиота агрогородка Полесье Чечерского района

А.Г. ЦУРИКОВ, И.М. БОЛСУН

Изучено видовое разнообразие лишайников и лишайнофильных грибов агрогородка Полесье и его окрестностей Чечерского района Гомельской области. Всего выявлено 67 видов, относящихся к 34 родам, 19 семействам, 16 порядкам, 7 классам, 2 отделам. Виды *Cladonia novochlorophaea*, *Taeniolella phaeophysciae* и *Teloggalla olivieri* ранее были известны из одного или двух локалитетов на территории Беларуси. Систематическая структура лишенобиоты агрогородка Полесье в целом соответствует таковой лишенобиоты Беларуси, однако присутствие среди доминирующих таксонов родов *Cladonia* и *Lecanora* свидетельствует о проявлении бореального характера лишенобиоты изучаемой территории. Доминирование бореального географического элемента в лишенобиоте было также выявлено в результате географического анализа. Это может быть связано с преобладанием в окрестностях агрогородка Полесье бореальных хвойных (преимущественно еловых) лесов. С ареалогической точки зрения лишенобиота низкоспецифична.

Ключевые слова: лишайники, лишайнофильные грибы, разнообразие, распространение, жизненная форма, ареал.

The diversity of the lichens and lichenicolous fungi of the agricultural town of Polesie (Chechersk district, Gomel region) and its environs was studied. A total of 67 species belonging to 34 genera, 19 families, 16 orders, 7 classes, and 2 divisions have been identified. *Cladonia novochlorophaea*, *Taeniolella phaeophysciae* and *Teloggalla olivieri* have been previously known from either one or two localities on the territory of Belarus. The systematic structure of the lichen biota of the agricultural town of Polesie generally corresponds to that of the lichen biota of Belarus. However, the presence of the *Cladonia* and *Lecanora* genera among the dominant taxa indicates the boreal specificity of the lichen biota of the studied area. The dominance of the boreal geographical element in the lichen biota was also revealed as a result of the geographical analysis. This may be due to the abundance of boreal coniferous (mainly spruce) forests in the vicinity of Polesie. The analysis of geographic ranges indicated low specificity of lichen biota.

Keywords: lichens, lichenicolous fungi, diversity, distribution, life form, range.

Введение. Лишайники являются важной и неотъемлемой частью наземных экосистем и составляют значительную часть биологического разнообразия региона [1]. Несмотря на то, что за достаточно продолжительный период лишенологических исследований (240 лет) в Беларуси было найдено 722 вида лишайников и лишайнофильных грибов [2], лишенобиоту территории страны нельзя назвать досконально изученной. В связи с этим целью данной работы явилось изучение видового разнообразия лишайников и лишайнофильных грибов агрогородка Полесье и его окрестностей Чечерского района Гомельской области.

Методика исследований. Изучение видового разнообразия лишенобиоты проводили в 2021 г. на территории агрогородка Полесье и в его окрестностях. Лишайники отбирали с различных субстратов. Морфологию и анатомию отобранных образцов изучали с использованием микроскопов Nikon SMZ-745 и Nikon Eclipse 80i. При определении некоторых образцов применяли метод точечных капельных реакций с использованием 10 % раствора щелочи КОН.

Качественный состав вторичных метаболитов некоторых образцов лишайников изучали методом тонкослойной хроматографии в элюенте С (толуол, уксусная кислота в соотношении 170:30) [3]. Для этого фрагмент слоевища лишайника помещали в микроцентрифужную пробирку объемом 1,5 мл. Экстракцию вторичных метаболитов лишайника проводили ацетоном в течение 1 часа. После этого 30 мкл экстракта наносили на пластины для тонкослойной хроматографии со стандартным силикагелем и ультрафиолетовым индикатором Macherey-Nagel Alugram Sil G UV254. Элюирование пластины до оптимальной длины продвижения фронта (12 см) проводили в течение 40 минут. Визуализацию разделяемых веществ смеси проводили под ультрафиолетовым излучением с длинами волн 254 и 366 нм, а также химическим методом путем обработки пластины 10 % раствором серной кислоты

(H₂SO₄) и последующим нагревании пластины в сушильном шкафу до температуры 110 °С в течение 10 минут. В качестве контроля использовали лишайники *Platismatia glauca* и *Pleurosticta acetabulum*, содержащие атранорин, норстиктовую и каператовую кислоты.

Названия таксонов приведены согласно спискам лишайников и лихенофильных грибов Беларуси [4], [5].

Для таксономического анализа лихенобиоты использовали последнюю систему грибов и грибоподобных организмов [6]. Для биоморфологического анализа использовали систему жизненных форм лишайников лесных сообществ, основанную на интеграции иерархической системы жизненных форм и морфолого-анатомического подхода [7].

Результаты исследований. В ходе проведенных исследований в пределах агрогородка Полесье и в его окрестностях нами выявлено 67 видов лишайников и лихенофильных грибов, относящихся к 34 родам, 19 семействам, 16 порядкам, 7 классам, 2 отделам. Ниже приводим список лихенобиоты. Лихенофильные грибы отмечены звездочкой (*).

1. *Athallia pyracea* (Ach.) Arup, Frödén & Søchting s. lat.
2. **Athelia arachnoidea* (Berk.) Jülich
3. *Buellia griseovirens* (Turner & Borrer ex Sm.) Almb.
4. *Calogaya decipiens* (Arnold) Arup, Frödén & Søchting
5. *Caloplaca cerina* (Ehrh. ex Hedw.) Th. Fr.
6. *Candelariella aurella* (Hoffm.) Zahlbr.
7. *Candelariella xanthostigma* (Ach.) Lettau
8. *Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot. ssp. *arbuscula*; ssp. *mitis* (Sandst.) Ruoss
9. *Cladonia cenotea* (Ach.) Schaer.
10. *Cladonia chlorophaea* (Flörke ex Sommerf.) Spreng.
11. *Cladonia coniocraea* (Flörke) Spreng.
12. *Cladonia cornuta* (L.) Hoffm.
13. *Cladonia crispata* (Ach.) Flot.
14. *Cladonia fimbriata* (L.) Fr.
15. *Cladonia furcata* (Huds.) Schrad. ssp. *furcata*
16. *Cladonia gracilis* (L.) Willd.
17. *Cladonia grayi* G. Merr. ex Sandst.
18. *Cladonia macilenta* Hoffm.
19. *Cladonia novochlorophaea* (Sipman) Brodo & Ahti
20. *Cladonia rangiferina* (L.) F.H. Wigg.
21. *Cladonia rei* Schaer.
22. *Cladonia squamosa* (Scop.) Hoffm.
23. *Cladonia verticillata* (Hoffm.) Schaer.
24. **Clypeococcum hypocenomycis* D. Hawksw.
25. *Evernia prunastri* (L.) Ach.
26. *Fuscidea pusilla* Tønsberg
27. *Graphis scripta* (L.) Ach.
28. **Heterocephalacria physciacearum* (Diederich) Millanes & Wedin
29. *Hypocenomyce scalaris* (Ach. ex Lilj.) M. Choisy
30. *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl.
31. *Hypogymnia tubulosa* (Schaer.) Hav
32. **Illosporopsis christiansenii* (B.L. Brady & D. Hawksw.) D. Hawksw
33. *Lecanora allophana* Nyl. f. *allophana*
34. *Lecanora carpinea* (L.) Vain.
35. *Lecanora crenulata* (Dicks.) Hook.
36. *Lecanora hagenii* Ach.
37. *Lecanora pulicaris* (Pers.) Ach.
38. *Lecanora symmicta* Ach.
39. *Lecanora varia* (Hoffm.) Ach.

40. *Lecidella euphorea* (Flörke) Hertel
41. *Lepra amara* (Ach.) Hafellner
42. *Lepraria elobata* Tønsberg
43. *Lepraria incana* (L.) Ach.
44. *Lepraria jackii* Tønsberg
45. *Melanelixia subaurifera* (Nyl.) O. Blanco, A. Crespo, Divakar, Essl., D. Hawksw. & Lumbsch
46. *Melanohalea exasperatula* (Nyl.) O. Blanco, A. Crespo, Divakar, Essl., D. Hawksw. & Lumbsch
47. *Parmelia sulcata* Taylor
48. *Phaeophyscia ciliata* (Hoffm.) Moberg
49. *Phaeophyscia nigricans* (Flörke) Moberg
50. *Phaeophyscia orbicularis* (Neck.) Moberg
51. *Phlyctis argena* (Spreng.) Flot.
52. *Physcia adscendens* (Fr.) H. Olivier
53. *Physcia caesia* (Hoffm.) Fűrnr.
54. *Physcia dubia* (Hoffm.) Lettau
55. *Physcia stellaris* (Ach.) Nyl.
56. *Physcia tenella* (Scop.) DC.
57. *Placynthiella dasaea* (Stirt.) Tønsberg
58. *Placynthiella icmalea* (Ach.) Coppins & P. James
59. *Platismatia glauca* (L.) W. L. Culb. & C. F. Culb.
60. *Polycauliona polycarpa* (Hoffm.) Frödén, Arup & Söchting
61. **Roselliniella cladoniae* (Anzi) Matzer & Hafellner
62. **Taeniolella beschiana* Diederich
63. **Taeniolella phaeophysciae* D. Hawksw
64. **Teloggalla olivieri* (Vouaux) Nik. Hoff. & Hafellner
65. **Trichonectria rubefaciens* (Ellis & Everh.) Diederich & Schroers
66. *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr.
67. **Xanthoriicola physciae* (Kalchbr.) D. Hawksw

Среди выявленных таксонов три вида лишайников и лишенофильных грибов – *Cladonia novochlorophaea*, *Taeniolella phaeophysciae* и *Teloggalla olivieri* – являются редкими на территории Беларуси (рисунок 1). *Cladonia novochlorophaea* ранее приводился для Гомельского и Мозырского районов Гомельской области [8], нами выявлен третий локалитет этого вида в пределах республики. *Taeniolella phaeophysciae* ранее был известен только из 1 локалитета в Гомельском районе Гомельской области [9], нами выявлено второе местообитание этого вида в Беларуси. *Teloggalla olivieri* был известен только из 1 локалитета на основании изучения исторического образца 1960 г. сбора в Несвижском районе Минской области [10]. Нами приводится второе местообитание *T. olivieri*, и этот вид впервые указывается для Гомельской области.

Основу лишенобиоты агрогородка Полесье (55 видов; 82,1 %) составляют представители класса Lecanoromycetes. Из 16 порядков лишенобиоты агрогородка Полесье видовое богатство выше среднего имеют 3 порядка (Lecanorales, Caliciales, Teloschistales), на долю которых приходится 48 видов (71,6 %). В составе лишенобиоты агрогородка Полесье 5 семейств из 19 известных характеризуются уровнем видового разнообразия выше среднего (включают 5 и более видов) – Cladoniaceae, Lecanoraceae, Parmeliaceae, Physciaceae, Teloschistaceae. Среди представителей этих семейств отмечено 47 видов (70,1 %) и 17 родов (50,0 %) лишайников. Таким образом, систематическая структура лишенобиоты агрогородка Полесье в целом соответствует таковой лишенобиоты Беларуси [11]. Можно отметить присутствие среди доминирующих таксонов родов *Cladonia* и *Lecanora*, что свидетельствует о проявлении бореального характера лишенобиоты агрогородка Полесье. Кроме этого для лишенобиоты агрогородка Полесье отмечено увеличение представленности таксонов, типичных для антропогенных местообитаний (Teloschistales; Teloschistaceae; *Physcia*, *Phaeophyscia*), и отсутствие таксонов, характерных для типичных лесных сообществ (Ramalinaceae; *Arthonia*, *Bacidia*, *Bryoria*, *Usnea*).

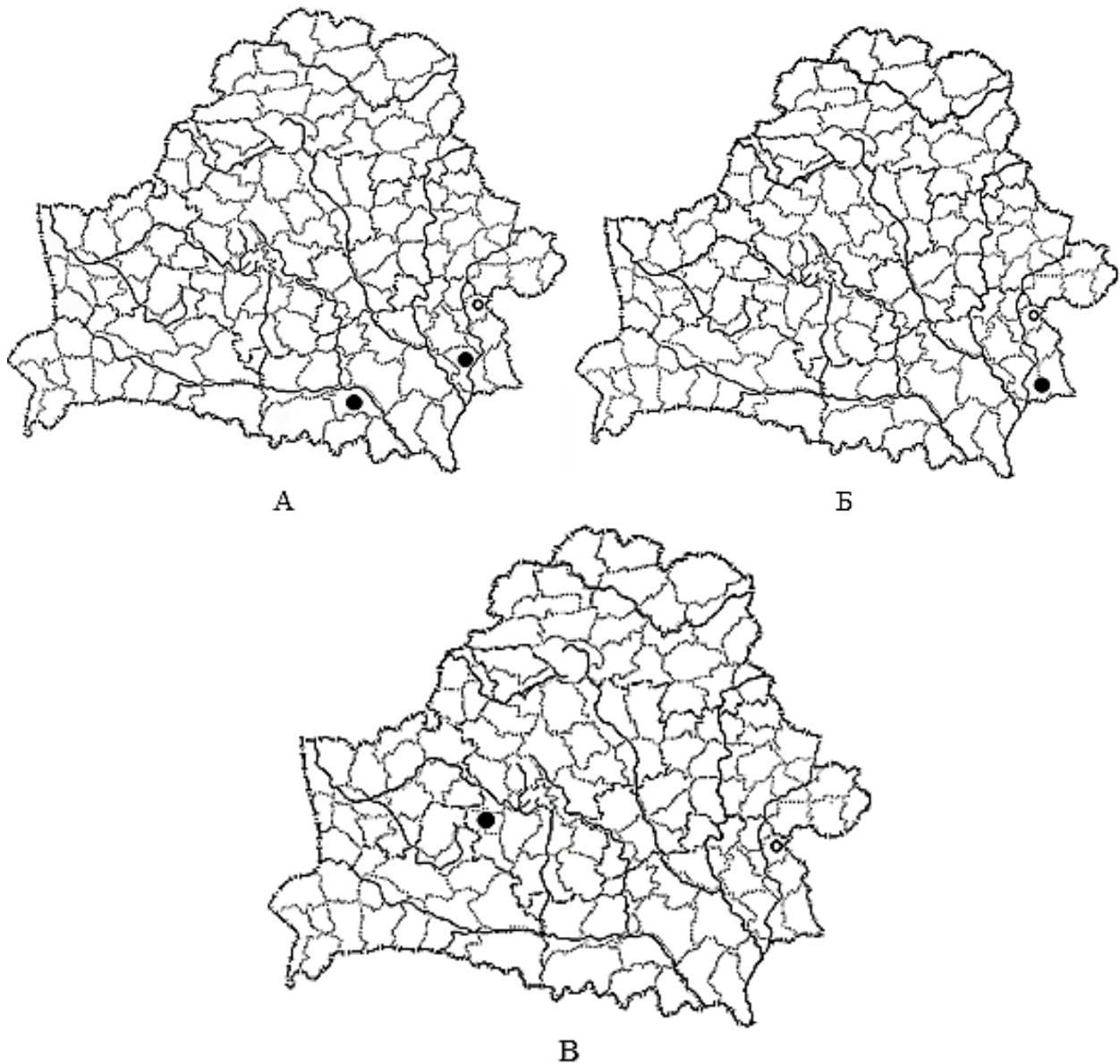


Рисунок 1 – Распространение *Cladonia novochlorophaea* (А), *Taeniolella phaeophysciae* (Б), *Telogalla olivieri* (В) на территории Беларуси:

● – ранее известные локалитеты; ○ – выявленное нами местопроизрастание

Лихенобиота агрогородка Полесье включает биоморфы 1 отдела, 3 типов, 4 классов и 17 групп (таблица 1). На изучаемой территории наиболее представлены лишайники эпигенной плагиотропной жизненной формы (67,2 %). Соотношение между классами накипных, листоватых и кустистых лишайников примерно соответствует пропорции 3:2:2.

В лихенобиоте агрогородка Полесье выделено 3 географических элемента: бореальный (28 видов; 41,8 %), мультizonальный (22 вида; 32,8 %) и неморальный (17 видов; 25,4 %). Доминирование бореального географического элемента не характерно для лихенобиоты Беларуси (рисунок 2) и связано, по-видимому, с преобладанием в окрестностях агрогородка Полесье бореальных хвойных (преимущественно еловых) лесов. Отсутствие лишайников гипоарктомонтанного и монтанного элементов объясняется отсутствием на территории агрогородка Полесье и его окрестностей валунов ледникового происхождения, являющихся основным субстратом произрастания для этих видов на территории Беларуси. Отсутствие субокеанических лишайников объясняется расположением территории исследований, находящейся за пределами зоны проникновения субокеанических видов (рисунок 3).

Таблица 1 – Состав жизненных форм лишайников агрогородка Полесье

Отдел	Тип	Класс	Группа
Эпигенные 57 (100,00 %)	Плагитропные 39 (68,41 %)	Накипные 24 (42,09 %)	Лепрозные 3 (5,26 %) Гониоцистные 2 (3,51 %) Зернисто-бородавчатые 7 (12,27 %) Плотнокорковые 7 (12,27 %) Трещиноватые 3 (5,26 %) Чешуйчатые 1 (1,76 %) Плакодиоидные 1 (1,76 %)
		Листоватые 15 (26,32 %)	Широколопастные 1 (1,76 %) Среднешироколопастные 3 (5,26 %) Узколопастные 9 (15,79 %) Вздутолопастные 2 (3,51 %)
	Плагео-ортотропные 16 (28,07 %)	Бородавчато- и чешуйчато- кустистые 16 (28,07 %)	Шиловидные 3 (5,26 %) Палочковидные 1 (1,76 %) Сцифовидные 9 (15,79 %) Кустисто-разветвленные 3 (5,26 %)
	Ортотропные 2 (3,52 %)	Листоватые 2 (3,52 %)	Субфрутикозные 1 (1,76 %) Повисающие 1 (1,76 %)

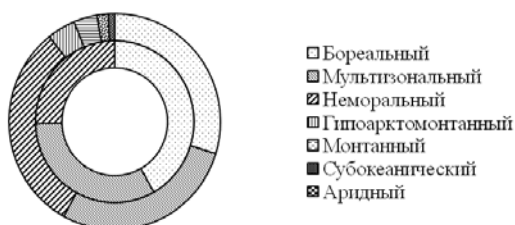


Рисунок 2 – Сравнение географической структуры лишайнобиоты агрогородка Полесье (внутренний круг) и лишайнобиоты Беларуси [12] (внешний круг)

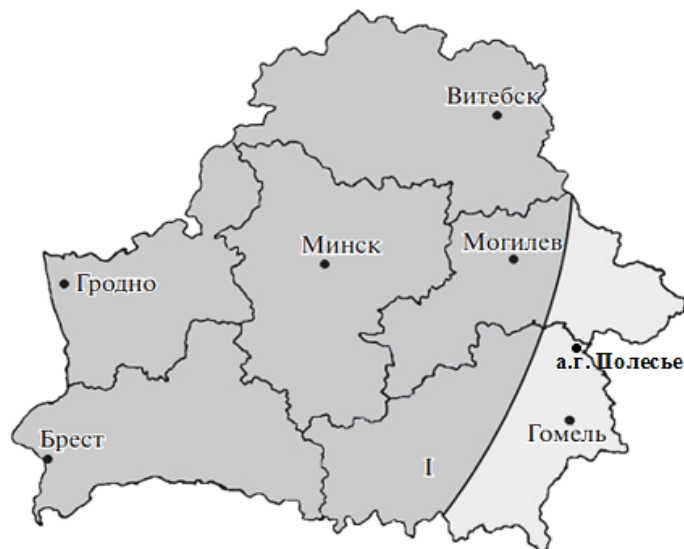


Рисунок 3 – Океанический градиент в Европе (на основе сосудистых растений): I – зона проникновения некоторых субокеанических видов за пределы восточной границы их распространения; составлено на основе данных [12], [13]

В лишайнобиоте территории а.г. Полесье и его окрестностей выявлено 3 типа ареала – мультирегиональный (51 вида; 76,1 %), голарктический (14 видов; 20,9 %) и евразийский (2 вида; 3,0 %) (рисунок 4). Таким образом, с ареалогической точки зрения лишайнобиота низко-специфична.



Рисунок 4 – Сравнение ареалогической структуры лихенобиоты агрогородка Полесье (внутренний круг) и лихенобиоты Беларуси [14] (внешний круг)

Заключение. В ходе проведенных исследований в пределах агрогородка Полесье и в его окрестностях, на территории которых ранее лихенологические исследования не проводились, было выявлено 57 видов и лишайников и 10 видов лихенофильных грибов. Среди выявленных таксонов три вида – *Cladonia novochlorophaea*, *Taeniolella phaeophysciae* и *Teloggalla olivieri* – ранее были известны из одного или двух локалитетов в пределах республики. Из этих видов *T. olivieri* вид впервые указывается для Гомельской области. Таксономический и географический анализы лихенобиоты показали ее бореальный характер, что, по-видимому, является отражением фитоценотической структуры растительных сообществ региона исследований.

Литература

1. Мучник, Е. Э. Лихенофлора Центрального Черноземья : таксономический и эколого-географический анализы, вопросы охраны : автореф. дис. ... д-ра биол. наук : 03.00.05 / Е. Э. Мучник ; Воронежский гос. ун-т. – Воронеж, 2003. – 40 с.
2. Цуриков, А. Г. Лихенобиота Беларуси: анализ разнообразия и перспективы практического использования : автореф. дис. ... д-ра биол. наук : 03.02.12 / А. Г. Цуриков ; Гомел. гос. ун-т им. Ф. Скорины. – СПб., 2021. – 35 с.
3. Orange, A. Microchemical methods for the identification of lichens / A. Orange, P. W. James, F. J. White. – London : British Lichen Society, 2001. – 101 p.
4. Tsurukau, A. A provisional checklist of the lichens of Belarus / A. Tsurukau // Opuscula Philolichenum. – 2018. – Vol. 17. – P. 374–479.
5. Tsurukau, A. New or otherwise interesting records of lichens and lichenicolous fungi from Belarus. III. With an updated checklist of lichenicolous fungi / A. Tsurukau // Herzogia. – 2017. Vol. 30, № 1. – P. 152–165.
6. Outline of fungi and fungus-like taxa / N. N. Wijayawardene [et al.] // Mycosphere. – 2020. – Vol. 11, № 1. – P. 1060–1456.
7. Цуриков, А. Г. Жизненные формы лишайников Беларуси / А. Г. Цуриков // Бот. журн. – 2020. – Т. 105, № 6. – С. 523–541.
8. Цуриков, А. Г. Ревизия лишайников группы видов *Cladonia chlorophaea* в Беларуси : *Cladonia homosekikaica* и *Cladonia novochlorophaea* / А. Г. Цуриков, В. В. Голубков, Н. В. Цурикова // Вестник БГУ. – 2015. – № 3. – С. 30–33.
9. Tsurukau, A. New or otherwise interesting records of lichens and lichenicolous fungi from Belarus / A. Tsurukau, V. Golubkov, M. Kukwa // Herzogia. – 2014. – Vol. 27. – P. 111–120.
10. Three new *Xanthoria* and *Rusavskia* species from Europe / S. Kondratyuk [et al.] // Acta Bot. Hung. – 2013. – Vol. 55. – P. 351–365.
11. Цуриков, А. Г. Таксономический анализ лихенобиоты Беларуси / А. Г. Цуриков, Е. Э. Мучник // Бот. журн. – 2021. – Т. 106, № 1. – С. 3–21.
12. Цуриков, А. Г. Динамика географической структуры лихенобиоты Беларуси как индикатор современных биоклиматических условий / А. Г. Цуриков // Бот. журн. – 2019. – Т. 104, № 8. – С. 1167–1188.
13. Leuschner, C. Ecology of central European forests, vegetation ecology of Central Europe. Vol. 1 / C. Leuschner, H. Ellenberg. – Cham : Springer, 2017. – 971 p.
14. Цуриков, А. Г. Ареалогический анализ лихенобиоты Беларуси / А. Г. Цуриков // Бот. журн. – 2019. – Т. 104, № 11. – С. 1665–1680.

Компьютерные программы для генерации конформаций лигандов – потенциальных лекарственных препаратов

М.И. ШАЛАДОНОВА

В статье проведена сравнительная характеристика программ, используемых при создании конформаций лигандов. На основании проанализированных данных выбрана онлайн-программа FROG2 ввиду ее следующих характеристик: доступности, способности генерировать конформации для циклических молекул, стереоизомеров, удобства интерфейса; высокой скорости генерации конформаций. Она позволяет быстро проанализировать конформационное пространство лигандов. Результат работы программы можно сохранить в виде определенных файлов наиболее часто используемых форматов, которые могут использоваться как входные данные для других программ, позволяющих рассчитать дескрипторы химической структуры. Полученные дескрипторы необходимы для дальнейшей оценки биологической активности соединения – потенциального активного действующего вещества при разработке нового лекарственного препарата.

Ключевые слова: биоактивная конформация, лиганд, систематический поиск, молекулярная динамика, торсионное движение, дистанционная геометрия, стереоизомер, дескриптор.

The article provides a comparative description of the programs that are used to create ligand conformations. Based on the analyzed data, the online program FROG2 was selected because of the following characteristics: accessibility, ability to generate conformations for cyclic molecules, stereoisomers, interface convenience, high rate of conformation generation. It allows to get a sufficient number of conformations for ligands, in the definite file formats, which could be input files for the other programs and that allows to calculate descriptors of the chemical structures of conformations. The obtained descriptors are necessary for further evaluation of the biological activity of the compound – a potential active substance in the development of a new medicine.

Keywords: bioactive conformation, ligand, systematic search, molecular dynamics, torsion motion, distance geometry, stereoisomer, descriptor.

Введение. Как правило, биологическая активность фармацевтической субстанции определяется одной «биоактивной» конформацией её молекул, которую необходимо обнаружить среди всего множества конформаций с минимальными показателями энергии. Для компьютерного дизайна лекарственных препаратов (драг-дизайна) поиск молекул химических соединений с такой конформацией является важным и необходимым, т. к. сведения об активной конформации вещества позволяют конструировать наиболее эффективные биологически активные лиганды для заданной мишени. Принято считать, что биоактивная конформация не всегда имеет минимальную энергию из всех образуемых конформаций, однако она не может превышать по энергии глобальный минимум [1], [2]. Следовательно, определение низкоэнергетических конформаций играет важную роль для понимания и установления корреляции между структурой молекулы и её биологической активностью.

Экспериментальные методы установления структуры химических молекул, например, такие как ЯМР, способны предоставить информацию всего лишь о некоторых конформациях, наиболее часто встречающихся в растворе. Наиболее развернутая картина как и по количеству конформаций, так и об особенностях конформационного пространства может быть получена только с использованием теоретических методов, основы которых нашли свое применение в ряде компьютерных программ. Временные затраты конформационного анализа такими методами зависят от способа расчета энергии полученных конформаций. Энергия может рассчитываться при помощи квантово-механических методов или методов молекулярной механики. Квантово-механические расчеты являются длительными и практически не применимы для больших и подвижных молекулярных систем, поэтому в программах конформационного поиска для оценки показателей энергии чаще всего используются методы молекулярной механики.

Существует много различных методов поиска энергетического минимума молекулярных систем. Все используемые подходы можно систематизировать в виде следующих основных групп:

- 1) систематический поиск – полный анализ конформационного пространства путем систематической проверки всех вариантов конформаций;
- 2) случайный поиск – значения торсионных углов молекулярной модели задаются случайным образом;
- 3) моделирование молекулярной динамики – компьютерное моделирование реальных движений в молекулярной системе во времени;
- 4) эволюционный поиск (генетический алгоритм и стратегия эволюции) – торсионные углы в молекуле изменяются по определенному алгоритму, основанному на генетических принципах.

Систематический поиск дает наилучшие результаты в конформационном анализе. С помощью систематического поиска теоретически можно получить полную картину потенциальной поверхности путем перебора всех возможных величин торсионных углов (вращение различных фрагментов молекулы вокруг всех разрешенных для вращения связей).

Совершенно на другом подходе к исследованию конформационного пространства основан метод Монте-Карло, который встречается под названием «метод случайного поиска». Данный метод имеет стохастическую природу, и при его использовании рассматриваемая конформация изменяется случайным образом, превращаясь из одной в другую. Такой поиск начинается с определения и дальнейшего изменения оптимизированной структуры. Каждый шаг интеграционной процедуры заключается в присваивании молекуле случайным образом новых значений торсионных углов либо декартовых координат, после этого минимизируется энергия каждой из полученных конформаций, и алгоритм повторяется снова. Энергетически минимизированная конформация сравнивается с предыдущей и отображается на выходе лишь в том случае, если она уникальна и величина полной энергии молекулы ниже, чем была на предыдущем шаге. Если значение полной энергии молекулы выше, то отбор получившейся конформации происходит с учетом критерия Метрополиса. Наиболее существенное преимущество метода случайного поиска – возможность изучать молекулы любого размера. Данный метод широко и успешно применим для исследования циклических молекул, поскольку системы, содержащие циклы, систематический поиск анализирует с трудом [1], [2].

На сегодняшнее время широкое применение нашел метод молекулярной динамики на основе принципов молекулярной механики. Цель молекулярной динамики заключается в воспроизведении движения молекулы во времени. Подход молекулярной динамики включает ряд особенностей, например то, что такой метод позволяет преодолевать энергетические барьеры, разделяющие различные конформации в отличие от консервативных процедур оптимизации геометрии. Для увеличения количества конформаций, выбранных в результате моделирования молекулярной динамики, используется повышение температуры моделирования. При такой высокой температуре возрастают шансы получить конформационное разнообразие, т. к. молекулы становятся способными преодолевать даже самые высокие энергетические барьеры, разделяющие некоторые конформации. Основная задача высокотемпературного моделирования – обеспечить молекулу достаточным количеством кинетической энергии для преодоления барьеров между различными конформациями.

Эволюционный поиск основан на применении генетических принципов при расчете изменений торсионных углов в конформационном анализе молекулярной системы. Термины и понятия, используемые в этом методе, соответствуют оригинальным терминам из генетики: индивидуумы, мутации, кроссинговер, воспроизводство. Конформационное пространство исследуется с помощью повторяющихся шагов кроссинговера и мутаций. При этом могут быть найдены не все минимумы, однако, как правило, быстро находится если не глобальный минимум, то большинство локальных минимумов с очень низкой величиной энергии.

Каждый из вышеописанных методов имеет свои преимущества и недостатки. Например, систематический поиск подвержен «комбинаторному взрыву» количества конформаций и не применим к исследованию молекул, содержащих циклы. При использовании методов случайного поиска требуется достаточно времени для подтверждения полноты покрытия конформационного пространства. Эволюционный поиск, основанный на применении генетического ал-

горитма, способен быстро сходиться в близкой окрестности минимума, однако может ошибочно сойтись в локальном минимуме. Для того, чтобы проверить соответствие и правильность методов конформационного поиска используются способы сравнения со стандартными тестовыми наборами. Сравнение осуществляется по числу конформаций, их энергии. Одним из наиболее применяемых способов является сравнение полученных программой конформеров с экспериментально определенными структурами из баз кристаллографических данных [1], [2].

В основной части статьи будут проанализированы программы, которые используются для генерации конформаций в хемоинформатике и биоинформатике, а именно: OMEGA, FROG2, VegaZZ.

Основная часть.

1. Анализ программы генерации конформаций OMEGA.

Коммерчески доступная программа OMEGA разработана компанией OpenEye Scientific Software Inc. Данная программа представляет собой инструмент для создания трехмерных конформаций молекул. OMEGA предлагает два различных способа генерации конформаций, в основе которых лежит моделирование молекулярной динамики: метод торсионного движения и метод дистанционной геометрии.

Метод торсионного движения предназначен для генерации конформаций молекул, которые не содержат в своей структуре циклов, в то время как метод дистанционной геометрии предназначен для исследования любых молекул, но был разработан конкретно для тех, которые содержат в своей структуре макроциклы.

Проанализировано научное исследование, в ходе которого сравнивали способность разных компьютерных программ для генерации конформаций получать биоактивные конформации (изучалась программа OMEGA 2.0). В проведенном исследовании рассматривали библиотеку из 778 структур молекул лекарственных веществ и фармакологически активных соединений из базы данных Protein Data Bank. Были применены два подхода к генерации конформаций: высокопроизводительный (для работы с большими базами данных) и высококачественный (для изучения центров связывания и повышения качества описания ведущей структуры). Результаты исследования выявили, что качество конформационных моделей определяется выбором оптимального компромисса между плотностью покрытия конформационного пространства и сложностью вычислительного процесса используемого алгоритма. При увеличении размера и подвижности исследуемой молекулы всегда необходимо увеличивать размер конформационного ансамбля для сопоставимого качества представления молекулы. В результате исследования программа OMEGA показала себя с лучшей стороны как генератор высококачественных моделей [1].

Также имеются данные исследований о способности OMEGA в полной мере просматривать конформационное пространство. Для программы была проведена валидация процесса генерации конформаций различных биологически активных соединений. В исследованиях было доказано, что программа успешно генерирует 3D структуры: наблюдали неплохое соответствие между сгенерированными конформациями и кристаллографическими данными, представленными в Кембриджской структурной базе данных (CSD) [3]. Кроме того, показано, что программа OMEGA обеспечивает оптимальный баланс между скоростью и производительностью при анализе большого количества данных [4].

Также было обнаружено, что это самый быстрый из коммерчески доступных генераторов конформаций [5]. Данные о стоимости программы расположены по электронному адресу <https://www.eyesopen.com/omega>. В свободном доступе на английском языке имеется руководство по использованию программы.

2. Анализ программы генерации конформаций FROG2.

Свободно-доступная онлайн программа FROG2 (от англ. FRee Online drug 3D conformation Generator) предназначена для 3D-генерации конформаций. Интерфейс программы представлен на рисунке 1. Данная программа позволяет генерировать конформационные ансамбли для малых молекул. В качестве входных данных можно задавать 1D или 2D структуру. Программа осуществляет генерацию конформаций, используя двухстадийный подход Монте-Карло в пространстве двугранных углов. После загрузки в программу нужных соединений (лигандов) в заданном формате (SMILES – 1D система молекулярного ввода строки; sdf или mol2 –

2D файлы ввода структурных данных) осуществляется генерация конформаций в 3D формат в форматах mol2, sdf и pdb. Frog2 способна обнаруживать стереоизомеры и в дальнейшем делать выборки конформаций для различных стереоизомеров. Программа также включает в себя новые средства минимизации потенциальной энергии для сгенерированных конформаций и способы генерации конформаций для молекул, содержащих циклы. Оптимизированный генератор конформационных ансамблей FROG2 (в отличие от предыдущей версии программы FROG1) позволяет использовать меньше времени для вычислений. Высокая скорость получения генерируемых конформационных ансамблей делает возможным исследование больших количеств анализируемых соединений с помощью FROG2 [6]. Онлайн-ресурс программы и сопроводительная обучающая документация находятся в свободном доступе по электронному адресу <http://bioserv.rpbs.univ-paris-diderot.fr/Frog2>.

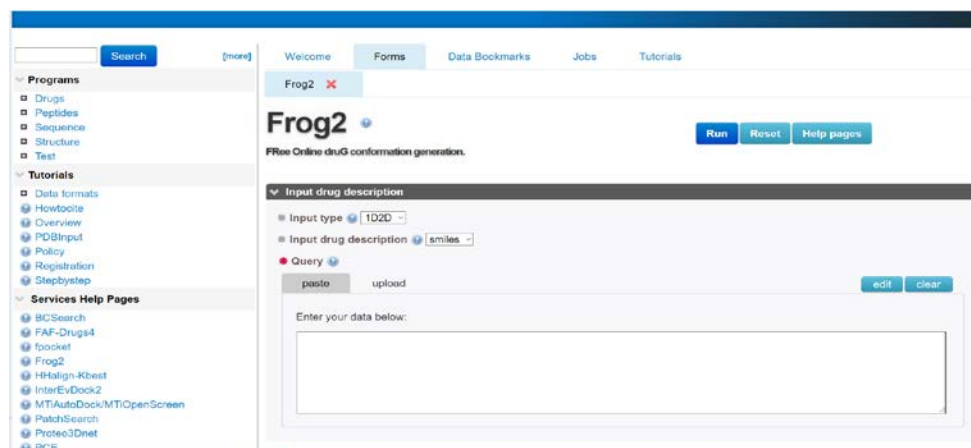


Рисунок 1 – Онлайн-программа Frog2 (окно для ввода данных)

Для генерации конформаций интересующей молекулы (лиганда) необходимо загрузить в программу файл, в котором представлено описание этой молекулы (лиганда) в определенном, предусмотренном программой, формате. После загрузки файла следует выбрать параметры, согласно которым будет выдан полученный результат. Параметры задаются в интерфейсе программы, представленном на рисунке 2.

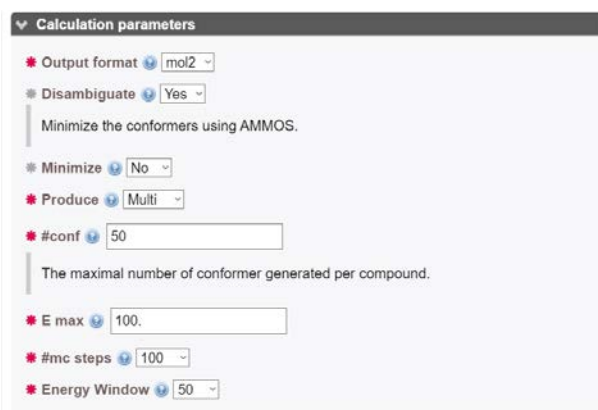


Рисунок 2 – Параметры для получаемых данных

В таблице параметров указывается формат данных для отображения искомых конформации (Output format), количество шагов интеграционной процедуры метода Монте-Карло (#mc steps), величина «энергетического окна» (Energy window), максимальное количество конформаций для генерации (#conf), а также выбрать возможность минимизировать энергию конформаций (Minimize) и возможность получения мультиконформеров (Produce).

После загрузки исходных данных и задания параметров поиска конформаций, запускается генерация конформеров. Результат работы программы представлен на рисунке 3.

The screenshot displays the Frog2 web application interface. At the top, there's a URL bar showing 'https://mobyli.rpbs.univ-paris-diderot.fr/data/jobs/Frog2/215091503460884'. Below the URL are buttons for 'get help', 'back to form', 'remove job', and 'download'. The main content area is divided into several sections:

- Results**: A section header.
- Unambiguous smiles (Drug_3DStructure)**: A section containing a list of smiles strings and their corresponding molecule IDs (mol1_0, mol1_1, mol1_2, mol1_3).
- Frog.pdb (PDB)**: A section containing a table of atom coordinates and other PDB-related data.
- Logs (Text)**: A section containing a log file output.

Each section has a 'full screen' button and a 'bookmark' button. The 'Frog.pdb' section also has a 'full screen' button and a 'PDB' button. The 'Logs' section has a 'full screen' button and a 'bookmark' button.

Рисунок 3 – Вариант представления выводных данных

Программа представила конформации молекулы в запрашиваемом формате. Указано количество сгенерированных конформаций, а также количество изомеров среди них. Согласно литературным данным, программа Frog2 является самой быстрой по скорости генерации из предложенных в свободном бесплатном доступе программ [7].

Баланс между скоростью генерации конформеров и конформационным разнообразием достигается в зависимости от целей проводимого исследования и количества загружаемых в программу соединений. Отключение второго этапа метода Монте-Карло, которое можно выбрать в настройках на сервере, приведет к более быстрой генерации, но количество полученных конформаций будет меньше. По средним расчетам Frog2 находит биоактивную конформацию в пределах RMSD (среднеквадратичное отклонение) $0,73 \pm 0,42 \text{ \AA}$. Примеры, демонстрирующие конформационные ансамбли, полученные Frog2 и коммерчески доступной программой Omega, для двух молекул набора данных Astex, можно увидеть на рисунке 4. На данном рисунке слева представлены конформации, сгенерированные Frog2, справа – программой Omega. В части а) рисунка отображены конформации для лиганда с идентификатором PDB (Protein Data Bank) 1jla, в части b) рисунка показаны конформации для лиганда с идентификатором PDB 1meh. Также в каждой из частей рисунка сверху отображены структурные формулы лигандов, для которых проводился конформационный поиск. Полученные с использованием Frog2 и Omega результаты демонстрируют небольшое превосходство Omega (которая является коммерческой программой) со значением показателя среднеквадратичного отклонения равным $0,69 \pm 0,37 \text{ \AA}$. Согласно вычисленным значениям RMSD и визуальному анализу, можно сделать вывод, что и Frog2, и Omega довольно хорошо исследуют конформационное пространство и способны генерировать конформации, близкие к биоактивной. Кроме того, у пользователя есть возможность минимизировать энергию генерируемых конформеров с помощью Frog2 или минимизировать собственную библиотеку соединений в 3D, задавая параметры выходных данных. Также в литературных источниках отмечено, что точность генерации конформаций в программе Frog2 довольно высока. В результате сравнения сгенерированных конформаций (было использовано 10000 случайно выбранных соединений) с данными, хранящимися в кристаллографической базе данных химических соединений ChemBridge diverset (<http://www.chembridge.com>) Frog2 смогла сгенерировать конформеры для более чем 98 % соединений, что говорит об адекватности и надежности конформационного поиска с использованием данной программы. Из минусов Frog2 можно отметить, что иногда возникают ошибки при генерации стереоизомеров для циклических соединений и появляются неточности относительно создания конформаций для определенных химических групп [6], [7].

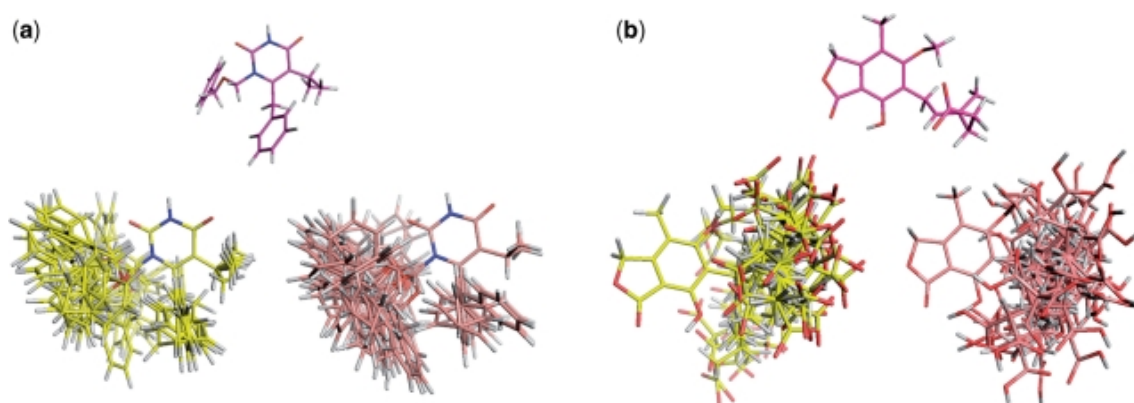


Рисунок 4 – Конформационные ансамбли для двух малых молекул базы данных Astex, сгенерированные Frog2 и Omega

3. Анализ программы генерации конформаций VegaZZ.

Программное обеспечение VegaZZ для Windows имеется в свободном доступе и загружается на веб-сайте <https://www.ddl.unimi.it/>. Пользователь может проводить все имеющиеся операции по молекулярному моделированию на персональном компьютере. Интерфейс данной программы представлен на рисунке 5. Двухмерный молекулярный редактор Ketcher позволяет рисовать молекулы, а последующая команда «Отправить в VegaZZ» предоставляет полученную структуру трехмерной модели.

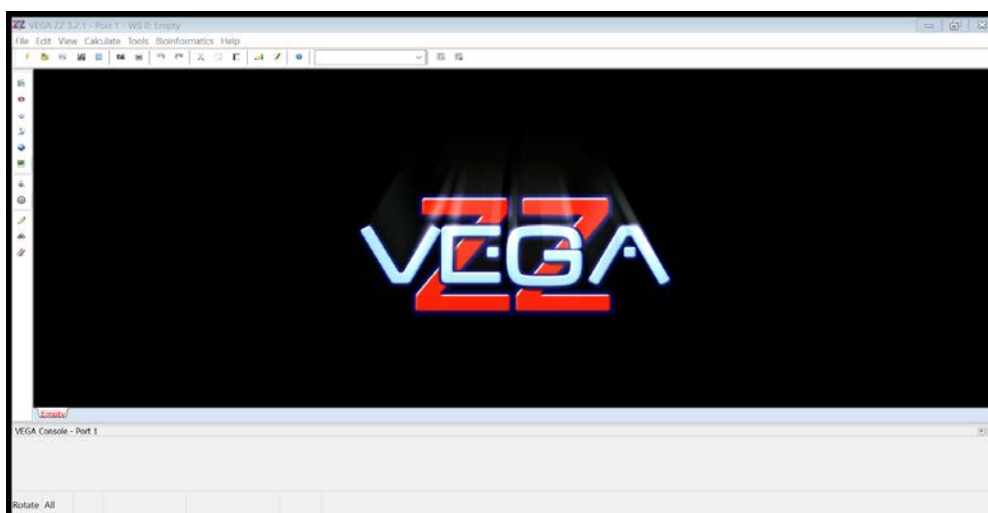


Рисунок 5 – Интерфейс программы VegaZZ

Конформационный анализ выполняется с помощью встроенной программы АММР с силовым полем SP4. Этот метод определен как систематический, с возможностью минимизировать энергии всех конформаций, остальные параметры могут устанавливаться по умолчанию либо выбираться пользователем. Перед запуском расчета необходимо задать количество шагов изменения угла и сохранить выходные файлы (траектория, выход и энергия). Чтобы проанализировать результаты, необходимо нажать «Рассчитать, анализ», затем открыть файл в формате .dcd и создать график, выбирая опцию «График энергии». Наиболее стабильную конформацию можно получить при указании на пользовательском интерфейсе диаграммы с наименьшей энергией. В программе для просмотра будут доступны и другие полученные для данной молекулы конформации. Для каждой конформации будет представлена энергия на графике. Пример такого графика изображен на рисунке 6.

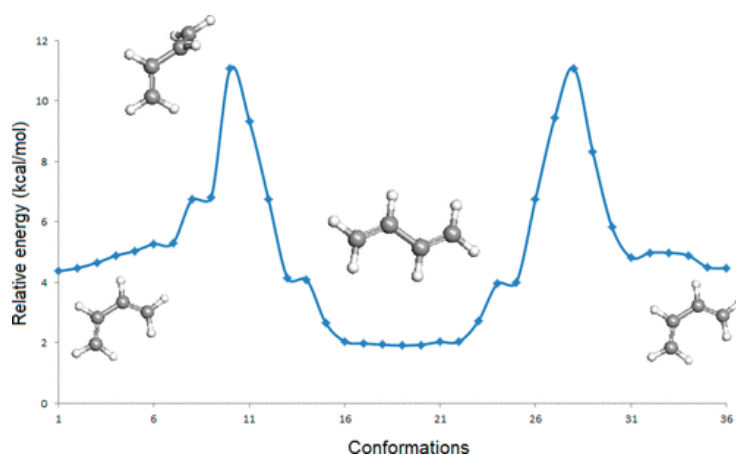


Рисунок 6 – Конформации, сгенерированные в программе и соответствующая им потенциальная энергия

Однако нет данных о том, что программа VEGA ZZ учитывает количество стереоизомеров при генерации конформаций, также в литературных источниках нет подтверждающей информации о том, насколько точно и правильно сгенерированы конформации. Программа показала хорошую скорость генерации конформаций для простых химических молекул (в литературном источнике была рассмотрена генерация конформаций для н-бутана, циклического ацетата, аминокислот и многоатомных спиртов). Следует отметить, что программа способна генерировать конформации для молекул, содержащих циклы, молекул, содержащих внутримолекулярную водородную связь и молекул, для которых характерен мезомерный эффект. Также VEGA ZZ позволяет рассчитывать значения заданных торсионных углов для каждой молекулы. В целом программа предназначена для генерации конформеров низкомолекулярных соединений, однако нет информации о том, насколько хорошо она будет генерировать биоактивные конформации для лигандов – потенциальных лекарственных препаратов [8].

Заключение. После анализа информации о программах для использования в качестве наиболее оптимальной можно рассматривать программу для генерации конформаций FROG2 ввиду ее следующих характеристик: доступности, способности генерировать конформации для циклических молекул, стереоизомеров, удобства интерфейса; высокой скорости генерации конформаций. Также, исходя из данных литературных источников, программа FROG2 продемонстрировала приемлемые и сопоставимые характеристики (RMSD) при её сравнении с коммерчески доступной программой OMEGA.

Литература

1. Молекулярное моделирование : теория и практика / Х.-Д. Хёльтце [и др.]. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 318 с.
2. Иванов, А. С. Основные принципы молекулярного конформационного анализа для медико-биологов / А. С. Иванов // Биомедицинская химия. – 2007. – Т. 53, Вып. 6. – С. 713–728.
3. Hawkins, P. C. D. Conformer Generation with OMEGA : Algorithm and Validation Using High Quality Structures from the Protein Databank and Cambridge Structural Database / P. C. D. Hawkins, A. G. Skillman, G. L. Warren [et al.] // Chem. Inf. Model. – 2010. – Vol. 50. – P. 572–584.
4. Perola, E. Conformational Analysis of Drug-like Molecules Bound to Proteins: An Extensive Study of Ligand Reorganization upon Binding / E. Perola, P. S. Charifson // Med. Chem. – 2004. – Vol. 47. – P. 2499–2510.
5. Friedrich, N.-O. de Bruyn Kops. Benchmarking Conformer Ensemble Generators / N.-O. de Bruyn Kops, Friedrich, F. Fachsenberg, K. Sommer, M. Rarey, J. Kirchmair // Chem. Inf. Model. – 2017. – Vol. 5. – P. 2719–2728.
6. Miteva, M. Frog2 : Efficient 3D conformation ensemble generator for small compounds / M. Miteva, F. Guyon, P. Tuffery // Nucleic Acids Research. – 2010. – Vol. 38. – P. W622–W627.
7. Ebejer, J.-P. Freely Available Conformer Generation Methods : How Good Are They? / J.-P. Ebejer, G. M. Morris, Ch. M. Deane // Chem. Inf. Model. – 2012. – Vol. 52. – P. 1146–1158.
8. Pedretti, A. VEGA : a versatile program to convert, handle and visualize molecular structure on Windows-based PCs / A. Pedretti, L. Villa, G. Vistoli // Journal of Molecular Graphics and Modelling. – 2002. – Vol. 21. – P. 47–49.

Информатика

УДК 004.9:681.5.01

Система адаптивного управления технологическим циклом автоматизированного производства

В.А. ПРОХОРЕНКО

В настоящей работе предлагается реализация процедуры синтеза обратных связей по управлению технологическим циклом производства. Разработана гибридная интеллектуальная система нового поколения и представлены методы адаптации на основе построения моделей искусственных нейронных сетей для решения прикладных задач оптимизации управления сложными технологическими комплексами. Полученные результаты дают возможность разработки новых гибридных интеллектуальных систем, предназначенных для решения широкого класса задач адаптации управления технологическими объектами в режиме реального времени с использованием средств программно-аппаратного сопряжения с объектом управления.

Ключевые слова: адаптивное управление, нейронные сети, система управления, автоматизированное производство.

An implementation of procedure to synthesize feedback control for technological production cycle is proposed. A new generation hybrid intellectual system was developed and adaptation methods based on the construction of artificial neural network models for solving applied control optimization problems for complex technological systems are presented. The results obtained make it possible to develop new hybrid intellectual systems for solving a wide range of problems of adaptive control of technological objects in real time using the means of software and hardware interface with the control object.

Keywords: adaptive control, neural network, control system, automated production.

Введение. Постоянно развивающиеся направления научно-технической деятельности в области оптимизации функционирования производственных систем требуют разработки актуальных подходов в реализации адаптивного управления производственной деятельностью с использованием элементов искусственного интеллекта, нейросетевого моделирования и разработки интеллектуальных компьютерных систем нового поколения.

Формальное описание объекта управления основано на онтологии предметной области «технологические процессы производства с вероятностными характеристиками». Используемая формализация предметной области основана на научных разработках в области имитационного моделирования сложных технических систем [1].

Адаптация управления осуществляется при использовании средств программно-аппаратного сопряжения нейросетевых регуляторов со стойкой управления технологическим объектом в режиме реального времени.

Основой для создания гибридной интеллектуальной системы адаптации управления служит идея разработки и использования математических моделей нейросетевых регуляторов для решения задач оптимизации управления, реализации методов и алгоритмов синтеза обратных связей по управлению технологическим циклом в зависимости от изменения параметров функционирования объекта управления.

Термины и определения. Центральными понятиями в рассматриваемой предметной области являются технологический процесс (цикл) и вероятностный технологический процесс [2]. Технологический процесс (ТП) (технологический цикл) производства – установленная технологическими документами последовательность взаимосвязанных действий, направленных на объект процесса с целью получения требуемого конечного результата. Технологическая операция – часть технологического процесса, выполняемая непрерывно на одном

рабочем месте над одним или несколькими одновременно обрабатываемыми или собираемыми изделиями, одним или несколькими исполнителями. Микротехнологическая операция – конечная последовательность элементарных операций, составляющих в совокупности содержание технологической операции, выполняемой непрерывно на одном рабочем месте. Система управления (СУ ТП) – строго определённый набор программно-аппаратных средств для управления подконтрольным объектом, обеспечивающий возможность сбора показаний о его состоянии и воздействий на его поведение для достижения заданных целей.

Вероятностный технологический процесс – технологический процесс с вероятностными параметрами функционирования; технологический процесс с изменяющейся в ходе его реализации структурой технологического цикла.

Под адаптивным управлением понимается совокупность методов и алгоритмов, позволяющих синтезировать обратные связи по управлению, которые могут изменять параметры (структуру) нейрорегулятора в зависимости от наличия внешних возмущений или управляющих воздействий.

Проблемы адаптивного управления производственной деятельностью при разработке интеллектуальных компьютерных систем нового поколения. Средства автоматизации предприятия должны оперативно и с минимальными затратами времени сотрудников адаптироваться к любым изменениям самого производства – к расширению или сокращению объёмов производства, изменениям номенклатуры производства, изменению используемого оборудования, изменению общей структуры производства и иным обстоятельствам.

Современный анализ состояния разработок в области исследования управляемых производственных систем показывает, что проблема определения параметров функционирования подобных объектов исследования в режиме реального времени возникает прежде всего при необходимости производства сложных технических изделий, требующих точности их изготовления и высокой производительности труда [2].

Существующие специальные модели искусственного интеллекта, такие как нейронные сети, обладают уникальными свойствами, могут применяться в качестве универсальных аппроксиматоров, имеющих способность к обобщению. Эти особенности делают целесообразным применение моделей такого типа при решении сложных задач адаптивного управления [3].

Построение математической модели производственной системы. Для построения математической модели производственной системы требуется формализация технологических процессов этой производственной системы.

Вероятностные технологические процессы (ВТП) – это технологические процессы с вероятностными параметрами функционирования, а также процессы с изменяющейся в ходе их реализации структурой технологического цикла. При этом технологическим процессом (циклом) называется множество технологических операций $\{MTCO_{ij}\}$, где $i, j = \overline{1, N}$, в совокупности с используемыми ими ресурсами.

Традиционно рассматривают две группы технологических процессов – непрерывного и дискретного типа. Первая группа технологических процессов обычно реализуется на производстве в режиме реального времени. Данные технологические процессы являются объектом АСУТП. Примером применения АСУТП является контроль за процессом выплавки стали, контроль за поступлением сырья в мартеновские печи и автоматической разливкой металла по формам. Вторая группа технологических процессов характеризуется графовой структурой организации технологического цикла, который реализуется в результате взаимодействия множества технологических операций (TCO_i) . Некоторые TCO_i могут состоять, в свою очередь, из множества микротехнологических операций $\{MTCO_{ij}\}$.

Моделирование всех типов технологических процессов осуществляется либо на основе критических, либо на основе средних значений расхода ресурсов.

ВТП используют для своего выполнения устройства оборудования, которые могут иметь различные характеристики надежности функционирования. Устройства оборудования обладают некоторым ресурсом выполнения своих функций, который постепенно уменьшается и

зависит от времени активного использования устройства. Моменты отказа определяются функциями распределения вероятностей значений времени безотказной работы устройств оборудования. Отказы оборудования могут приводить к авариям различных типов, требующим оперативных реакций с целью устранения последствий, ведущим к расходу материальных средств и временным задержкам.

Таким образом, проектное моделирование ВТП в силу вероятностного характера запросов ресурсов множеством $\{MTCO_{ij}\}$ и наличия отказов оборудования, природа которых также вероятностная, представляет собой сложную научную задачу [4], [1].

Формализация контура управления технологическим циклом. В соответствии с онтологией предметной области вероятностных технологических процессов под технологическим циклом производства подразумевается последовательность действий и операций, в результате которых осуществляется производство готовой продукции.

Функциональное взаимодействие компонентов комплекса управления и работающего в режиме реального времени технологического цикла производства осуществляется на основе мониторинга состояния оборудования и параметров управления с помощью регистров-индикаторов и технических средств сопряжения. Процесс управления основан на использовании в структуре контура управления специальных сигналов и стандартных элементов, которые используются при формировании регулирующих воздействий на используемое оборудование [3].

Некоторые $MTCO_{ij}$ в ВТП используют не только ресурсы, но могут выполнять ряд контрольных функций за изменением значений компонентов множества переменных управления ВТП $\{U_s\}$. В составе ВТП контролируемые $MTCO_{ij}$ могут изменяться вероятностным образом: выход за допустимые пределы (P_{thr}) на величину (ΔU_s), которая в ту или в другую сторону может изменяться также вероятностным образом.

Разработка моделей нейрорегуляторов для решения задач адаптивного управления. В рамках решения задач управления существует множество различных подходов на основе нейросетевых методов. В частности, можно выделить следующие схемы построения нейрорегуляторов [2]:

1. прямое управление с эталонной моделью (последовательная схема управления);
2. схемы построения нейроконтроллеров на основе обучения с подкреплением (адаптивно-критические схемы).

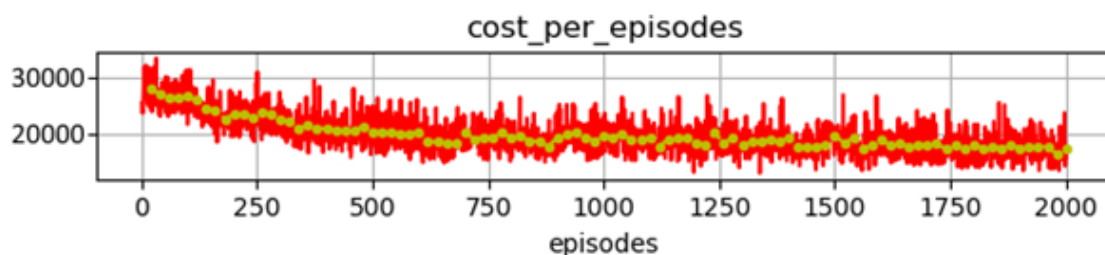


Рисунок 1 – Пример уменьшения совокупности затрат функционирования ИМ ТП при обучении нейрорегулятора

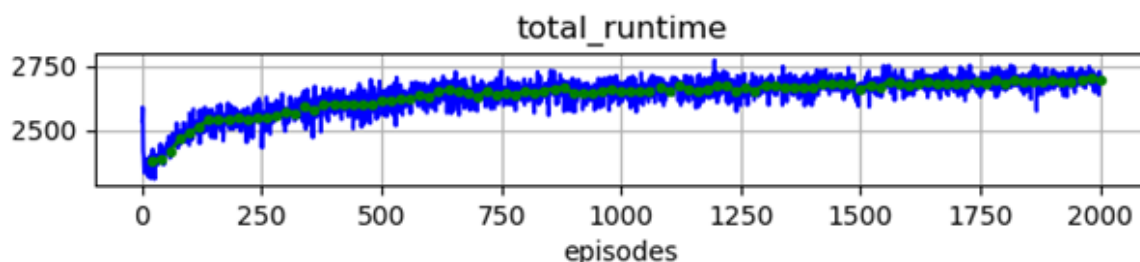


Рисунок 2 – Пример увеличения среднего времени нормального функционирования ИМ ТП при обучении нейрорегулятора

При использовании схемы с прямым управлением требуется приемлемое обобщение нейрорегулятором собранных массивов данных об управлении технологическим циклом. С точки зрения теории машинного обучения в этом случае будет решаться задача обучения с учителем с формированием обучающего множества на основе собранных статистик [5].

Применение методов обучения с подкреплением подразумевает создание среды, в которой производится критическая оценка деятельности агента (нейрорегулятора). Средой, в которой действует агент, в контексте решения задач управления технологическим циклом является система управления технологическим циклом производства, которая делает доступным для агента наблюдение за сигналами регистров о состоянии ТП и параметров управления. На основании решений агента система принятия решений формирует запросы на изменения параметров управления [6].

На рисунках 1 и 2 показаны примеры оптимизации параметров функционирования имитационной модели технологического процесса в процессе построения нейрорегулятора методами обучения с подкреплением [7].

Интеллектуальная компьютерная система адаптации управления. Описанный инструментарий позволяет осуществить создание гибких интеллектуальных компьютерных систем адаптации управления (КСАУ), представляющих собой набор семантически совместимых и легко заменяемых в зависимости от решаемого круга задач компонентов.

Осуществление взаимодействия системы и ее соответствующих решателей со стойкой управления автоматизированной технологической системы при этом осуществляется с помощью средств программно-аппаратного сопряжения производства.

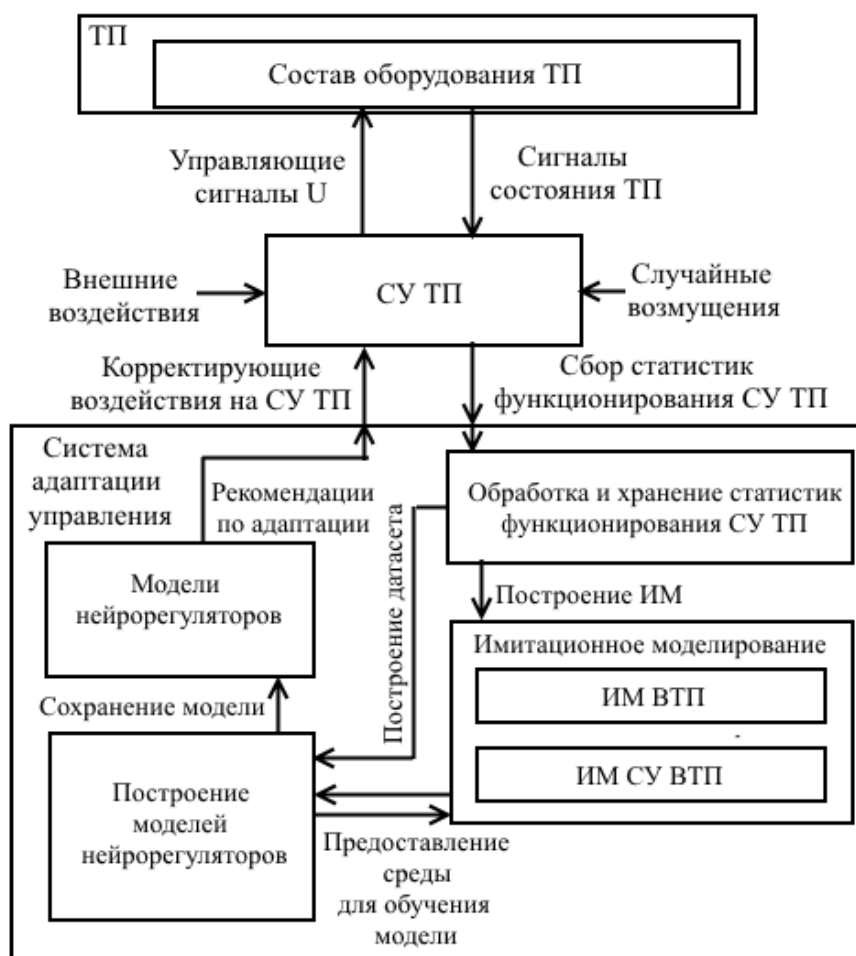


Рисунок 3 – Схема взаимосвязей системы адаптивного управления

Система адаптации управления включает в себя систему обработки и хранения статистик функционирования ТП и его системы управления. При наличии существующего регулятора, эта

система позволяет собрать также статистики его корректирующих воздействий. При построении нейрорегуляторов с применением адаптивно-критических схем, необходима среда для его обучения [6], [7]. Система имитационного моделирования позволяет построить модели ТП и системы управления ТП, которая используется в качестве среды для обучения нейрорегуляторов.

Адаптация управления технологическим циклом выполняется на основе осуществления функционирования построенного нейрорегулятора, формирующего корректирующие воздействия на систему управления ТП таким образом, чтобы не допустить выхода за пределы допустимых границ диапазона изменений компонентов $\{U_{fh}\}$ переменных вектора управления $\{U_h\}$.

Возврат значений переменных управления в рамки допустимых интервалов выполняется посредством специальных средств корректировки – инициирования запуска МТСО ТП, которые изменяют значения компонентов множества переменных управления $\{U_s\}$ либо задействуют схемы резервирования оборудования.

На рисунке 3 показана структура связей системы адаптивного управления на основе нейрорегуляторов.

Заключение. Последнее время активно совершенствуются алгоритмы и реализуются новые методы решения научно-прикладных задач по управлению роботизированными производствами в условиях наличия случайных внешних воздействий на объект управления.

В данной работе предложена реализация процедуры синтеза обратных связей по управлению технологическим циклом производства на основе его формализации в рамках экосистемы OSTIS и построения моделей искусственных нейронных сетей для решения прикладных задач оптимизации управления сложными технологическими комплексами.

Полученные результаты дают возможность разработки гибридных интеллектуальных компьютерных систем, предназначенных для решения широкого класса прикладных задач адаптации управления технологическими объектами в режиме реального времени с использованием технических средств программно-аппаратного сопряжения с объектом управления.

Литература

1. Максимей, И. В. Проблемы теории и практики моделирования сложных систем / И. В. Максимей, В. С. Смородин, О. М. Демиденко ; М-во образования РБ, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2015. – 263 с.
2. Автоматизация производственной деятельности в рамках Экосистемы OSTIS // Технология комплексной поддержки жизненного цикла семантически совместимых интеллектуальных компьютерных систем нового поколения: монография / В. А. Прохоренко [и др.] ; под общ. ред. В. В. Голенкова. – Минск : БГУИР 2023. – Гл. 7.7. – С. 805–830.
3. Смородин, В. С. Адаптивная система управления технологическим процессом производства / В. С. Смородин, В. А. Прохоренко // Проблемы физики, математики и техники. – 2021. – № 3 (48). – С. 96–102.
4. Смородин, В. С. Система управления надежностью оборудования вероятностных технологических процессов опасного производства / В. С. Смородин // Проблеми програмування. – 2007. – № 3. – С. 107–123.
5. Smorodin, V. Control of a technological cycle of production process based on a neuro-controller model / V. Smorodin, V. Prokhorenko // Open semantic technologies for intelligent systems. – 2019. – Is. 3. – P. 251–256.
6. Smorodin, V. Software-technological complex for adaptive control of a production cycle of robotic manufacturing / V. Smorodin, V. Prokhorenko // Open semantic technologies for intelligent systems. – 2022. – Is. 6. – P. 401–404.
7. Smorodin, V. Adaptive control of robotic production systems / V. Smorodin, V. Prokhorenko // Open semantic technologies for intelligent systems. – 2020. – Is.4. – P. 161–166.

УДК 512.542

О центре разрешимого графа некоторых простых неабелевых групп лиева типа

П.В. Бычков¹, С.Ф. Каморников^{1*}, В.Н. Тютянов^{2*}

Разрешимым графом, соответствующим конечной группе G , называется простой граф, вершины которого являются простыми делителями порядка группы G , и два различных простых числа p и q соединены ребром тогда и только тогда, когда в группе G существует разрешимая подгруппа, порядок которой делится на pq . В статье мы изучаем центр разрешимого графа некоторых простых неабелевых групп лиева типа.

Ключевые слова: конечная группа, неабелева простая группа, разрешимый граф группы, центр графа.

The solvable graph associated with a finite group G is a simple graph whose vertices are the prime divisors of $|G|$ and two distinct primes p and q are joined by an edge if and only if there exists a solvable subgroup of G whose order is divisible by pq . In the article, we study the center of soluble graph of some simple groups of Lie type.

Keywords: finite group, non-abelian simple group, solvable graph of a group, center of a graph.

Введение. Все рассматриваемые в работе группы являются конечными. Используются стандартные определения и обозначения теории групп, которые могут быть найдены в [1] и [2].

Разрешимым графом, соответствующим группе G , называется такой простой граф $\Gamma_{sol}(G)$, вершины которого являются простыми делителями порядка группы G (т. е. $V(\Gamma_{sol}(G)) = \pi(G)$), и два различных простых числа p и q соединены ребром (т. е. $(p, q) \in E(\Gamma_{sol}(G))$) тогда и только тогда, когда в группе G существует разрешимая подгруппа, порядок которой делится на pq .

Понятие графа разрешимости введено в работе [3] как обобщение графа Грюнберга-Кегеля. Очевидно, граф Грюнберга-Кегеля $GK(G)$ группы G является подграфом графа $\Gamma_{sol}(G)$, но при этом граф $\Gamma_{sol}(G)$ простой группы G всегда связан [3]. Как следует из [4], граф разрешимости полезен для изучения структуры конечной группы и получения критериев ее непростоты.

Вершина графа Γ называется *центральной*, если она смежна со всеми другими вершинами Γ . *Центр* графа Γ – это множество всех его центральных вершин (центр графа Γ мы обозначаем $Z(\Gamma)$). Напомним, что простой неориентированный граф, в котором каждая пара различных вершин смежна, называется *полным* или *кликой*. Понятно, что граф Γ является полным тогда и только тогда, когда $Z(\Gamma) = V(\Gamma)$.

Очевидно, разрешимый граф разрешимой группы является кликой. Что касается простых неабелевых групп, то их центр может быть пустым. Например, в [5, теорема 2] для спорадических групп показано, что:

1) $Z(\Gamma_{sol}(G)) = \emptyset$ для любой группы

$$G \in \{M_{11}, M_{12}, M_{22}, M_{23}, M_{24}, J_3, HS, M^cL, O'N, HN, Co_3, Co_2, BM, M\};$$

2) $Z(\Gamma_{sol}(G)) = \{2\}$ для любой группы

*Исследования второго и третьего авторов выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Российского научного фонда (проект Ф23РНФ–237).

$$G \in \{J_1, J_4, Ly, He, Co_1, Suz, Ru, Fi_{22}, Fi_{23}, Fi'_{24}\};$$

3) $Z(\Gamma_{sol}(G)) = \{2, 3\}$ для $G \in \{J_2, Th\}$.

Кроме того, в [5, теорема 1] описаны центры разрешимых графов всех простых исключительных групп лиева типа:

1) если $G \cong Sz(q)$, то $Z(\Gamma_{sol}(G)) = \{2\}$;

2) если $G \cong {}^2G_2(q)$, то $Z(\Gamma_{sol}(G)) = \{2; 3\}$;

3) если $G \cong {}^3D_4(q)$, то $Z(\Gamma_{sol}(G)) = \{2\}$;

4) если $G \cong {}^2F_4(q)'$, где $q \geq 2$, то $Z(\Gamma_{sol}(G)) = \{2; 3\}$;

5) если $G \cong G_2(q)$, то $Z(\Gamma_{sol}(G)) = \{2; 3\}$;

6) если $G \cong F_4(q)$, то $Z(\Gamma_{sol}(G)) = \{2\}$;

7) если $G \cong E_6(q)$, то $Z(\Gamma_{sol}(G)) = \emptyset$ для $q = 3t + 1$, где $(t, 3) = 1$, и $Z(\Gamma_{sol}(G)) = \{3\}$ в остальных случаях;

8) если $G \cong {}^2E_6(q)$, то $Z(\Gamma_{sol}(G)) = \emptyset$ для $q = 3t - 1$, где $(t, 3) = 1$, и $Z(\Gamma_{sol}(G)) = \{3\}$ в остальных случаях;

9) если $G \cong E_7(q)$ или $G \cong E_8(q)$, то $Z(\Gamma_{sol}(G)) = \{2\}$.

Как отмечено в [5], порядки центров графов разрешимости знакопеременных групп не ограничены в совокупности.

В связи с отмеченным Л.С. Казариным в [6] под номером 7 была сформулирована следующая задача: описать простые группы G лиева типа, для которых центр разрешимого графа не является пустым. В данной работе эта задача решается в случае, когда $G \in \{PSL_2(q), PSL_3(q), PSU_3(q)\}$.

Наша главная цель – доказательство следующих теорем:

Теорема 1. Пусть $G \cong PSL_2(q)$, где $q = p^n \geq 4$ для некоторого простого числа p . Тогда $Z(\Gamma_{sol}(G)) \neq \emptyset$ за исключением случаев, когда одновременно выполняются условия:

a) $p \geq 7$;

b) $(q-1)/2$ и n – нечетные числа;

c) q не является простым числом Мерсенна.

Теорема 2. Пусть $G \cong PSL_3(q)$, где $q = p^n \geq 2$ для некоторого простого числа p . Тогда $Z(\Gamma_{sol}(G)) \neq \emptyset$ за исключением случаев, когда одновременно выполняются условия:

a) $q = 3t + 1$, где $t \geq 1$;

b) $(3, t) = 1$;

c) q не является простым числом Мерсенна.

Теорема 3. Пусть $G \cong PSU_3(q)$, где $q = p^n \geq 2$ для некоторого простого числа p . Тогда $Z(\Gamma_{sol}(G)) \neq \emptyset$ за исключением случаев, когда одновременно выполняются условия:

a) $q = 3t + 1$, где $t \geq 1$;

b) $(3, t) = 1$.

Доказательство теоремы 1. Описание подгрупп группы $PSL_2(q)$ содержится в известной теореме Диксона в [7, теорема II.8.27]. В дальнейшем будем опираться на нее без дополнительных ссылок.

Отметим, что

$$|G| = \frac{1}{(2, q-1)} q(q^2 - 1) = \frac{1}{(2, q-1)} q(q-1)(q+1).$$

Пусть $p = 2$. Группа G содержит две диэдральные подгруппы $D_{2(q-1)}$ и $D_{2(q+1)}$. Поэтому вершина 2 графа $\Gamma_{sol}(G)$ является смежной со всеми вершинами из множества $\pi(q^2 - 1) \setminus \{2\}$. Так как $q = 2^n$, то очевидно, что $2 \in Z(\Gamma_{sol}(G))$, т. е. $Z(\Gamma_{sol}(G)) \neq \emptyset$.

Пусть $p = 3$. Группа G содержит две диэдральные подгруппы четных порядков $q-1$ и $q+1$. Следовательно, вершина 2 графа $\Gamma_{sol}(G)$ является смежной со всеми вершинами из множества $\pi(q^2-1) \setminus \{2\}$. Поскольку группа G содержит знакопеременную подгруппу A_4 , то вершина 2 является смежной с вершиной 3. Таким образом, $2 \in Z(\Gamma_{sol}(G))$ и, следовательно, $Z(\Gamma_{sol}(G)) \neq \emptyset$.

Пусть теперь $p = 5$. Тогда группа G содержит знакопеременную подгруппу A_5 , имеющую диэдр порядка 10. Далее, как и в случае $p = 3$, показывается, что $2 \in Z(\Gamma_{sol}(G))$, а значит, $Z(\Gamma_{sol}(G)) \neq \emptyset$.

Таким образом, будем считать, что $p \geq 7$. В этом случае группа G содержит две диэдральные подгруппы четных порядков $q-1$ и $q+1$, а также подгруппу Фробениуса типа $q: \frac{q-1}{2}$. Поэтому если $q \equiv 1 \pmod{4}$, то $2 \in Z(\Gamma_{sol}(G))$, а значит, $Z(\Gamma_{sol}(G)) \neq \emptyset$.

Следовательно, $(q-1)/2$ – нечетное число. Если $n = 2k$, где $k \geq 1$, то группа G содержит подгруппу $PSL_2(p^k) \cdot 2$, а потому граф $\Gamma_{sol}(G)$ имеет ребро $\{2, p\}$. Отсюда получаем, что $2 \in Z(\Gamma_{sol}(G))$ и $Z(\Gamma_{sol}(G)) \neq \emptyset$.

Предположим, что n – нечетное число. Отметим, что $(q-1, q+1) = 2$ и вершина p не смежна ни с одной из вершин, принадлежащих множеству $\pi(q+1) \setminus \{2\}$. Поэтому в $Z(\Gamma_{sol}(G))$ могут содержаться только вершины из множества $\pi((q-1)/2)$. Отсюда следует, что $Z(\Gamma_{sol}(G)) \neq \emptyset$ только в случае, когда $q+1$ является степенью числа 2 и, следовательно, q – простое число Мерсенна.

Теорема доказана.

Доказательство теоремы 2. В [8, таблица 8.3, таблица 8.4] приведен список максимальных подгрупп группы $PSL_3(q)$. При доказательстве теоремы 2 мы будем использовать этот результат без дополнительных оговорок.

Отметим, что

$$|G| = \frac{1}{d} q^3 (q^2 - 1)(q^3 - 1) = \frac{1}{d} q^3 (q-1)^2 (q+1)(q^2 + q + 1),$$

где $d = (3, q-1)$. Последовательно рассмотрим случаи $q = 3^n$, $q = 3t-1$ и $q = 3t+1$.

(а) $q = 3^n$. Группа G содержит максимальную подгруппу $(q^2 + q + 1):3$. Поэтому вершина 3 графа $\Gamma_{sol}(G)$ является смежной со всеми вершинами, принадлежащими множеству $\pi(q^2 + q + 1)$. Поскольку параболическая подгруппа группы G имеет вид $P = q^3 : GL_2(q)$, то вершина 3 является смежной со всеми вершинами, принадлежащими множеству $\pi(q^2 - 1)$. Отсюда и из представленного выше разложения порядка группы G заключаем, что вершина 3 принадлежит центру разрешимого графа группы G , а значит, $Z(\Gamma_{sol}(G)) \neq \emptyset$.

(b) $q+1 = 3t$. Группа G содержит максимальную подгруппу $(q^2 + q + 1):3$. Поэтому вершина 3 графа $\Gamma_{sol}(G)$ является смежной со всеми вершинами, принадлежащими множеству $\pi(q^2 + q + 1)$. Ясно, что вершина 3 смежна со всеми вершинами, принадлежащими множеству $\pi(q+1) \setminus \{3\}$. При $q \geq 5$ группа G содержит максимальную подгруппу $(q-1)^2 : S_3$ и вершина 3 является смежной со всеми вершинами, принадлежащими множеству $\pi(q-1)$. Поэтому $3 \in Z(\Gamma_{sol}(G))$. При $q = 2$ имеем, что $G \cong SL_3(2) \cong PSL_2(7)$. В этом случае по теореме 1 $3 \in Z(\Gamma_{sol}(G))$.

(с) $q-1 = 3t$. Ясно, что вершина 3 смежна со всеми вершинами, принадлежащими множеству $\pi(q-1) \setminus \{3\}$. Кроме того, как и в пункте (а) показывается, что вершина 3 графа $\Gamma_{sol}(G)$

является смежной со всеми вершинами, принадлежащими множеству $\pi(q^2 + q + 1)$. Если $(3, t) = 3$, то, так как класс Ашбаха C_1 для группы $SL_3(q)$ содержит параболическую подгруппу $[q^3]:GL_2(q)$, получаем, что вершина 3 смежна в графе $\Gamma_{sol}(G)$ со всеми вершинами из множества $\pi(q + 1)$. Таким образом, $3 \in Z(\Gamma_{sol}(G))$. Кроме того, если q – простое число Мерсенна, то так как $q + 1$ является степенью числа 2, то вершина 3 смежна с вершиной 2 и $3 \in Z(\Gamma_{sol}(G))$.

Далее будем считать, что $(3, t) = 1$ и q не является простым числом Мерсенна. Покажем, что вершина 3 не смежна хотя бы с одной вершиной из $\pi(q + 1)$ в классе максимальных подгрупп геометрического типа. Для максимальных подгрупп геометрического типа достаточно рассмотреть классы Ашбаха C_5 и C_8 . Классу C_5 в группе $SL_3(q)$ соответствует максимальная подгруппа $SL_3(q_0).((q - 1)/(q_0 - 1), 3)$, где $q = q_0^r$ для некоторого простого числа r . Имеют место равенства: $q + 1 = p^n + 1$ и $q_0 + 1 = p^{n/r} + 1$. Отсюда получаем, что

$$p^{2n} - 1 = (p^n - 1)(p^n + 1) = (q - 1)(q + 1)$$

и

$$p^{2n/r} - 1 = (p^{n/r} - 1)(p^{n/r} + 1) = (q_0 - 1)(q_0 + 1).$$

Поскольку $r \geq 2$, то $2n \geq 4$ и существует число s , которое примитивно по отношению к паре $\{p, 2n\}$ (кроме случая, когда $\{p, 2n\} = \{2, 6\}$); так как для группы $PSL_3(2^6)$ имеем $q - 1 = 2^6 - 1 = 3^2 \cdot 7$, то в этом случае $3 \in Z(\Gamma_{sol}(PSL_3(2^6)))$. Ясно, что s делит $q + 1$. Порядок $SL_3(q_0)$ равен $q_0^3(q_0^2 - 1)(q_0 - 1)$, при этом $q_0^3 - 1 = p^{3n/r} - 1$, где $3n/r < 2n$. Поэтому $(s, |SL_3(q_0)|) = 1$, а значит, в этом случае вершина 3 не является смежной с вершиной $s \in \pi(q + 1)$.

Рассмотрим класс C_8 . В группе $SL_3(q)$ этому классу соответствуют две максимальные подгруппы $SO_3(q)$ и $(q_0 - 1, 3) \times SU_3(q_0)$. Первый случай тривиален в силу изоморфизма $\Omega_3(q) \cong PSL_2(q)$. Второй случай рассматривается так же, как и для класса C_5 (достаточно заметить, что $q_0^3 + 1 = p^{3n/r} + 1 = p^k + 1$, где $k < 2n$).

Если максимальная подгруппа в G содержится в классе $\mathfrak{F}$, то, так как число 3 входит в каноническое разложение порядка группы G в первой степени, имеем, что максимальная подгруппа в G из $\mathfrak{F}$ изоморфна $PSL_2(7)$. Поскольку $3 \in Z(\Gamma_{sol}(PSL_2(7)))$, то только в случае $q + 1 = 2^s \cdot 7^l$ вершина 3 принадлежит $Z(\Gamma_{sol}(G))$. В этом случае должно выполняться условие $q = p \equiv 1, 2, 4 \pmod{7}$, $q \neq 2$. Однако $p \equiv -1 \pmod{7}$.

Теорема доказана.

Доказательство теоремы 3. В [8, таблица 8.5, таблица 8.6] приведен список максимальных подгрупп группы $PSU_3(q)$. При доказательстве теоремы 2 мы будем использовать этот результат без дополнительных оговорок.

Отметим, что

$$|G| = \frac{1}{d} q^3 (q^2 - 1)(q^3 + 1) = \frac{1}{d} q^3 (q - 1)(q + 1)^2 (q^2 - q + 1),$$

где $d = (3, q + 1)$. Последовательно рассмотрим случаи $q = 3^n$, $q = 3t - 1$ и $q = 3t + 1$.

(а) $q = 3^n$. Группа G содержит максимальную подгруппу $(q^2 - q + 1):3$. Поэтому вершина 3 графа $\Gamma_{sol}(G)$ является смежной со всеми вершинами, принадлежащими множеству $\pi(q^2 - q + 1)$. Поскольку подгруппа Бореля группы G имеет вид $B = q^3:(q^2 - 1)$, то вершина 3 является смежной со всеми вершинами из множества $\pi(q^2 - 1)$. Отсюда и из представленного выше разложения порядка группы G заключаем, что $3 \in Z(\Gamma_{sol}(G))$. Следовательно, $Z(\Gamma_{sol}(G)) \neq \emptyset$.

(b) $q-1=3t$. Как и в случае (a), вершина 3 графа $\Gamma_{sol}(G)$ смежна со всеми вершинами из множества $\pi(q^2-q+1)$. Так как борелевская подгруппа группы G имеет вид $B=q^3:(q^2-1)$, то вершина 3 является смежной со всеми вершинами, принадлежащими множеству $\pi(q^2-1)\setminus\{3\}\cup\{p\}$ и, следовательно, $3\in Z(\Gamma_{sol}(G))$.

(c) $q+1=3t$. Тогда снова, как и в случае (a), вершина 3 графа $\Gamma_{sol}(G)$ является смежной со всеми вершинами, принадлежащими множеству $\pi(q^2-q+1)$. Если 9 делит $q+1$, то, поскольку порядок подгруппы Бореля группы G равен $\frac{1}{3}q^3(q^2-1)$, заключаем, что $3\in Z(\Gamma_{sol}(G))$. Поэтому $(3,t)=1$. Группа G содержит максимальную подгруппу $SU_3(q_0)((q+1)/(q_0+1),3)$, где $q=q_0^r$ для нечетного простого числа r . Для всех других максимальных подгрупп геометрического типа вершина 3 не является смежной с вершиной p . Если же $((q+1)/(q_0+1),3)=3$, то вершина 3 является смежной с вершиной p . Так как $q-1=p^n-1$, $q_0-1=p^{n/r}-1$ для некоторого простого числа r и $n\geq 3$, то существует простое число s , примитивное по отношению к паре $\{p,n\}$, за исключением случая $\{p,n\}=\{2,6\}$. В первом случае s не делит q_0-1 , а поэтому вершина s не является смежной с вершиной 3. Во втором случае $G\cong PSU_3(2^6)$. Поскольку $2^6+1=65$, условие (c) не выполнено, и данный случай является невозможным.

Подгруппы, не являющиеся подгруппами геометрического типа, легко исключаются как и при доказательстве теоремы 2.

Теорема доказана.

Замечание. Примеры групп $PSL_2(11)$, $PSL_3(4)$, $PSU_3(5)$ показывают, что для каждой теоремы имеются группы, у которых центр графа является пустым множеством. Этот факт легко следует из [9].

Литература

1. Doerk, K. Finite soluble groups / K. Doerk, T. Hawkes. – Berlin–New York : Walter de Gruyter, 1992. – 891 p.
2. Горенштейн, Д. Конечные простые группы. Введение в их классификацию / Д. Горенштейн. – М. : Мир, 1985. – 352 с.
3. Abe, S. A generalization of prime graphs of finite groups / S. Abe, N. Iiyori // Hokkaido Math. J. – 2000. – V. 29, № 2. – P. 391–407.
4. Amberg, B. Criteria for the solubility and non-simplicity of finite groups / B. Amberg, A. Carocca, L. S. Kazarin // J. Algebra. – 2005. – V. 285. – P. 58–72.
5. Kazarin, L. S. On centers of soluble graphs / L. S. Kazarin, V. N. Tyutyaynov // Сиб. электрон. матем. изв. – 2021. – Т. 18, № 2. – С. 1517–1530.
6. Маслова, Н. В. Открытые проблемы, сформулированные на XII школе-конференции по теории групп, посвященной 85-летию В.А. Белоногова / Н. В. Маслова, И. Н. Белоусов, Н. А. Минигулов // Тр. ИММ УрО РАН. – 2020. – Т. 26, № 3. – С. 275–285.
7. Huppert, B. Endliche Gruppen I / B. Huppert. – Berlin : Springer-Verlag, 1967. – 793 p.
8. Bray, J. N. The maximal subgroups of the low-dimensional finite classical groups / J. N. Bray, D. F. Holt, C. M. Roney-Dougall. – Cambridge : Cambridge University Press, 2013. – 452 p.
9. Conway, J. H. Atlas of finite groups / J. H. Conway, R. T. Curtis, S. P. Norton, R. A. Parker, R. A. Wilson. – London : Clarendon, 1985. – 252 p.

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²Гомельский филиал Международного университета «МИТСО»

Поступила в редакцию 04.11.2022

Конечные группы с пермутируемыми и с-достижимыми подгруппами

В.С. МОНАХОВ, И.Л. СОХОР

Исследуются группы с пермутируемыми и с-достижимыми подгруппами. В частности, получены новые признаки сверхразрешимости, w-сверхразрешимости и v-сверхразрешимости для групп с достижимыми примарными подгруппами. Описано строение групп с с-достижимыми системами подгруппами (силовскими подгруппами или их нормализаторами). Классический результат Бэра о сверхразрешимости факторизуемой группы с нормальными сверхразрешимыми подгруппами распространен на случай, когда сомножители с-достижимы.

Ключевые слова: конечная группа, пермутизатор, достижимая подгруппа.

The groups with permutable and c-reachable subgroups are investigated. In particular, the new criteria of supersolubility, w-supersolubility and v-supersolubility for groups with reachable primary subgroups are obtained. The structure of groups with c-reachable systems of subgroups (Sylow subgroups or their normalizers) is described. The classical Baer result on the supersolubility of a factorised group with normal supersoluble subgroups is extended to the case when the factors are c-reachable.

Keywords: finite group, permutizer, reachable subgroup.

К 80-летию Виктора Даниловича Мазурова!

Введение. Все рассматриваемые группы предполагаются конечными. Естественным расширением понятия нормализатора является понятие пермутизатора. Напомним [1, с. 26], пермутизатором $P_G(H)$ подгруппы H в группе G называется подгруппа, порожденная всеми циклическими подгруппами группы G , перестановочными с H , т. е.

$$P_G(H) = \langle x \in G \mid \langle x \rangle H = H \langle x \rangle \rangle.$$

Бейдлеман и Робинсон [2] описали группы, в которых каждая собственная подгруппа отлична от своего пермутизатора, т. е. для каждой собственной подгруппы H существует элемент $g \in G \setminus H$ такой, что $H \langle g \rangle = \langle g \rangle H$. Баллестер-Болинше, Косси и Цяо [3] заметили, что самостоятельный интерес представляют группы, в которых только максимальные подгруппы отличны от своих пермутизаторов, т. е. когда в группе G для каждой максимальной подгруппы M существует элемент $g \in G$ такой, что $G = M \langle g \rangle$. А.Ф. Васильев, В.А. Васильев, Т.И. Васильева [4] исследовали группы, в которых пермутизаторы холловых (в частности, силовских) подгрупп совпадают со всей группой. Следуя [4], подгруппу H группы G будем называть *пермутируемой* в G , если $P_G(H) = G$, и *сильно пермутируемой* в G , если $P_K(H) = K$ для каждой подгруппы K группы G такой, что $H \leq K \leq G$.

Пусть $\mathbb{P}$ – множество всех простых чисел и H – подгруппа группы G . Напомним [5], подгруппу H группы G называют $\mathbb{P}$ -субнормальной в G , если $H = G$ или существует цепочка подгрупп

$$H = H_0 \leq H_1 \leq \dots \leq H_i \leq H_{i+1} \leq \dots \leq H_{n-1} \leq H_n = G \quad (1)$$

такая, что $|H_{i+1} : H_i| \in \mathbb{P}$ для каждого i . Группу, в которой каждая примарная (примарная циклическая) подгруппа $\mathbb{P}$ -субнормальна, называют w-сверхразрешимой (v-сверхразрешимой соответственно). Свойства таких групп известны [5]–[8].

В [4] доказано, что каждая $\mathbb{P}$ -субнормальная холлова подгруппа разрешимой группы сильно пермутируема. Мы доказываем, что верно и обратное утверждение. Таким образом, в разрешимых группах для холловых подгрупп условия $\mathbb{P}$ -субнормальности и сильной пермутируемости эквивалентны, см. предложение 1.1. Кроме того, получены новые признаки сверхразрешимости, w-сверхразрешимости и v-сверхразрешимости для групп с $\mathbb{P}$ -субнормальными или пермутируемыми примарными подгруппами.

Подгруппу H группы G будем называть *с-достижимой* в G , если существует цепочка подгрупп (1) и элементы $g_i \in H_{i+1} \setminus H_i$ такие, что $H_{i+1} = H_i \langle g_i \rangle$ для каждого i .

В контексте введенного понятия группы, рассмотренные Бейдлеманом и Робинсоном, являются группами, в которых каждая подгруппа с-достижима. Понятно, что $\mathbb{P}$ -субнормальная подгруппа с-достижима. Для разрешимых групп определены случаи, когда верно и обратное, см. следствие 2.1.1. Установлено строение разрешимых групп, в которых каждая силовская подгруппа с-достижима (теореме 2.1), а также групп с с-достижимыми нормализаторами силовских подгрупп (теорема 2.2). Кроме того, получено обобщение классического результата Бэра [9, с. 186] о группах, факторизуемых сверхразрешимыми нормальными подгруппами, см. теорему 2.3.

1. Группы с пермутируемыми подгруппами. В силу [4, лемма 3.2] и определений справедлива

Лемма 1.1. Пусть G – группа, $A \leq B \leq G$ и N – нормальная подгруппа группы G .

(1) Если A (сильно) пермутируема в B , то AN (сильно) пермутируема в BN и AN/N (сильно) пермутируема в BN/N .

(2) Если $N \leq A$, то A (сильно) пермутируема в B тогда и только тогда, когда A/N (сильно) пермутируема в B/N .

(3) Если A сильно пермутируема в B и $A \leq H$, то A сильно пермутируема в H .

Лемма 1.2. Пусть $r = \max \pi(G)$ и R – силовская r -подгруппа группы G . Тогда $N_G(R) = P_G(R)$. В частности, если R пермутируема в G , то R нормальна в G .

Доказательство. Пусть $x \in G$ и $R \langle x \rangle = \langle x \rangle R$. Понятно, что $\langle x \rangle = \langle x_1 \rangle \times \langle x_2 \rangle$, где $\langle x_1 \rangle$ – силовская r -подгруппа и $\langle x_2 \rangle$ – r' -холлова подгруппа в $\langle x \rangle$. В силу [10, VI.4.7], $R = R \langle x_1 \rangle$, поэтому $R \langle x \rangle = R \langle x_2 \rangle$. Таким образом, все силовские r' -подгруппы в $R \langle x \rangle$ циклические. Поскольку $r = \max \pi(R \langle x \rangle)$, подгруппа R нормальна в $R \langle x \rangle$ в силу [10, IV.2.7] и $\langle x \rangle \leq N_G(R)$. Поскольку $P_G(R)$ порождается элементами x такими, что $R \langle x \rangle = \langle x \rangle R$, то $P_G(R) = N_G(R)$.

Лемма 1.3. Пусть H – p -группа экспоненты p и $x \notin Z(H)$. Тогда $N_H(\langle x \rangle) = P_H(\langle x \rangle)$ и $\langle x \rangle$ не пермутируема в H .

Доказательство. Понятно, что $N_H(\langle x \rangle) \leq P_H(\langle x \rangle)$. Выберем $y \in H \setminus \langle x \rangle$ такой, что $\langle x \rangle \langle y \rangle = \langle y \rangle \langle x \rangle$. Так как H является p -группой экспоненты p , то $|\langle x \rangle \langle y \rangle| = p^2$. Следовательно, H абелева и $\langle x \rangle \langle y \rangle = \langle x \rangle \times \langle y \rangle$, поэтому $y \in N_H(\langle x \rangle)$ и $N_H(\langle x \rangle) = P_H(\langle x \rangle)$. Поскольку $x \notin Z(H)$, то $H \neq N_H(\langle x \rangle) = P_H(\langle x \rangle)$ и $\langle x \rangle$ не пермутируема в H .

Предложение 1.1. В разрешимой группе холлова подгруппа $\mathbb{P}$ -субнормальна тогда и только тогда, когда она сильно пермутируема.

Доказательство. Если в разрешимой группе G холлова подгруппа H $\mathbb{P}$ -субнормальна, в силу [4, 3.8] подгруппа H сильно пермутируема в G .

Обратно, пусть подгруппа H – сильно пермутируемая холлова подгруппа разрешимой группы G . Используя индукцию по порядку группы, докажем, что H $\mathbb{P}$ -субнормальна в G . Пусть H содержится в максимальной подгруппе M группы G . По лемме 1.1 (3) подгруппа H сильно пермутируема в M и по индукции подгруппа H $\mathbb{P}$ -субнормальна в M . Если $|G:M| \in \mathbb{P}$, то H $\mathbb{P}$ -субнормальна в G ввиду [8, лемма 3(3)]. Поэтому далее будем считать, что $|G:M| \notin \mathbb{P}$, в частности, подгруппа M не нормальна в G . В силу леммы 1.1 (1) факторгруппа G/M_G содержит сильно пермутируемую холлову подгруппу HM_G/M_G . Так как $HM_G \leq M$, подгруппа H $\mathbb{P}$ -субнормальна в HM_G по индукции. Если $M_G \neq 1$, то HM_G/M_G $\mathbb{P}$ -субнормальна в G/M_G по индукции. В силу [8, лемма 3(2)] подгруппа HM_G $\mathbb{P}$ -субнормальна в G и H $\mathbb{P}$ -субнормальна в G ввиду [8, лемма 3(3)]. Поэтому будем считать, что $M_G = 1$. Так как группа G разрешима, то $G = N \rtimes M$, N – единственная минимальная нормальная подгруппа в G и $N = F(G) = C_G(N) = O_p(G)$. Пусть $HN < G$. По индукции,

HN/N $\mathbb{P}$ -субнормальна в G/N и H $\mathbb{P}$ -субнормальна в G . Пусть теперь $H = M$ – холлова подгруппа. По условию существует элемент $x \in G \setminus H$ такой, что $\langle x \rangle H = H \langle x \rangle = G$. Пусть $\langle x \rangle = \langle x_1 \rangle \times \langle x_2 \rangle$, где $\langle x_1 \rangle$ – p -подгруппа $\langle x_2 \rangle$ – p' -подгруппа. Так как N – нормальная силовская p -подгруппа группы G , то $\langle x_1 \rangle \leq N$ и $|\langle x_1 \rangle| = p$. В силу [10, VI.4.6] подгруппа $H = \langle x_2 \rangle H$. Таким образом, $G = \langle x \rangle H = \langle x_1 \rangle H$ и $|G:H| = p$.

Следствие 1.1.1. Пусть G – группа. Тогда следующие утверждения эквивалентны.

- (1) Группа G сверхразрешима.
- (2) В группе G каждая холлова подгруппа $\mathbb{P}$ -субнормальна или сильно пермутируема.
- (3) В группе G каждая холлова подгруппа $\mathbb{P}$ -субнормальна или пермутируема.

Следствие 1.1.2. Если в группе G каждая силовская подгруппа $\mathbb{P}$ -субнормальна или сильно пермутируема, то группа G w -сверхразрешима. Обратно, если группа G w -сверхразрешима, то каждая силовская подгруппа $\mathbb{P}$ -субнормальна и сильно пермутируема в G .

Если в разрешимых группах условие $\mathbb{P}$ -субнормальности и сильной пермутируемости эквивалентны для холловых подгрупп, то в неразрешимых группах это вообще говоря не верно.

Пример 1.1. В группе $L_2(8)$ $\{2, 7\}$ -холлова подгруппа сильно пермутируема, но не $\mathbb{P}$ -субнормальна. В группе $L_2(5)$ силовская 2-подгруппа $\mathbb{P}$ -субнормальна, но не пермутируема.

В [11] доказана r -разрешимость группы, в которой силовская r -подгруппа $\mathbb{P}$ -субнормальна для нечетного r . Опираясь на этот результат, можно показать, что в *простой неабелевой группе силовская r -подгруппа $\mathbb{P}$ -субнормальна и сильно пермутируема тогда и только тогда, когда $r = 2$ и $G \cong L_2(7)$.*

Пусть $\mathfrak{F}$ – класс групп. Группа G называется минимальной не $\mathfrak{F}$ -группой, если $G \notin \mathfrak{F}$, но каждая ее собственная подгруппа принадлежит $\mathfrak{F}$, [12, глава VI]. Минимальные не $\mathfrak{N}$ -группы также называют группами Шмидта, их свойства хорошо известны [13], см. также [12, VI.26.2]. Здесь и далее $\mathfrak{N}$ – формация всех нильпотентных групп.

Перечислим известные свойства групп Шмидта с точки зрения пермутируемости.

Лемма 1.4.

(1) В сверхразрешимой группе Шмидта каждая подгруппа сильно пермутируема.

(2) Пусть $G = P \rtimes Q$ – несверхразрешимая группа Шмидта. Тогда

(2.1) Q не пермутируема;

(2.2) Если $H \leq P$ and $P_G(H) = G$, то либо $H = P$, либо $H \leq \Phi(G)$;

(2.3) Каждая пермутируемая примарная подгруппа нормальна в группе G , а значит, сильно пермутируема в G .

(3) В группе Шмидта G каждая подгруппа простого порядка и каждая циклическая подгруппа порядка 4 сильно пермутируема тогда и только тогда, когда G сверхразрешима.

Теорема 1.1. Если в группе каждая примарная циклическая подгруппа сильно пермутируема, то группа сверхразрешима.

Доказательство. Воспользуемся индукцией по порядку группы. Ввиду леммы 1.1 (3) и индукции все собственные подгруппы группы G сверхразрешимы. Поэтому $G = P \rtimes S$ – минимальная несверхразрешимая группа, $P = G^{\mathfrak{U}}$. Здесь и далее $\mathfrak{U}$ – формация всех сверхразрешимых групп. По лемме 1.4 (3) группа G не является группой Шмидта, поэтому G имеет силовскую башню сверхразрешимого типа и P – силовская p -подгруппа группы G для $p = \max \pi(G)$. В частности, $p > 2$ и все неединичные элементы в P имеют порядок p в силу [6, лемма 2.1]. Из леммы 1.3 получаем, что P – элементарная абелева p -подгруппа, а в силу [6, лемма 2.1] подгруппа P – минимальная нормальная в G подгруппа.

Пусть N – неединичная нормальная подгруппа группы G . Несложно проверить, что G/N удовлетворяет условиям теоремы, поэтому по индукции G/N сверхразрешима и $\Phi(G) = 1$, $O_{p'}(G) = K_G = 1$.

Пусть $A \leq P$, $|A| = p$, и $g \in G \setminus N_G(A)$ такой, что $\langle g \rangle A = A \langle g \rangle$ и $|g| = p^\alpha t$, где p не делит t . Тогда $g^t = b \in P$, $g^{p^\alpha} = x \in K^h = S$, $h \in P$, $\langle g \rangle = \langle b \rangle \times \langle x \rangle$. Если $x = 1$, то $g = b \in P \leq N_G(A)$, противоречие. Если $b = 1$, то $g = x$ и $\langle g \rangle A = A \rtimes \langle g \rangle$, так как G p -замкнута. Значит, $g \in N_G(A)$, противоречие. Таким образом, $b \neq 1$, $x \neq 1$, $S^b \neq S$, так как $b \in P$, $x^b = x \in S \cap S^b = D \neq 1$.

В силу свойств минимальных несверхразрешимых подгрупп [12, теорема 26.5] либо S неабелева порядка q^3 и экспоненты q , либо S – циклическая q -группа, либо S – q -группа с циклической подгруппой индекса q , либо S – сверхразрешимая группа Шмидта. Рассматривая каждый из этих случаев в отдельности, приходим к заключению теоремы, что группа G сверхразрешима.

Следствие 1.1.1. *Если в группе G каждая примарная циклическая подгруппа $\mathbb{P}$ -субнормальна или сильно пермутируема, то группа G ψ -сверхразрешима. Обратно, если группа G ψ -сверхразрешима, то каждая примарная циклическая подгруппа $\mathbb{P}$ -субнормальна и сильно пермутируема в G .*

2. Группы с s -достижимыми подгруппами. Используя определение, несложно проверить, что справедлива

Лемма 2.1. *Пусть H – s -достижимая подгруппа группы G и $N \triangleleft G$. Тогда справедливы следующие утверждения:*

- (1) подгруппа H^g s -достижима в G для каждого $g \in G$;
- (2) подгруппа HN s -достижима в G ;
- (3) подгруппа HN/N s -достижима в G/N ;
- (4) пусть $A \leq B \leq G$; если A s -достижима в B , а B s -достижима в G , то A s -достижима в G .

Предложение 2.1. *В разрешимой группе G подгруппа H s -достижима тогда и только тогда, когда существует цепочка подгрупп*

$$H = M_0 \leq M_1 \leq \dots \leq M_i \leq M_{i+1} \leq \dots \leq M_{n-1} \leq M_n = G \quad (2)$$

такая, что либо $|M_{i+1} : M_i| = 4$ и $M_{i+1} / (M_i)_{M_{i+1}} \cong S_4$, либо $|M_{i+1} : M_i| \in \mathbb{P}$ для каждого i .

Доказательство. Пусть G – разрешимая группа и H – s -достижимая в G подгруппа. Тогда существует цепочка подгрупп (1) и элементы $g_i \in H_{i+1} \setminus H_i$ такие, что $H_{i+1} = H_i \langle g_i \rangle$ для каждого i . Выберем в H_{i+1} максимальную подгруппу U_i , содержащую H_i . Тогда $U_i = H_i(U_i \cap \langle g_i \rangle)$ и $H_{i+1} = U_i \langle g_i \rangle$. Так как группа G разрешима, то $|H_{i+1} : U_i| = p_i^{\alpha_i}$ для некоторого $p_i \in \pi(H_{i+1})$. Если P_i – силовская p_i -подгруппа из $\langle g_i \rangle$, то $H_{i+1} = U_i P_i$. Поскольку все силовские подгруппы в $U_i \cap \langle g_i \rangle$ циклические, то подгруппа H_i s -достижима в U_i . Повторяя такое уплотнение, получим цепочку (2), в которой для каждого i подгруппа M_i максимальна в M_{i+1} и $M_{i+1} = M_i P_i$, где P_i – циклическая p_i -подгруппа. В силу [14, лемма 2.1] для каждого i либо $M_{i+1} / (M_i)_{M_{i+1}} \cong S_4$ и $|M_{i+1} : M_i| = 4$, либо $|M_{i+1} : M_i| \in \mathbb{P}$.

Обратно, пусть существует цепочка (2) такая, что для каждого i либо $M_{i+1} / A_i \cong S_4$ и $|M_{i+1} : M_i| = 4$, либо $|M_{i+1} : M_i| \in \mathbb{P}$. Несложно проверить, что в первом случае M_i s -достижима в M_{i+1} . Пусть $|M_{i+1} : M_i| = p_i \in \mathbb{P}$, P_i – силовская p_i -подгруппа из M_{i+1} и $x_i \in P_i \setminus M_i$. Тогда

$$|M_i \langle x_i \rangle| = |M_i| \cdot |\langle x_i \rangle : M_i \cap \langle x_i \rangle| \geq |M_i| \cdot p_i = |M_{i+1}|.$$

Поэтому $M_{i+1} = M_i \langle x_i \rangle$. Так как это верно для любого i , то подгруппа H s -достижима в G .

Если G – группа, $A \leq B \leq G$ и $A \triangleleft B$, то фактор-группа B/A называется секцией группы

G . Если в группе G нет секций, изоморфных S_4 , то группа G называется S_4 -свободной.

Следствие 2.1.1. В разрешимой группе G с-достижимая подгруппа H $\mathbb{P}$ -субнормальна в каждом из следующих случаев:

- (1) группа G S_4 -свободна;
- (2) 4 не делит $|G:H|$;
- (3) $(|H|, 6) = 1$.

Следствие 2.1.2. Группа G сверхразрешима тогда и только тогда, когда A с-достижима в B для любой пары подгрупп A и B таких, что $A \leq B$.

Лемма 2.2. Пусть $r = \max \pi(G)$ и R – силовская r -подгруппа разрешимой группы G . Если R с-достижима в G и $r > 3$, то R нормальна в G .

Доказательство. Воспользуемся индукцией по порядку группы. В силу предложения 2.1 существует цепочка подгрупп (2) такая, что либо $|M_{i+1}:M_i| = 4$ и $M_{i+1}/(M_i)_{M_{i+1}} \cong S_4$, либо $|M_{i+1}:M_i| \in \mathbb{P}$ для каждого i . Поскольку R с-достижима в M_{n-1} , то по индукции R нормальна в M_{n-1} . Если R не нормальна в G , то $M_{n-1} = N_G(R)$. По теореме Силова $|G:M_{n-1}| \equiv 1 \pmod{r}$. Так как $r = \max \pi(G)$, то $|G:M_{n-1}| \notin \mathbb{P}$. Если $|G:M_{n-1}| = 4$, то $r = 3$, противоречие. Поэтому предположение неверно и R нормальна в G .

Теорема 2.1. Пусть в разрешимой группе G каждая силовская подгруппа с-достижима. Тогда справедливы следующие утверждения.

- (1) В группе G каждая силовская $3'$ -подгруппа $\mathbb{P}$ -субнормальна.
- (2) $\{2, 3\}'$ -холлова подгруппа $G_{\{2,3\}'}$ группы G нормальна в G .
- (3) Холловы подгруппы $G_{2'}$, $G_{3'}$, $G_{\{2,3\}'}$ w -сверхразрешимы.
- (4) Если группа G S_4 -свободна, то группа G w -сверхразрешима.

Доказательство. Пусть в разрешимой группе G каждая силовская подгруппа с-достижима.

(1) Согласно следствию 2.1.1 каждая силовская r -подгруппа $\mathbb{P}$ -субнормальна в G для $r \neq 3$, а значит, $G \in w_3\mathcal{U}$.

(2) Пусть R – силовская r -подгруппа в $H = G_{\{2,3\}'}$ для $r = \max \pi(G)$. Понятно, что если $r \leq 3$, то $H = 1$ и утверждение верно. Пусть $r > 3$. По условию R с-достижима в G , а значит, подгруппа R нормальна в G по лемме 2.2. В силу леммы 2.1 (3) каждая силовская подгруппа с-достижима в G/R . По индукции H/R нормальна в G/R . Отсюда H нормальна в G .

(3) Все силовские подгруппы из $G_{3'}$ и $G_{\{2,3\}'}$ $\mathbb{P}$ -субнормальны в G в силу утверждения (1) и $\mathbb{P}$ -субнормальны в $G_{3'}$ и $G_{\{2,3\}'}$ соответственно в силу [5, лемма 1.4(3)]. Поэтому $G_{3'}$ и $G_{\{2,3\}'}$ w -сверхразрешимы.

Так как $R = G_3$ с-достижима в G , то ввиду предложения 2.1 можно показать, что R $\mathbb{P}$ -субнормальна в некоторой $2'$ -холловой подгруппе $G_{2'}$. В силу [5, лемма 1.4(3)] все силовские в $G_{2'}$ подгруппы $\mathbb{P}$ -субнормальны в $G_{2'}$. Таким образом, $G_{2'}$ w -сверхразрешима.

(4) Если группа G S_4 -свободна, то группа G w -сверхразрешима в силу следствия 2.1.1 (1).

Теорема 2.2. Если в разрешимой группе G нормализатор каждой силовской подгруппы с-достижим, то либо G сверхразрешима, либо G содержит нормальную подгруппу N такую, что $G/N \cong S_4$.

Доказательство. Воспользуемся индукцией по порядку группы. Пусть N – неединичная нормальная в G подгруппа. Несложно показать, что G/N удовлетворяет условиям теоремы, поэтому по индукции либо G/N сверхразрешима, либо G/N содержит нормальную подгруппу K/N такую, что $(G/N)/(K/N) \cong S_4$. В последнем случае теорема справедлива, поскольку $G/K \cong (G/N)/(K/N) \cong S_4$. Поэтому далее будем считать, что G/N сверхразре-

шима для каждой неединичной нормальной в G подгруппы N . Следовательно, группа G примитивна, а значит, $F = F(G)$ – единственная минимальная нормальная подгруппа, $G = F \rtimes H$, H – максимальная подгруппа группы G , $H_G = 1$ и H сверхразрешима. Пусть $q = \max \pi(H)$ и Q – силовская q -подгруппа в H . Поскольку H сверхразрешима, то Q нормальна в H и $N_H(Q) = H$. Поэтому Q является силовской q -подгруппой группы G и по условию H с-достижима в G . В силу предложения 2.1 либо $|G:H| = |F| \in \mathbb{P}$ и группа G сверхразрешима, либо $|G:H| = |F| = 4$ и $G \cong G/H_G \cong S_4$.

Пример 2.1. В группе $G = C_2^4 \rtimes (S_3 \times S_3)$ [15, SmallGroup(576,8654)] каждая силовская подгруппа с-достижима, но группа G не сверхразрешима и не содержит нормальной подгруппы, фактор-группа по которой изоморфна S_4 . Следовательно, для групп с с-достижимыми силовскими подгруппами аналог теоремы 2.2 в общем случае не верен.

Теорема 2.3. Пусть A и B – сверхразрешимые с-достижимые подгруппы группы G такие, что $G = AB$. Тогда $G^{\mathfrak{U}} = (G')^{\mathfrak{N}} \leq [A, B]$. В частности, если коммутант группы G нильпотентен, то группа G сверхразрешима.

Доказательство. Поскольку $\mathfrak{U} \subseteq \mathfrak{N}\mathfrak{A}$, то $(G')^{\mathfrak{N}} \leq G^{\mathfrak{U}}$. В силу [16, лемма 11] $(G')^{\mathfrak{N}} \leq G^{\mathfrak{U}} \leq [A, B]$. Здесь $[A, B] = \langle [a, b] \mid a \in A, b \in B \rangle$ – взаимный коммутант подгрупп A и B .

Пусть $(G')^{\mathfrak{N}} = 1$. Тогда группа G разрешима и в силу предложения 2.1 для подгруппы A существует цепочка подгрупп (2) такая, что для каждого i либо $|M_{i+1}:M_i| = 4$ и $M_{i+1}/(M_i)_{M_{i+1}} \cong S_4$, либо $|M_{i+1}:M_i| \in \mathbb{P}$. Поскольку коммутант группы S_4 не нильпотентен, то случай $M_{i+1}/(M_i)_{M_{i+1}} \cong S_4$ не возможен. Поэтому $|M_{i+1}:M_i| \in \mathbb{P}$ для каждого i и подгруппа A $\mathbb{P}$ -субнормальна в G . Аналогично можно показать, что B $\mathbb{P}$ -субнормальна в G . Таким образом, в силу [16, теорема 3] $G^{\mathfrak{U}} = 1$ и $1 = (G')^{\mathfrak{N}} = G^{\mathfrak{U}}$.

Пусть теперь $(G')^{\mathfrak{N}} \neq 1$. Рассмотрим группу $G/(G')^{\mathfrak{N}} = A(G')^{\mathfrak{N}}/(G')^{\mathfrak{N}} \cdot B(G')^{\mathfrak{N}}/(G')^{\mathfrak{N}}$. По лемме 2.1 (3) подгруппы $A(G')^{\mathfrak{N}}/(G')^{\mathfrak{N}}$ и $B(G')^{\mathfrak{N}}/(G')^{\mathfrak{N}}$ сверхразрешимы и с-достижимы в $G/(G')^{\mathfrak{N}}$ и $((G/(G')^{\mathfrak{N}})')^{\mathfrak{N}} = 1$, следовательно, по доказанному $G/(G')^{\mathfrak{N}} \in \mathfrak{U}$ и $G^{\mathfrak{U}} \leq (G')^{\mathfrak{N}}$.

Следствие 2.3.1. Пусть A и B – абелевы подгруппы группы G и $G = AB$. Если подгруппы A и B с-достижимы в G , то группа G сверхразрешима.

Пример 2.2. В симметрической группе S_4 каждая подгруппа с-достижима. Кроме того, $S_4 = AB$, $A \cong C_3$, $B \cong D_8$, $(S_4)' = [A, B] \cong A_4$, $((S_4)')^{\mathfrak{N}} = (S_4)^{\mathfrak{U}} \cong C_2^2 < A_4$. Поэтому в теореме 2.3 включение $(G')^{\mathfrak{N}} \leq [A, B]$ нельзя заменить равенством.

Литература

1. Weinstein, M. Between Nilpotent and Solvable / M. Weinstein. – Passaic : Polygonal, 1982. – 231 p.
2. Beidleman, J. C. On finite groups satisfying the permutizer condition / J. C. Beidleman, D. J. S. Robinson / J. Algebra. – 1997. – Vol. 191. – P. 686–703.
3. Ballester-Bolinchés, A. A note on finite groups with the maximal permutiser condition / A. Ballester-Bolinchés, J. Cossey, S. Qiao // RACSAM. – 2016. – Vol. 110. – P. 247–250.
4. Васильев, А. Ф. О пермутируемых подгруппах конечных групп / А. Ф. Васильев, В. А. Васильев, Т. И. Васильева, В. Н. Тютянов // Сиб. матем. журн. – 2014. – Т. 55, № 2. – С. 286–295.
5. Васильев, А. Ф. О конечных группах сверхразрешимого типа / А. Ф. Васильев, Т. И. Васильева, В. Н. Тютянов // Сиб. матем. журн. – 2010. – Т. 51, № 6. – С. 1270–1281.
6. Монахов, В. С. Конечные группы с абнормальными и $\mathfrak{U}$ -субнормальными подгруппами / В. С. Монахов // Сиб. матем. журн. – 2016. – Т. 57, № 2. – С. 447–462.
7. Монахов, В. С. О трех формациях над $\mathfrak{U}$ / В. С. Монахов // Матем. заметки. – 2021. – Т. 110, № 3. – С. 358–367.

8. Monakhov, V. S. Finite groups with $\mathbb{P}$ -subnormal subgroups / V. S. Monakhov, V. N. Kniahina // *Ricerche Mat.* – 2013. – Vol. 62. – P. 307–322.
9. Baer, R. Classes of finite groups and their properties / R. Baer // *Illinois J. Math.* – 1957. – Vol. 1. – P. 115–187.
10. Huppert, B. Endliche Gruppen I / B. Huppert. – Berlin ; Heidelberg ; New York : Springer, 1967. – 793 p.
11. Kniahina, V. N. Finite groups with $\mathbb{P}$ -subnormal Sylow subgroup / V. N. Kniahina, V. S. Monakhov // *Ukr. Mat. Zh.* – 2010. – Vol. 72, № 10. – P. 1365–1371.
12. Шеметков, Л. А. Формации конечных групп / Л. А. Шеметков. – М. : Наука, 1978. – 271 с.
13. Монахов, В. С. Конечные группы со сверхразрешимыми подгруппами непримарного индекса / В. С. Монахов // *Бесконечные группы и примыкающие алгебраические структуры : сб. науч. ст.* – Киев : Ин-т матем. АН Украины, 1993. – С. 195–209.
14. Qiao, S. Finite groups with the maximal permutizer condition / S. Qiao, G. Qian, Y. Wang // *J. Algebra Appl.* – 2013. – Vol. 12, № 5. – 1250217-1–1250217-5.
15. A system for computational discrete algebra GAP 4.11.1 [Electronic resource]. – Mode of access : <https://www.gap-system.org>. – Date of access : 25.12.2022.
16. Монахов, В. С. О сверхразрешимом корадикале произведения субнормальных сверхразрешимых подгрупп / В. С. Монахов, И. К. Чирик // *Сиб. матем. журн.* – 2017. – Т. 58, № 2. – С. 353–364.

Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 10.02.2023

Q-полиномиальные графы Шилла с массивами пересечений {42, 30, 12; 1, 6, 28} и {105, 72, 24; 1, 12, 70} не существуют

ЮАНЬ ЮАНЬ¹, А.А. МАХНЕВ^{1,2}, И.Н. БЕЛОУСОВ^{2,3}

Графы Шилла были введены Дж. Куленом и Ч. Паком. Дистанционно регулярные графы диаметра 3 с собственным значением $\theta_1 = a_3$ называются графами Шилла. Дж. Кулен и Ч. Пак нашли все допустимые массивы пересечений графов Шилла для $b \in \{2, 3\}$. Q-полиномиальный граф Шилла с $b = 3$ имеет массив пересечений {42, 30, 12; 1, 6, 28} или {105, 72, 24; 1, 12, 70}. В работе доказано, что дистанционно регулярный граф с массивом пересечений {42, 30, 12; 1, 6, 28} не существует.

Ключевые слова: граф Шилла, дистанционно регулярный граф, Q-полиномиальный граф.

Distance-regular graphs with eigenvalue $\theta_1 = a_3$ is called Shilla graph. J. Koolen and J. Park found intersection arrays of Shilla graphs with $b = 3$. The Q-polynomial Shilla graph with $b = 3$ has an intersection array {42, 30, 12; 1, 6, 28} or {105, 72, 24; 1, 12, 70}. It is proved in the paper that distance-regular graphs with intersection arrays {42, 30, 12; 1, 6, 28} and {105, 72, 24; 1, 12, 70} do not exist.

Keywords: Shilla graph, distance-regular graphs, Q-polynomial graph.

Введение. Графы Шилла были введены Дж. Куленом и Ч. Паком [1] как, в некотором смысле, экстремальные дистанционно регулярные графы диаметра 3. А именно, наибольшее неглавное

собственное значение графа θ_1 не меньше $\min \left\{ \frac{a_1 + \sqrt{a_1^2 + 4k}}{2}, a_3 \right\}$, где k – степень графа, и $\theta_1 = a_3$

тогда и только тогда, когда $\theta_1 = \frac{a_1 + \sqrt{a_1^2 + 4k}}{2}$ [1, теорема 7]. Графы с $\theta_1 = a_3$ называются графами Шилла. В графах Шилла параметр a_3 обозначают через a и k делится на a . Полагают $b = b(\Gamma) = k/a$ и графы Шилла имеют массивы пересечений $\{ab, (a+1)(b-1), b_2; 1, c_2, a(b-1)\}$. Обратно, дистанционно регулярный граф диаметра 3 с $k = ab$ и $b_1 = (a+1)(b-1)$ является графом Шилла.

Дж. Кулен и Ч. Пак в [1] нашли все допустимые массивы пересечений графов Шилла для $b \in \{2, 3\}$, а в работе И. Белоусова [2] найдены допустимые массивы для $b \in \{4, 5\}$. Отметим, что в случае $b = 2$ получилось 5 допустимых массивов, которым отвечают известные графы, при $b = 3$ таких массивов оказалось 12, среди которых только для двух доказано существование графа – унитарный неизотропный граф и граф Доро. При $b = 4$ известно 25 допустимых массивов пересечений [3], а при $b = 5$ – 60 [4].

Для определения допустимых массивов пересечений графов Шилла с фиксированным параметром b важную роль играют Q-полиномиальные графы относительно θ_1 . Для таких графов наименьшее собственное значение равно $-b(bb_2 + c_2)/(b_2 + c_2)$, что является минимально возможным для третьего неглавного собственного значения [1, предложение 15 и следствие 15]. По [1, предложение 18] Q-полиномиальный граф с $b = 3$ имеет массив пересечений {42, 30, 12; 1, 6, 28} или {105, 72, 24; 1, 12, 70}. Ранее в [5], [6] было доказано, что графы с массивами пересечений {42, 30, 12; 1, 6, 28} и {105, 72, 24; 1, 12, 70} не существуют. Однако в обеих статьях имеются ошибки. В данной работе приведены корректные доказательства.

Теорема 1. Дистанционно регулярный граф с массивом пересечений {42, 30, 12; 1, 6, 28} не существует.

Теорема 2. Дистанционно регулярный граф с массивом пересечений {105, 72, 24; 1, 12, 70} не существует.

Тройные числа пересечений. В доказательстве теорем используются тройные числа пересечений [7].

Пусть Γ – дистанционно регулярный граф диаметра d , u_1, u_2, u_3 – вершины графа Γ , r_1, r_2, r_3 – неотрицательные целые числа, не большие d . Через $\left\{ \begin{matrix} u_1 u_2 u_3 \\ r_1 r_2 r_3 \end{matrix} \right\}$ обозначим множество вершин $w \in \Gamma$ таких, что $d(w, u_i) = r_i$, а через $\left[\begin{matrix} u_1 u_2 u_3 \\ r_1 r_2 r_3 \end{matrix} \right]$ – число вершин в $\left\{ \begin{matrix} u_1 u_2 u_3 \\ r_1 r_2 r_3 \end{matrix} \right\}$. Числа $\left[\begin{matrix} u_1 u_2 u_3 \\ r_1 r_2 r_3 \end{matrix} \right]$ называются тройными числами пересечений. Для фиксированной тройки вершин u_1, u_2, u_3 вместо $\left[\begin{matrix} u_1 u_2 u_3 \\ r_1 r_2 r_3 \end{matrix} \right]$ будем писать $[r_1 r_2 r_3]$. К сожалению, для чисел $[r_1 r_2 r_3]$ нет общих формул. Однако в [7] предложен метод вычисления некоторых чисел $[r_1 r_2 r_3]$.

Пусть u, v, w – вершины графа Γ , $W = d(u, v), U = d(v, w), V = d(u, w)$. Так как имеется точно одна вершина $x = u$ такая, что $d(x, u) = 0$, то число $[0jh]$ равно 0 или 1. Отсюда $[0jh] = \delta_{jw} \delta_{hV}$. Аналогично, $[i0h] = \delta_{iw} \delta_{hU}$ и $[ij0] = \delta_{iU} \delta_{jV}$.

Другое множество уравнений можно получить, фиксируя расстояние между двумя вершинами из $\{u, v, w\}$ и сосчитав число вершин, находящихся на всех возможных расстояниях от третьей:

$$\begin{cases} \sum_l^d [ljh] = p_{jh}^U - [0jh] \\ \sum_l^d [ilh] = p_{ih}^V - [i0h] \\ \sum_l^d [ijl] = p_{ij}^W - [ij0] \end{cases} \quad (+).$$

При этом некоторые тройки исчезают. При $|i - j| > W$ или $i + j < W$ имеем $p_{ij}^W = 0$, поэтому $[ijh] = 0$ для всех $h \in \{0, \dots, d\}$.

Положим

$$S_{ijh}(u, v, w) = \sum_{r,s,t=0}^d Q_{ri} Q_{sj} Q_{th} \left[\begin{matrix} uvw \\ rst \end{matrix} \right],$$

где Q_{ij} – элементы дуальной матрицы собственных значений Q .

Если параметр Крейна $q_{ij}^h = 0$, то $S_{ijh}(u, v, w) = 0$.

Зафиксируем вершины u, v, w дистанционно регулярного графа Γ диаметра 3 и положим $\{ijh\} = \left\{ \begin{matrix} uvw \\ ijh \end{matrix} \right\}$, $[ijh] = \left[\begin{matrix} uvw \\ ijh \end{matrix} \right]$, $[ijh]' = \left[\begin{matrix} uvw \\ ihj \end{matrix} \right]$, $[ijh]^* = \left[\begin{matrix} uvw \\ jih \end{matrix} \right]$ и $[ijh]^\sim = \left[\begin{matrix} uvw \\ hji \end{matrix} \right]$. Вычисление $[ijh]'$, $[ijh]^*$ и $[ijh]^\sim$ (симметризация массива тройных чисел пересечений) может дать новые соотношения, позволяющие доказать несуществование графа.

Граф с массивом пересечений {42, 30, 12; 1, 6, 28}. Дистанционно регулярный граф Γ с массивом пересечений {42, 30, 12; 1, 6, 28} является формально самодуальным (см. [8]), имеет спектр $42^1, 14^{42}, 0^{210}, -7^{90}$, $1 + 42 + 210 + 90 = 343$ вершин и матрицы собственных значений

$$P = Q = \begin{pmatrix} 1 & 42 & 210 & 90 \\ 1 & 14 & 0 & -15 \\ 1 & 0 & -7 & 6 \\ 1 & -7 & 14 & -8 \end{pmatrix}.$$

Ввиду границы Дельсарта порядок клики в Γ не больше 7. И.Н. Белоусов и А.А. Махнев доказали, что граф Шилла с $\theta_2 = 0$ имеет массив пересечений $\{(bl+1)bn, (bln+n+1)(b-1), bln; 1, bn, (bl+1)(b-1)n\}$, где $b=3, l=n=2$ для нашего графа.

Дистанционно регулярный граф Γ с массивом пересечений $\{42, 30, 12; 1, 6, 28\}$ является Q -полиномиальным и имеет многочлен Тервиллигера: $-6(x+3)(x+1)(x-4)(x-5)$ [9]. Поэтому собственные значения локального подграфа $\Gamma(u)$ содержатся в $\{-3, -2, -1, 4, 11\}$.

Лемма 1. Пусть a, b, c, d – кратности собственных значений $-3, -2, -1, 4$. Тогда $a=15, b=0, c=14, d=12$ и $\Gamma(u)$ имеет спектр $-3^{15}, -1^{14}, 4^{12}, 11^1$.

Доказательство. Имеем равенства

$$a+b+c+d+1=42,$$

$$-3a-2b-c+4d+11=0,$$

$$9a+4b+c+16d+121=462.$$

Отсюда $a=-15d+195, b=35d-420, c=-21d+266$. Теперь из неравенств $a, b, c \geq 0$ следует, что $d=12$ и $\Gamma(u)$ имеет спектр $-3^{15}, -1^{14}, 4^{12}, 11^1$. Лемма доказана.

Лемма 2. Γ имеет числа пересечений

$$p_{11}^1 = 11, p_{12}^1 = 30, p_{22}^1 = 120, p_{23}^1 = 60, p_{33}^1 = 30;$$

$$p_{11}^2 = 6, p_{12}^2 = 24, p_{13}^2 = 12, p_{22}^2 = 131, p_{23}^2 = 54, p_{33}^2 = 24;$$

$$p_{12}^3 = 28, p_{13}^3 = 14, p_{22}^3 = 126, p_{23}^3 = 56, p_{33}^3 = 19.$$

Доказательство. Прямые вычисления.

Пусть u, v, w – вершины графа Γ , $[ihl] = [uvw]$, $\Omega = \Gamma_3(u)$ и $\Sigma = \Gamma_2(\Omega)$. Тогда Σ – регулярный граф степени $p_{23}^3 = 56$ на $k_3 = 90$ вершинах. Заметим, что для нашего графа $\Sigma = \Omega_2$.

Лемма 3. Пусть $d(u, v) = d(u, w) = 3, d(v, w) = 1$. Тогда верны равенства:

$$[122] = 2r_6 + 14, [123] = -2r_6 + 14, [133] = 2r_6;$$

$$[211] = r_6 + 5, [212] = [221] = -r_6 + 23, [222] = -2r_6 + 76, [223] = [232] = 3r_6 + 27, [233] = -3r_6 + 29;$$

$$[311] = -r_6 + 6, [312] = [321] = r_6 + 7, [322] = 30, [323] = [332] = -r_6 + 19, [333] = r_6,$$

где $r_6 \in \{0, 1, \dots, 6\}$.

Доказательство. Решая систему линейных уравнений, заданных формулами (+) с учетом равенств $S_{113}(u, v, w) = S_{131}(u, v, w) = S_{311}(u, v, w) = 0$, и вводя независимую переменную $r_6 = [333]$, получим равенства из заключения леммы.

По лемме 3 имеем $[322] = 30$.

Лемма 4. Пусть $d(u, v) = d(u, w) = d(v, w) = 3$. Тогда верны равенства:

$$[122] = -r_{17} + 28, [123] = [132] = r_{17}, [133] = -r_{17} + 14;$$

$$[212] = [221] = -r_{17} + 28, [213] = [231] = r_{17}, [222] = 11r_{17} / 2 + 14, [223] = [232] = -9r_{17} / 2 + 84, [233] = 7r_{17} / 2 - 28;$$

$$[312] = [321] = r_{17}, [313] = [331] = -r_{17} + 14, [322] = -9r_{17} / 2 + 84, [323] = [332] = 7r_{17} / 2 - 28, [333] = -5r_{17} / 2 + 32,$$

где $r_{17} \in \{8, 10, 12\}$.

Доказательство. Упрощение формул (+) как в доказательстве леммы 3.

По лемме 4 имеем $30 \leq [322] = -9r_{17} / 2 + 84 \leq 48$.

Напомним, что $p_{13}^3 = 14$, $p_{33}^3 = 19$, $p_{23}^3 = 56$. Для числа ребер e между $\Sigma(v)$ и $\Sigma_2(v)$ в графе Σ выполняются неравенства $990 = 14 \cdot 30 + 19 \cdot 30 \leq e \leq 14 \cdot 30 + 19 \cdot 48 = 1332$.

С другой стороны, имеем $e = 56(55 - \lambda)$, где λ – среднее значение параметра $\lambda(\Sigma)$, следовательно, $17.678 \leq 55 - \lambda \leq 23.786$ и $31.214 \leq \lambda \leq 37.322$.

Лемма 5. Пусть $d(u, v) = 3, d(u, w) = d(v, w) = 2$. Тогда верны равенства:

$$\begin{aligned} [121] &= -r_{13} + 6, & [122] &= 6r_{12} + 9r_{13} - 2r_{14} - 24, & [123] &= -6r_{12} - 8r_{13} + 2r_{14} + 46, & [131] &= r_{13}, \\ [132] &= -6r_{12} - 9r_{13} + 2r_{14} + 48, & [133] &= 6r_{12} + 8r_{13} - 2r_{14} - 34; & [211] &= (7r_{12} + 9r_{13}) / 2 - r_{14} - 20, & [212] &= (9r_{12} - \\ & - 15r_{13}) / 2 + r_{14} + 54, & [213] &= r_{12} + 3r_{13} - 6, & [221] &= (-9r_{12} - 9r_{13}) / 2 + r_{14} + 44, & [222] &= (-3r_{12} - 3r_{13}) / 2 + 2r_{14} + 72, \\ [223] &= 6r_{12} + 6r_{13} - 3r_{14} + 9, & [231] &= r_{12}, & [232] &= 6r_{12} + 9r_{13} - 3r_{14} + 5, & [233] &= -7r_{12} - 9r_{13} + 3r_{14} + 51; \\ [311] &= (-7r_{12} - 9r_{13}) / 2 + r_{14} + 26, & [312] &= (9r_{12} + 15r_{13}) / 2 - r_{14} - 30, & [313] &= -r_{12} - 3r_{13} + 18, & [321] &= (9r_{12} + \\ & + 11r_{13}) / 2 - r_{14} - 26, & [322] &= (-9r_{12} - 15r_{13}) / 2 + 83, & [323] &= 2r_{13} + r_{14} - 1, & [331] &= -r_{12} - r_{13} + 12, & [332] &= r_{14}, \\ [333] &= r_{12} + r_{13} - r_{14} + 7, \end{aligned}$$

где $r_{12} \in \{0, 1, \dots, 12\}$, $r_{13} \in \{0, 1, \dots, 6\}$, $r_{14} \in \{0, 1, \dots, 19\}$, $r_{12} + r_{13}$ чётно.

Доказательство. Упрощение формул (+) как в доказательстве леммы 3.

По лемме 5 имеем $0 \leq [322] = (-9r_{12} - 15r_{13}) / 2 + 83 \leq 83$. Так как $\Sigma(v) \cup \Sigma(w)$ содержит 112 вершин, то $22 \leq [322] \leq 83$ и $(9r_{12} + 15r_{13}) / 2 \leq 61$.

Пусть $d(u, v) = 3$.

Найдем число d_2 пар вершин (y, z) на расстоянии 1, где $y \in \left\{ \begin{smallmatrix} uv \\ 31 \end{smallmatrix} \right\}$ и $z \in \left\{ \begin{smallmatrix} uv \\ 32 \end{smallmatrix} \right\}$. По лемме 2 имеем $[332] = -r_6 + 19$, где $r_6 \in \{0, 1, \dots, 6\}$, поэтому $182 = 14 \cdot 13 \leq d_2 \leq 14 \cdot 19 = 266$. С другой стороны, по лемме 3 имеем $[312] = r_{17}$, поэтому $182 \leq d_2 = \sum_i r_{17}^i \leq 266$ и $9.57 \leq \sum_i r_{17}^i / 19 \leq 14$.

Найдем число f_1 пар вершин (y, z) на расстоянии 2, где $y \in \left\{ \begin{smallmatrix} uv \\ 31 \end{smallmatrix} \right\}$ и $z \in \left\{ \begin{smallmatrix} uv \\ 32 \end{smallmatrix} \right\}$. По лемме 3 имеем $[321] = r_6 + 7$, где $r_6 \in \{0, 1, \dots, 6\}$, поэтому $98 = 14 \cdot 7 \leq d_3 \leq 14 \cdot 13 = 182$. С другой стороны, по лемме 5 имеем $[311] = (-7r_{12} - 9r_{13}) / 2 + r_{14} + 26$, поэтому $98 \leq f_1 = -\sum_i (7r_{12}^i / 2 + 9r_{13}^i / 2 - r_{14}^i) + 1456 \leq 182$, $1274 \leq \sum_i (7r_{12}^i / 2 + 9r_{13}^i / 2 - r_{14}^i) \leq 1358$ и $67.05 \leq \sum_i (7r_{12}^i / 2 + 9r_{13}^i / 2 - r_{14}^i) / 56 \leq 71.47$. Отсюда $67.05 \leq \sum_i (7r_{12}^i / 2 + 9r_{13}^i / 2 - r_{14}^i) / 56 \leq 69$.

Найдем число f_2 пар вершин (y, z) на расстоянии 2, где $y \in uv$ и $z \in uv$. По лемме 3 имеем $[322] = 30$, поэтому $f_2 = 14 \cdot 30 = 420$. С другой стороны, по лемме 5 имеем $[312] = (9r_{12} + 15r_{13}) / 2 - r_{14} - 30$, поэтому $f_2 = \sum_i (9r_{12}^i / 2 + 15r_{13}^i / 2 - r_{14}^i) - 1680 = 420$, $\sum_i (9r_{12}^i / 2 + 15r_{13}^i / 2 - r_{14}^i) = 2100$ и $\sum_i (9r_{12}^i / 2 + 15r_{13}^i / 2 - r_{14}^i) / 56 = 37.5$. Противоречие с тем, что

$$67.05 \leq \sum_i (7r_{12}^i / 2 + 9r_{13}^i / 2 - r_{14}^i) / 56 \leq 69.$$

Теорема 1 доказана.

Граф с массивом пересечений {105, 72, 24; 1, 12, 70}. Дистанционно регулярный граф Γ с массивом пересечений {105, 72, 24; 1, 12, 70} имеет спектр $105^1, 35^{51}, 3^{441}, -7^{459}$, $1 + 105 + 630 + 216 = 952$ вершин и матрицу собственных значений

$$Q = \begin{pmatrix} 1 & 51 & 441 & 459 \\ 1 & 17 & \frac{63}{5} & -\frac{153}{5} \\ 1 & 0 & -\frac{56}{5} & \frac{51}{5} \\ 1 & -\frac{17}{2} & \frac{49}{2} & -17 \end{pmatrix}.$$

Порядок клики Дельсарта K равен 16, а любая вершина вне K смежна с 0 или $16 + b_1 / (\theta_3 + 1) = 4$ вершинами из K . Многочлен Тервиллигера графа Γ равен $-6(x+3)(x+1)(x-11)(x-17)$, и спектр локального подграфа $\Gamma(u)$ определяется однозначно: $\{32^1, 11^{15}, -1^{35}, -3^{54}\}$. Порядок коклики Хофмана C из $\Gamma(u)$ равен $105 \cdot 3 / 35 = 9$, причем любая вершина из $\Gamma(u) - C$ смежна с 3 вершинами из C . Если u принадлежит клике Дельсарта K из Γ , то либо $\{w\} = K \cap C$ и число ребер между K и C равно $6 \cdot 3 = 14 \cdot 2$, либо K не пересекает C и число ребер между K и C равно $7 \cdot 3 = 15 \cdot 3$. В любом случае имеем противоречие. Значит, либо u не принадлежит кликам Дельсарта из Γ , либо $\Gamma(u)$ не содержит коклик Хофмана.

Лемма 6. Γ имеет числа пересечений

$$\begin{aligned} p_{11}^1 &= 32, \quad p_{12}^1 = 72, \quad p_{22}^1 = 414, \quad p_{23}^1 = 144, \quad p_{33}^1 = 72; \\ p_{11}^2 &= 12, \quad p_{12}^2 = 69, \quad p_{13}^2 = 24, \quad p_{22}^2 = 416, \quad p_{23}^2 = 144, \quad p_{33}^2 = 48; \\ p_{12}^3 &= 70, \quad p_{22}^3 = 420, \quad p_{23}^3 = 140, \quad p_{33}^3 = 40. \end{aligned}$$

Доказательство. Прямые вычисления.

Пусть u, v, w – вершины графа Γ , $[ihl] = [uvw]$, $\Omega = \Gamma_2(u)$ и $\Lambda = \Gamma_2(\Omega)$. Тогда Λ – регулярный граф степени $p_{22}^2 = 416$ на $k_3 = 630$ вершинах. Заметим, что для нашего графа $\Lambda = \Omega_2$.

Пусть u, v, w – вершины графа $p_{13}^3 = 35$ Γ , $[ihl] = [uvw]$, $\Delta = \Gamma_2(u)$ и $\Lambda = \Gamma_2(\Delta)$. Тогда Λ – регулярный граф степени $p_{22}^2 = 416$ на $k_3 = 630$ вершинах. Заметим, что для нашего графа $\Lambda = \Delta_2$.

Лемма 7. Пусть $d(u, v) = d(u, w) = 2, d(v, w) = 1$. Тогда верны равенства:

$$\begin{aligned} [111] &= r_3 / 12 - r_4 / 6 + 6, \quad [112] = [121] = -r_3 / 12 + r_4 / 6 + 6, \quad [122] = 13r_3 / 12 - r_4 / 6 + 39, \\ [123] &= [132] = -r_3 + 24, \quad [133] = r_3; \\ [211] &= 5r_3 / 12 + r_4 / 6 + 14, \quad [212] = [221] = -5r_3 / 12 - r_4 / 6 + 54, \quad [222] = -7r_3 / 12 - 5r_4 / 6 + 290, \\ [223] &= [232] = r_3 + r_4 + 72, \quad [233] = -r_3 - r_4 + 72; \\ [311] &= -r_3 / 2 + 12, \quad [312] = [321] = r_3 / 2 + 12, \quad [322] = -r_3 / 2 + r_4 + 84, \quad [323] = [332] = -r_4 + 48, \\ [333] &= r_4, \end{aligned}$$

где $r_3 \in \{0, 2, \dots, 24\}$, $r_4 \in \{0, 1, \dots, 48\}$, $r_3 / 2 - r_4$ делится на 6.

Доказательство. Решая систему линейных уравнений, заданных формулами (+), с учетом равенств $S_{113}(u, v, w) = S_{131}(u, v, w) = S_{311}(u, v, w) = 0$, и вводя независимые переменные $r_3 = [133]$, $r_4 = [333]$, получим равенства из заключения леммы.

Если $r_4 = 48$, то $[111] = r_3 / 12 - 2$, $[112] = [121] = -r_3 / 12 + 14$, поэтому $r_3 = 24$ и $[112] = [121] = 12$.

По лемме 7 имеем $236 \leq [222] = -7r_3 / 12 - 5r_4 / 6 + 290 \leq 290$.

Лемма 8. Пусть $d(u, v) = d(u, w) = 2, d(v, w) = 3$. Тогда верны равенства:

$$\begin{aligned} [112] &= -r_{14} + 12, \quad [113] = r_{14}, \quad [121] = -r_{12} / 9 + r_{13} / 2 - r_{14} / 3 + 140 / 9, \quad [122] = r_{12} / 3 - r_{13} / 2 + \\ &+ 2r_{14} + 31 / 3, \quad [123] = -2r_{12} / 9 - 5r_{14} / 3 + 388 / 9, \quad [131] = r_{12} / 9 - r_{13} / 2 + r_{14} / 3 - 32 / 9, \quad [132] = r_{12} / 3 + \\ &+ r_{13} / 2 - r_{14} + 140 / 3, \quad [133] = 2r_{12} / 9 + 2r_{14} / 3 - 172 / 9; \end{aligned}$$

$$[212] = r_{13} + r_{14} + 34, \quad [213] = -r_{13} - r_{14} + 35, \quad [221] = r_{12}/3 - r_{13}/2 - r_{14} + 70/3, \quad [222] = -r_{12} - r_{13} - r_{14} + 382, \\ [223] = 2r_{12}/3 + 3r_{13}/2 + 2r_{14} + 32/3, \quad [231] = -r_{12}/3 + r_{13}/2 + r_{14} + 137/3, \quad [232] = r_{12}, \\ [233] = -2r_{12}/3 - r_{13}/2 - r_{14} + 292/3;$$

$$[312] = -r_{13} + 24, \quad [313] = r_{13}, \quad [321] = -2r_{12}/9 + 4r_{14}/3 + 280/9, \quad [322] = 2r_{12}/3 + 3r_{13}/2 - r_{14} + 80/3, \\ [323] = -4r_{12}/9 - 3r_{13}/2 - r_{14}/3 + 776/9, \quad [331] = 2r_{12}/9 - 4r_{14}/3 - 64/9, \\ [332] = -2r_{12}/3 - r_{13}/2 + r_{14} + 280/3, \quad [333] = 4r_{12}/9 + r_{13}/2 + r_{14}/3 - 344/9,$$

где $r_{12} \in \{68, 77, \dots, 140\}$, $r_{13} \in \{0, 2, \dots, 22\}$, $r_{14} \in \{0, 1, \dots, 12\}$, либо r_{12} сравнимо с 5 по модулю 9 и r_{14} делится на 3, либо r_{12} сравнимо с 2 по модулю 9 и r_{14} сравнимо с 1 по модулю 3, либо r_{12} сравнимо с 8 по модулю 9 и r_{14} сравнимо с -1 по модулю 3.

Доказательство. Решая систему линейных уравнений, заданных формулами (+), как в доказательстве леммы 7, получим равенства из заключения леммы.

Равенство $[333] = 4r_{12}/9 + r_{13}/2 + r_{14}/3 - 344/9$ влечет

$$4r_{12}/9 + r_{13}/2 + r_{14}/3 = 4r_{12}'/9 + r_{13}'/2 + r_{14}'/3.$$

Лемма 9. Пусть $d(u, v) = d(u, w) = 2, d(v, w) = 3$. Тогда $77 \leq r_{12} \leq 131$.

Доказательство. Если $r_{12} = 140$, то $[232]' = r_{12}' = [223] = 3r_{13}/2 + 2r_{14} + 104$. Далее, $[233] = -r_{13}/2 - r_{14} + 4$, поэтому $r_{13}/2 + r_{14} \leq 4$. Из равенства $[132] = r_{13}/2 - r_{14}$ следует, что $r_{14} \leq r_{13}/2$ и $r_{14} \leq 2$. Теперь равенство $[123] = -5r_{14}/3 + 12$ влечет $r_{14} = 0, r_{13} \leq 8$ и $[113]' = r_{14}' = [131] = 12 - r_{13}/2 \geq 8$. Имеем $[332] = -r_{13}/2, r_{13} = 0, [231] = r_{13}/2 - 1$, противоречие.

Если $r_{13} = r_{14} = 0$, то равенство $[121] = -r_{12}/9 + r_{13}/2 - r_{14}/3 + 140/9$ влечет $r_{12} = 140$, противоречие.

Если $r_{12} = 68$, то $[133] = 2r_{14}/3 - 4$, поэтому $r_{14} \geq 6, [331] = 8 - 4r_{14}/3$ и $r_{14} \leq 6$. Отсюда $r_{14} = 6$, следовательно, $[133] = [331] = 0$. Далее, $[333] = r_{13}/2 - 6$, поэтому $r_{13} \geq 12, [131] = 6 - r_{13}/2$ и $r_{13} \leq 12$. Отсюда $r_{13} = 12$ и $[333] = [131] = 0$. Теперь $[313]' = r_{13}' = [331] = 0, [113]' = r_{14}' = [131] = 0$, противоречие. Итак, $r_{12} \in \{77, 86, \dots, 131\}$.

По леммам 8 и 9 имеем $-131 - 22 - 12 + 382 = 217 \leq [222] = -r_{12} - r_{13} - r_{14} + 382 \leq 305$.

Напомним, что $p_{12}^2 = 69, p_{22}^2 = 416, p_{23}^2 = 144$. Для числа ребер e между $\Lambda(v)$ и $\Lambda_2(v)$ в графе Λ выполняются неравенства $47532 = 69 \cdot 236 + 144 \cdot 217 \leq e \leq 69 \cdot 290 + 144 \cdot 305 = 63930$.

С другой стороны, имеем $e = 416(415 - \lambda)$, где λ – среднее значение параметра $\lambda(\Lambda)$, следовательно, $114.259 \leq 415 - \lambda \leq 153.878$ и $261.122 \leq \lambda \leq 300.741$.

Лемма 10. Пусть $d(u, v) = d(u, w) = d(v, w) = 2$. Тогда верны равенства:

$$[111] = -r_{10}/6 - r_{11}/6 + r_7/12 + r_8/2 + r_9/3, \quad [112] = r_{10}/6 + r_{11}/6 - r_7/12 - 3r_8/2 - r_9/3 + 12, \\ [113] = r_8, \quad [121] = r_{10}/6 + r_{11}/6 + 5r_7/12 - 3r_8/2 - 5r_9/6 + 12, \quad [122] = -r_{10}/6 - 13r_{11}/6 - 5r_7/12 + 9r_8/2 + 11r_9/6 + 33, \\ [123] = 2r_{11} - 3r_8 - r_9 + 24, \quad [131] = -r_7/2 + r_8 + r_9/2, \quad [132] = 2r_{11} + r_7/2 - 3r_8 - 3r_9/2 + 24, \quad [133] = -2r_{11} + 2r_8 + r_9;$$

$$[211] = r_{10}/6 - 5r_{11}/6 - r_7/12 - r_8/2 - r_9/3 + 12, \quad [212] = -r_{10}/6 + 5r_{11}/6 + 13r_7/12 + 3r_8/2 + r_9/3 + 33, \\ [213] = -r_7 - r_8 + 24, \quad [221] = -r_{10}/6 + 5r_{11}/6 - 5r_7/12 + 3r_8/2 + 11r_9/6 + 33, \quad [222] = -5r_{10}/6 + 7r_{11}/6 - 7r_7/12 - 9r_8/2 - 17r_9/6 + 310, \\ [223] = r_{10} - 2r_{11} + r_7 + 3r_8 + r_9 + 72, \quad [231] = r_7/2 - r_8 - 3r_9/2 + 24, \quad [232] = r_{10} - 2r_{11} - r_7/2 + 3r_8 + 5r_9/2 + 72, \\ [233] = -r_{10} + 2r_{11} - 2r_8 - r_9 + 48;$$

$$[311] = r_{11}, \quad [312] = -r_{11} - r_7 + 24, \quad [313] = r_7, \quad [321] = -r_{11} - r_9 + 24, \quad [322] = r_{10} + r_{11} + r_7 + r_9 + 72, \\ [323] = -r_{10} - r_7 + 48, \quad [331] = r_9, \quad [332] = -r_{10} - r_9 + 48, \quad [333] = r_{10},$$

где $r_7, r_9 \in \{0, 2, \dots, 24\}$, $r_8, r_{11} \in \{0, 1, \dots, 12\}$, $r_{10} \in \{0, 1, \dots, 40\}$, $r_7 + r_8, r_7 + r_{11}, r_9 + r_{11} \leq 24$, r_7, r_9 четны, $r_7 + r_9 - r_{10} - r_{11}$ делится на 3.

Доказательство. Упрощение формул (+) как в доказательстве леммы 9.

Симметризация $[113] = r_8 = r_8^*$, $[311] = r_{11} = r_{11}'$, $[313] = r_7 = r_7^\sim$, $[331] = r_9 = r_9^*$, $[333] = r_{10} = r_{10}' = r_{10}^* = r_{10}^\sim$, далее, $[131] = -r_7/2 + r_8 + r_9/2 = [131]^\sim = -r_7^\sim/2 + r_8^\sim + r_9^\sim/2$, поэтому $r_8 + r_9/2 = r_8^\sim + r_9^\sim/2$, $[133] = -2r_{11} + 2r_8 + r_9 = -2r_{11}' + 2r_8' + r_9'$ и $2r_8 + r_9 = 2r_8' + r_9'$.

Аналогично, $[113] = r_8 = [311]^\sim = r_{11}^\sim$, $[313] = r_7 = [331]' = r_9'$, $[132] = 2r_{11} + r_7/2 - 3r_8 - 3r_9/2 + 24 = [312]^* = -r_{11}^* - r_7^* + 24$, поэтому $2r_{11} + r_{11}^* + r_7^* + r_7/2 = 3r_8 + 3r_9/2$, $[213] = -r_7 - r_8 + 24 = [123]^* = 2r_{11}^* - 3r_8^* - r_9^* + 24$ и $2r_8 + r_9 = 2r_{11}^* + r_7^*$.

Имеем $[112] = r_{10}/6 + r_{11}/6 - r_7/12 - r_8/2 - r_9/3 + 12 = [121]' = r_{10}'/6 + r_{11}'/6 + 5r_7'/12 - 3r_8'/2 - 5r_9'/6 + 12$, поэтому $r_7 - 2r_8 = r_9 - 2r_8'$.

По лемме 10 имеем $111 \leq [222] = -5r_{10}/6 + 7r_{11}/6 - 7r_7/12 - 9r_8/2 - 17r_9/6 + 310 \leq 324$. Так как $\Lambda(v) \cup \Lambda(w)$ содержит 832 из 630 вершин, то $202 \leq [222] \leq 324$ и $5r_{10}/6 - 7r_{11}/6 + 7r_7/12 + 9r_8/2 + 17r_9/6 \leq 91$.

Пусть $d(u, v) = 2$.

Найдем число f_1 пар вершин (y, z) на расстоянии 1, где $y \in \begin{Bmatrix} uv \\ 21 \end{Bmatrix}$ и $z \in \begin{Bmatrix} uv \\ 22 \end{Bmatrix}$. По лемме 9 имеем $[221] = -5r_3/12 - r_4/6 + 54$, где $r_3 \in \{0, 2, \dots, 24\}$, $r_4 \in \{0, 1, \dots, 48\}$, поэтому $2553 = 69 \cdot 37 \leq \leq f_3 \leq 69 \cdot 54 = 3726$. По лемме 11 имеем $[211] = r_{10}/6 - 5r_{11}/6 - r_7/12 - r_8/2 - r_9/3 + 12$, поэтому $2553 \leq f_1 = -\sum_i (-r_{10}^i/6 + 5r_{11}^i/6 + r_7^i/12 + r_8^i/2 + r_9^i/3) + 4992 \leq 3726$, $2439 \leq \sum (-r_{10}^i/6 + 5r_{11}^i/6 + r_7^i/12 + r_8^i/2 + r_9^i/3) \leq 2553$ и $5.935 \leq \sum_i (-r_{10}^i/6 + 5r_{11}^i/6 + r_7^i/12 + r_8^i/2 + r_9^i/3) / 416 \leq 6.137$.

Найдем число f_2 пар вершин (y, z) на расстоянии 2, где $y \in \begin{Bmatrix} uv \\ 21 \end{Bmatrix}$ и $z \in \begin{Bmatrix} uv \\ 22 \end{Bmatrix}$. По лемме 9 имеем $236 \leq [222] \leq 290$, поэтому $16284 = 69 \cdot 236 \leq f_3 \leq 69 \cdot 290 = 20010$. По лемме 11 имеем $[212] = -r_{10}/6 + 5r_{11}/6 + 13r_7/12 + 3r_8/2 + r_9/3 + 33$, поэтому $16284 \leq f_2 = \sum_i (-r_{10}^i/6 + 5r_{11}^i/6 + 13r_7^i/12 + 3r_8^i/2 + r_9^i/3) + 13728 \leq 20010$, $2556 \leq \sum_i (-r_{10}^i/6 + 5r_{11}^i/6 + 13r_7^i/12 + 3r_8^i/2 + r_9^i/3) \leq 6282$ и $4.953 \leq \sum_i (-r_{10}^i/6 + 5r_{11}^i/6 + 13r_7^i/12 + 3r_8^i/2 + r_9^i/3) / 416 \leq 15.101$.

Найдем число f_3 пар вершин (y, z) на расстоянии 3, где $y \in \begin{Bmatrix} uv \\ 22 \end{Bmatrix}$ и $z \in \begin{Bmatrix} uv \\ 22 \end{Bmatrix}$. По лемме 9 имеем $[223] = r_3 + r_4 + 72$, где $r_3 \in \{0, 2, \dots, 24\}$, $r_4 \in \{0, 1, \dots, 48\}$, поэтому $4968 = 69 \cdot 72 \leq f_3 \leq 69 \cdot 144 = 9936$. По лемме 11 имеем $[213] = -r_7 - r_8 + 24$, поэтому $4968 \leq f_3 = -\sum_i (r_7^i + r_8^i) + 9984 \leq 9936$, $48 \leq \sum_i (r_7^i + r_8^i) \leq 5016$ и $0.115 \leq \sum_i (r_7^i + r_8^i) / 416 \leq 12.058$.

Сложив неравенства $5.935 \leq \sum_i (-r_{10}^i/6 + 5r_{11}^i/6 + r_7^i/12 + r_8^i/2 + r_9^i/3) / 416 \leq 6.137$ и $0.115 \leq \sum_i (r_7^i + r_8^i) / 416 \leq 12.058$, получим

$$6.05 \leq \sum_i (-r_{10}^i/6 + 5r_{11}^i/6 + 13r_7^i/12 + 3r_8^i/2 + r_9^i/3) / 416 \leq 18.195.$$

Таким образом, $6.05 \leq \sum_i (-r_{10}^i/6 + 5r_{11}^i/6 + 13r_7^i/12 + 3r_8^i/2 + r_9^i/3) / 416 \leq 15.101$. Равенство $[211] = r_{10}/6 - 5r_{11}/6 - r_7/12 - r_8/2 - r_9/3 + 12$ влечет

$$0 \leq \sum_i (-r_{10}^i/6 + 5r_{11}^i/6 + r_7^i/12 + r_8^i/2 + r_9^i/3) / 416 \leq 12 \text{ и } 6.05 \leq \sum_i (r_7^i + r_8^i) / 416 \leq 3.101,$$

противоречие.

Теорема 2 доказана.

Исследование выполнено при поддержке Естественного научного фонда Китая (проект № 12171126) и гранта Лаборатории инженерного моделирования и статистических вычислений провинции Хайнань.

Литература

1. Koolen, J. H. Shilla distance-regular graphs / J. H. Koolen, J. Park // European Journal of Combinatorics. – 2010. – V. 31, № 8. – P. 2064–2073.
2. Белоусов, И. Н. Дистанционно регулярные графы Шилла с $b_2 = sc_2$ / И. Н. Белоусов // Труды ИММ УрО РАН. – 2018. – Т. 24, № 3. – С. 16–26.
3. Белоусов, И. Н. Некоторые графы Шилла с $b = 4$ не существуют / И. Н. Белоусов, А. А. Махнев, Цэннь-чжуй Цай // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2021. – Т. 129, № 6. – С. 110–114.
4. Белоусов, И. Н. Некоторые графы Шилла с $b = 5$ не существуют / И. Н. Белоусов, А. А. Махнев, Хайян Ли // Вестник Пермского гос. ун-та. – 2021. – Т. 12, № 4. – С. 211–218.
5. Белоусов, И. Н. Дистанционно регулярные графы с массивами пересечений $\{42, 30, 12; 1, 6, 28\}$ и $\{60, 45, 8; 1, 12, 50\}$ не существуют / И. Н. Белоусов, А. А. Махнев // Сиб. электрон. матем. известия. – 2018. – Т. 15. – С. 1506–1512.
6. Белоусов, И. Н. Дистанционно регулярный граф с массивом пересечений $\{105, 72, 24; 1, 12, 70\}$ не существует / И. Н. Белоусов, А. А. Махнев // Сиб. электрон. матем. известия. – 2019. – Т. 16. – С. 206–216.
7. Coolsaet, K. Using equality in the Krein conditions to prove nonexistence of certain distance-regular graphs / K. Coolsaet, A. Jurišić // J. Comb. Theory. Series A. – 2008. – V. 115. – P. 1086–1095.
8. Distance-Regular Graphs / A. E. Brouwer, A. N. Cohen, A. Neumaier. – Berlin–New-York : Springer-Verlag, 1989. – 156 p.
9. Gavriluk, A. A characterization of the graphs of bilinear $d \times d$ -forms over F_2 / A. Gavriluk, J. Koolen // Combinatorica. – 2019. – V. 39, № 2. – P. 289–321.

¹Школа науки,
Университет провинции Хайнань

²Институт математики и
механики УрО РАН

³Уральский федеральный университет

Поступила в редакцию 24.01.2023

УДК 539.23

Application of artificial neural networks to predict the properties of $\text{Zn}_x\text{Mg}_y\text{O}$ semiconductor sol-gel layers

YU.V. NIKITYUK¹, A.V. SEMCHENKO¹, V.A. PROKHORENKO¹, V.V. SIDSKY¹, K.D. DANILCHENKO¹

Using artificial neural networks the prediction of the properties of semiconductor sol-gel films of $\text{Zn}_x\text{Mg}_y\text{O}$ composition has been performed. The data arrays for working with neural networks were obtained as a result of measuring the photoelectric characteristics of sol-gel coatings on an automated basic laser test facility in accordance with GOST-17772-88. An array containing 1800 variants of input parameters was used when working with neural networks. The early stopping criterion was taken in training neural networks. The maximum number of training epochs did not exceed 1100. There are 210 neural networks with one and two hidden layers constructed during the process. The parameters of neural networks have been established that provide acceptable results in predicting the properties of semiconductor sol-gel layers. The research results can be used for determining the technological parameters of sol-gel formation processes using films with selective photosensitivity.

Keywords: neural network, sol-gel method, thin films.

С использованием искусственных нейронных сетей выполнено прогнозирование свойств полупроводниковых золь-гель пленок состава $\text{Zn}_x\text{Mg}_y\text{O}$. Массивы данных для работы с нейронными сетями были получены в результате измерения фотоэлектрических характеристик золь-гель покрытий на автоматизированном базовом лазерном испытательном комплексе в соответствии с ГОСТ-17772-88. При работе с нейронными сетями использовался массив, содержащий 1800 вариантов входных параметров. При обучении нейронных сетей использовался критерий раннего останова. Максимальное количество эпох обучения не превысило 1100. Построено 210 нейронных сетей с одним и двумя скрытыми слоями. Установлены параметры нейронных сетей, обеспечивающие лучшие результаты при прогнозировании свойств полупроводниковых золь-гель слоев. Полученные результаты могут быть использованы при определении технологических параметров процессов формирования золь-гель методом пленок с селективной фоточувствительностью.

Ключевые слова: нейронная сеть, золь-гель метод, тонкие пленки.

Introduction. The creation of sensors, including UV sensors, is an important direction in the development of modern electronics. Such sensors find application in industry, medicine and ecology due to their ability to work under the exposure to solar radiation and radiation from heated parts of equipment. Currently intense research on materials is underway to create ultraviolet sensors, while the actual task is to develop new materials [1]–[2]. The ZnO -based thin films have photosensitivity and can be used in producing light-emitting diodes [3]–[5]. A promising option is $\text{Zn}_x\text{Mg}_y\text{O}$ films with selective photosensitivity made via the sol-gel method. The band gap width is an important characteristic of semiconductor materials. In order to change the band gap width, ZnO thin films are alloyed with various metals, including magnesium, which is suitable for replacing zinc in the lattice [6]–[7].

Presently artificial neural networks are widely used for modeling complex dependencies between input and output data of various systems. They have good capabilities to detect nonlinear relationships in multidimensional data sets [8]–[9], which makes them an effective tool for various fields of science and technology [10]–[16]. Artificial neural networks are successfully used in modeling the properties of semiconductor materials, including for predicting the properties of semiconductor sol-gel films of the $\text{Zn}_x\text{Mg}_y\text{O}$ composition when nitric acid is added to sol [16]. This paper applies artificial neural networks to predict the properties of $\text{Zn}_x\text{Mg}_y\text{O}$ semiconductor sol-gel films produced by adding hydrochloric acid to the sol.

A technique for producing sol-gel layers and measuring their photoelectric characteristics. The ZnO:Mg films were formed by separate sol-gel hydrolysis. The coatings were developed

through centrifugation. Zinc acetate dihydrate, magnesium acetate, isopropyl alcohol and monoethanolamine were used as starting materials. The film-forming solution was prepared as follows: zinc acetate and magnesium acetate were dissolved separately in isopropyl alcohol and stirred at 60 °C for 10 minutes. Then, monoethanolamine was added. Similarly, magnesium acetate-based sol was produced. The sols were then mixed in different concentrations to obtain films with different component ratios (1:1, 1:2, and 1:5). As mentioned earlier, hydrochloric acid was additionally added to the sol. Silicon wafers were used as substrates during layer deposition to measure current-voltage characteristics. To determine the photocurrent, an automated basic laser test facility was used and the measurements were made in accordance with GOST-17772-88 (see figure 1). The optical module of the system included a sample positioning system, a multispectral laser radiation source made up of a set of 9 laser diodes at 405, 450, 520, 660, 780, 808, 905, 980, and 1064 nm with calibrated luminous intensity of about 2 mW. The TO-3535BC-UVC265-30-6 VE LED with a capacity of 300 μW was used as a UV source (278 nm) [17]–[18].

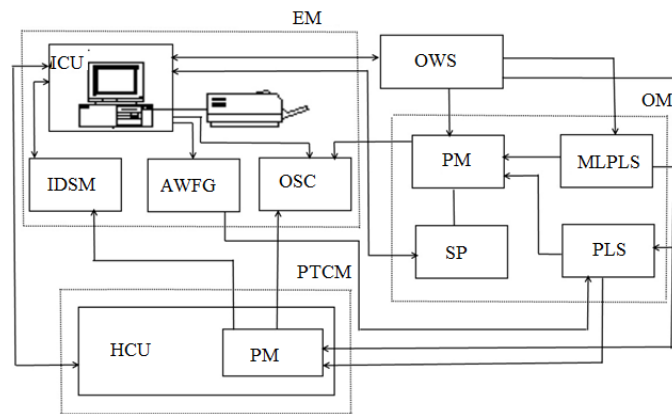


Figure 1 – Schematic diagram of an automated basic laser facility for testing photodetectors:

OWS is the operator's workstation, EM is the electronics module, ICU is the information-computer unit, IDSM is the interactive digital source-meter, AWFG is the arbitrary wave-form generator, OSC is the oscillograph, OM is the optical module, PM is the positioning module, MLPLS is the multispectral laser-plasma light source, PLS is the pulsed laser source, PTCM is the positioning and thermostat control module, HCU is the heat and cold unit, PM is the positioning module, SP is the spectrophotometer

Application of artificial neural networks. The training data array and the array data for testing neural networks were formed as a result of measuring the photoelectric characteristics of sol-gel coatings in accordance with GOST-17772-88 on an automated basic laser test facility. After training, the artificial neural networks using new data sets are able to determine correctly the values of the photoelectric characteristics of the sol-gel coatings.

When working with neural networks, an array containing 1800 variants of input parameters was used, a part of which is presented in Table 1. While creating artificial neural networks, the ReLU activation function and the Adam optimizer were used to predict selective photosensitivity. The networks were formed with the MSE loss function [9]. When training the artificial neural networks, the early stopping criterion was used, with the maximum number of training epochs not exceeding 1100.

Table 1 – Section of the dataset used for training and testing artificial neural networks

№	Molar ratio		Bias voltage	Wavelength	Current strength
	Zn	Mg	U, B	λ , nm	I, A
1	1	1	-3	405	-9.260E-04
2	1	2	-6.5	450	-1.940E-03
3	1	1	-11	905	-1.140E-02
4	1	5	11	780	2.450E-05
5	1	5	-7	520	-8.150E-05
6	1	2	4	980	9.380E-05
7	1	5	-1	808	-2.120E-06
8	1	2	-1.5	405	-2.800E-04

End of Table 1

9	1	1	-5.5	450	-3.230E-03
10	1	5	-8	405	-9.380E-05
11	1	5	-11	660	-1.510E-04
12	1	2	7	780	1.220E-04
13	1	1	3.5	278	1.470E-04
14	1	5	7	520	1.030E-05
15	1	1	-0.5	660	-1.010E-05
16	1	2	-1.5	780	-3.020E-04
17	1	1	-7.5	1064	-5.710E-03
18	1	2	-14.5	660	-5.100E-03
19	1	2	-4	450	-1.080E-03
20	1	5	11	1064	2.460E-05
21	1	1	0.5	808	4.180E-06
22	1	5	-11.5	780	-1.590E-04
23	1	2	-8.5	980	-2.740E-03
24	1	1	-0.5	780	-1.020E-05
25	1	5	0.5	450	4.710E-09

During the numerical experiment, 210 neural networks with one and two hidden layers were constructed (see Figure 2).

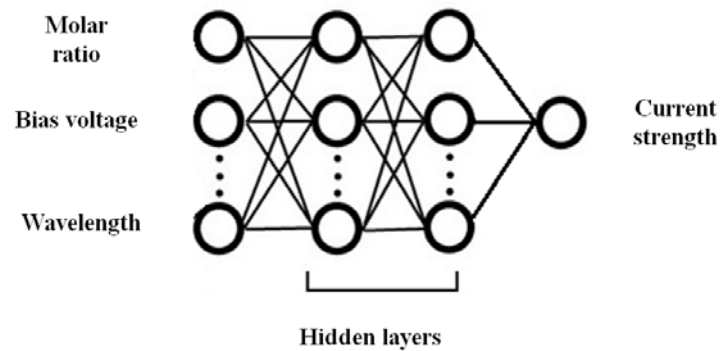


Figure 2 – Artificial Neural Network architecture

The following criteria were used to evaluate the effectiveness of artificial neural networks:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2} \text{ – Mean Absolute Error (MAE);}$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i - y_i| \text{ – Root Mean Square Error (RMSE);}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \text{ – determination coefficient.}$$

Table 2 provides information on 20 most effective neural network configurations for predicting selective photosensitivity.

Table 2 – Artificial Neural Network Testing Results

№	Network architecture	RMSE	MAE	R ²
1	3-14-14-1	8.86E-05	5.55E-05	0.9994
2	3-14-15-1	9.05E-05	5.65E-05	0.9994
3	3-15-14-1	9.96E-05	6.23E-05	0.9993
4	3-13-15-1	1.00E-04	6.33E-05	0.9992
5	3-15-11-1	1.02E-04	6.21E-05	0.9992
6	3-15-15-1	1.02E-04	5.92E-05	0.9992
7	3-13-14-1	1.03E-04	6.30E-05	0.9992
8	3-12-14-1	1.05E-04	6.38E-05	0.9992

End of Table 2

9	3-15-12-1	1.08E-04	6.49E-05	0.9991
10	3-15-13-1	1.12E-04	6.35E-05	0.9990
11	3-13-13-1	1.15E-04	6.86E-05	0.9990
12	3-12-15-1	1.15E-04	6.21E-05	0.9990
13	3-14-13-1	1.15E-04	6.63E-05	0.9990
14	3-14-12-1	1.16E-04	7.08E-05	0.9990
15	3-15-10-1	1.16E-04	6.96E-05	0.9990
16	3-14-11-1	1.17E-04	6.43E-05	0.9990
17	3-11-13-1	1.18E-04	6.71E-05	0.9989
18	3-12-13-1	1.19E-04	7.05E-05	0.9989
19	3-13-12-1	1.20E-04	6.95E-05	0.9990
20	3-15-9-1	1.21E-04	6.91E-05	0.9989

When testing on all three selected criteria, the artificial neural network with architecture [3-14-14-1] showed the best results. Meanwhile, none of the neural networks with a configuration containing a single hidden layer was among the best networks.

Conclusion. The parameters of neural networks that provide acceptable results for predicting the properties of semiconductor sol-gel layers have been established during numerical experiments. The results obtained can be used in determining the technological parameters of sol-gel formation using the method of films with selective photosensitivity of $\text{Zn}_x\text{Mg}_y\text{O}$.

References

1. Yuanshen, Q. Gradient bandgap narrowing in severely deformed ZnO nanoparticles / Q. Yuanshen [et al.] // Materials Research Letters. – 2021. – Vol. 9. – P. 58–64.
2. Liu, K. ZnO-Based ultraviolet photodetectors / K. Liu, M. Sakurai, M. Aono // Sensors. – 2010. – № 10. – P. 8604–8634.
3. Gu, K. Tailoring microstructure and optical properties of MgZnO film on glass by substrate temperature / K. Gu [et al.] // Materials Letters. – 2020. – Vol. 278. – P. 128416.
4. Priscilla, S. J. Effect of magnesium dopant on the structural, morphological and electrical properties of ZnO nanoparticles by sol-gel method / S. J. Priscilla [et al.] // Materials Today : Proceedings. – 2020. – DOI : 10.1016/j.matpr.2020.07.005.
5. A comparative analysis for effects of solvents on optical properties of Mg doped ZnO thin films for optoelectronic applications / F. Baig, M. W. Ashraf, A. Asif, M. Imran // Optik. – 2020. – Vol. 208. – P. 164534.
6. Loeza-Poot, M. Novel sputtering method to obtain wide band gap and low resistivity in as-deposited magnesium doped zinc oxide films / M. Loeza-Poot [et al.] // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2019. – Vol. 104. – P. 104646. – DOI : 10.1016/j.mssp.2019.104646.
7. Asvarov, A. Sh. Structural and optical properties of Mg doped ZnO thin films deposited by DC Magnetron Sputtering / A. Sh. Asvarov [et al.] // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2016. – Vol. 8. – P. 04053.
8. Golovko, V. A. Neural network technologies for data processing : textbook. allowance / V. A. Golovko, V. V. Krasnoproshin. – Minsk : BSU, 2017. – 263 p.
9. Chollet, F. Deep Learning with Python / F. Chollet. – USA : Manning Publications Co., 2018. – P. 400.
10. Bakhtiyari, A. N. A review on applications of artificial intelligence in modeling and optimization of laser beam machining / A. N. Bakhtiyari, Z. Wang, L. Wang, H. Zheng // Optics & Laser Technology. – 2021. – Vol. 135. – P. 1–18.
11. Application of artificial neural networks and finite element method for determining the parameters of elliptic laser beam treatment of quartz sol-gel glasses / Y. V. Nikitjuk, A. N. Serdyukov, V. A. Prohorenko, I. Y. Aushev // Problems of Physics, Mathematics and Technology. – 2021. – № 3 (48). – P. 30–36. – DOI : 10.54341/20778708_2021_3_48_30.
12. Application of finite element method and artificial neural networks to determine laser treatment parameters for 12X18H9T Steel / Yu. V. Nikitjuk, G. A. Baevich, V. N. Myshkovets [et al.] // Vestnik of the Sukhoi State Technical University of Gomel. – 2022. – № 1 (88). – P. 48–55.
13. Nikitjuk, Yu. V. Determination of the parameters of two-beam laser splitting of silicate glasses using regression and neural network models / Yu. V. Nikitjuk, A. N. Serdyukov, I. Y. Aushev // Journal of the Belarusian State University. Physics. – 2022. – № 1. – P. 35–43. – DOI : 10.33581/2520-2243-2022-1-35-43.

14. Determination of the parameters of dual-beam laser cleaning of quartz raw materials using artificial neural networks and the finite element method / Yu. V. Nikitjuk, E. B. Shershnev, S. I. Sokolov, I. Y. Aushev // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2022. – № 3 (52). – P. 37–41.
15. Characterization of laser welding of steel 30XГCH2A by combining artificial neural networks and finite element method / Y. Nikitjuk, G. Bayevich, V. Myshkovets [et al.] // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 422. – P. 273–279. – DOI : 10.1007/978-981-19-0379-3_28.
16. Predicting the properties of Zn_xMg_yO semiconductor sol-gel layers using artificial neural networks / Yu. V. Nikitjuk, A. V. Semchenko, V. V. Sidsky [et al.] // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2022. – № 1 (50). – P. 28–32. – DOI : 10.54341/20778708_2022_1_50_28.
17. Photoactive properties of $ZnO_x : MgO$ nanocomposite coatings deposited in vacuum and by sol-gel method / V. V. Malyutina-Bronskayaa, A. V. Semchenko, A. V. Rogachev, M. A. Yarmolenko, V. V. Sidskiy, K. D. Danilchenko, S. A. Sorokaa, E. V. Rusu // PFMT. – 2021. – Is. 2 (47). – P. 39–44.
18. Malyutina-Bronskayaa, V. V. Automated basic laser test facility for testing advanced types of semiconductor photodetectors / V. V. Malyutina-Bronskayaa [et al.] // Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference «Instrumentation –2020», Minsk, November 18–20 2020. – Minsk : BNTU. – 2020. – P. 391–392.

Разработка модели эквивалентной электрической схемы двойной ДНК-подобной планарной спирали

И.В. СЕМЧЕНКО^{1,2}, С.А. ХАХОМОВ², А.Л. САМОФАЛОВ², П.В. СОМОВ², А.Ю. КРАВЧЕНКО^{3,2}

В работе предложен принципиально новый бианизотропный элемент метаматериалов и метаповерхностей в виде пары полувитковых планарных спиралей. Преимуществами такого элемента являются: высокая резонансная частота, широкополосность взаимодействия с электромагнитным полем, миниатюрность, симметрия структуры, реализуемость в рамках технологий печатных плат. Построена эквивалентная электрическая схема пары полувитковых планарных спиралей. Вычислены эффективные значения сопротивления, ёмкости и индуктивности такого элемента метаматериалов и добротность спирали как колебательного контура.

Ключевые слова: метаматериал, метаповерхность, полувитковая планарная спираль, эквивалентная электрическая схема.

The paper proposes a fundamentally new bianisotropic element of metamaterials and meta-surfaces in the form of a pair of half-turn planar spirals. The advantages of such an element are: high resonant frequency, broadband interaction with the electromagnetic field, miniaturization, symmetry of the structure, realizability within the framework of printed circuit board technologies. An equivalent electrical circuit of a pair of half-turn planar spirals is constructed. The effective values of the resistance, capacitance and inductance of such an element of metamaterials and the Q-factor of the spiral as an oscillatory circuit are calculated.

Keywords: metamaterial, metasurface, half-turn planar spiral, equivalent electrical circuit.

Введение. Идея работы состоит в использовании микрорезонаторов принципиально новой формы, в виде пары полувитковых планарных спиралей, при проектировании и создании фазоманипулирующего метаматериала. Такая спираль состоит только из двух металлических полосок на разных сторонах печатной платы и одного соединительного отверстия, что позволяет значительно уменьшить её размеры. Использование всего половины витка спирали является достаточным для возбуждения в ней колебаний зарядов и одновременно круговых токов. Следовательно, будут индуцироваться электрический дипольный момент и магнитный момент, взаимно согласованные, что приведёт к получению метаматериала в целом с желательными, проектируемыми значениями диэлектрической и магнитной проницаемости. Использование полувитковых спиралей в паре позволит: значительно повысить резонансную частоту, вплоть до миллиметрового диапазона; достичь миниатюризации «метатомов» и повышения плотности их расположения в метаматериале; повысить широкополосность проектируемого устройства. Для использования такой резонансной структуры как элемента электрической цепи необходимо найти эффективные параметры (ёмкость, индуктивность и сопротивление) спирали, вначале гладкой, а затем планарной, выразив их через электромагнитные восприимчивости, или поляризуемости, би-анизотропной частицы.

Вычисление электроёмкости спирали. Для вычисления электроёмкости планарной спирали воспользуемся известным в электростатике выражением

$$C = \frac{q}{U}. \quad (1)$$

Эта формула применяется также для квазистационарных токов. Силу тока, возбуждаемого в проводнике (спирали) падающей электромагнитной волной, представим в виде

$$I = I_0 e^{j\omega t}, \quad (2)$$

как принято в радиофизике, где j – мнимая единица.

Тогда заряд, сосредоточенный на концах спирали, будет равен

$$q = \int Idt = \frac{1}{j\omega} I e^{j\omega t} = -\frac{j}{\omega} I_0 e^{j\omega t} = -\frac{j}{\omega} I. \quad (3)$$

Электрический ток (2) является квазистационарным, то есть не изменяется вдоль проводника, то есть спирали. В этом случае электрические заряды противоположного знака сосредоточены на концах спирали, что качественно соответствует модели конденсатора, обладающего ёмкостью. Напряжение между концами спирали равно

$$U = E_x \cdot H_s, \quad (4)$$

где E_x – компонента вектора $\vec{E}$ вдоль оси x (ось ox направлена вдоль оси спирали), H_s – высота спирали, то есть расстояние между её концами.

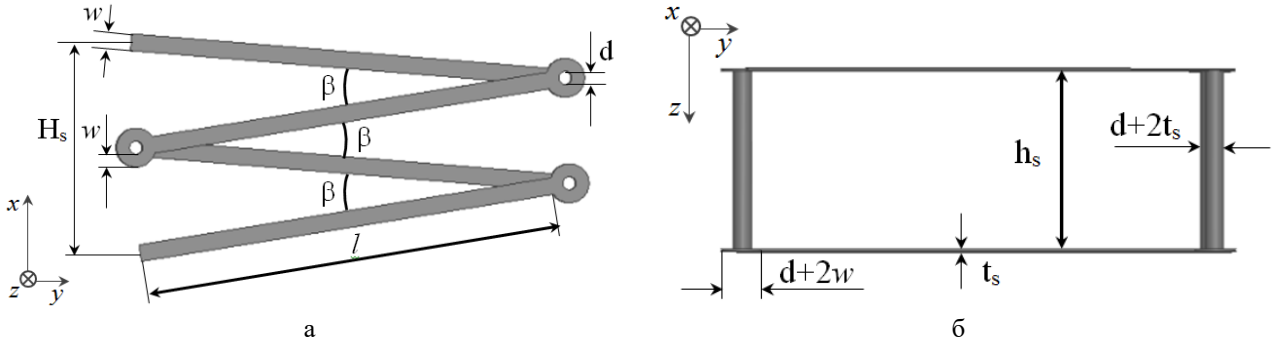


Рисунок 1 – Планарная спираль (в качестве примера показана двухвитковая спираль, предложенная в статье [1]), вид сверху печатной платы, наблюдатель смотрит вслед падающей электромагнитной волне (а) и вид сбоку, вдоль печатной платы (б)

Высоту спирали можно представить в виде

$$H_s = h \cdot N_t, \quad (5)$$

где N_t – число витков, $h = \frac{2\pi}{|q|}$ – шаг спирали, q – удельное кручение, оно может быть положительным и отрицательным, в зависимости от направления закручивания спирали.

Вектор напряженности электрического поля с учётом сдвига фаз между током и напряжением в колебательном контуре (в спирали) равен

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{j(\omega t + \varphi)}. \quad (6)$$

Соответственно, компонента E_x вектора напряженности электрического поля вдоль оси ox имеет вид

$$E_x = E_{0x} e^{j(\omega t + \varphi)}. \quad (7)$$

Чтобы вычислить электроёмкость спирали, будем использовать уравнения связи для би-анизотропной частицы [2]

$$\vec{p} = \varepsilon_0 \alpha_{ee} \vec{E} - j \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \alpha_{em} \vec{H}, \quad \vec{m} = \alpha_{mm} \vec{H} + j \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \alpha_{me} \vec{E}, \quad (8)$$

здесь α с соответствующим индексом обозначает тензор восприимчивости (поляризуемости) спирали, а $\vec{p}$, $\vec{m}$, α , $\vec{E}$, $\vec{H}$ – комплексные величины.

Поскольку мы считаем ток квазистационарным (однородным вдоль спирали), то заряды сосредоточены на концах спирали. Тогда модуль электрического дипольного момента спирали $\vec{p}$ и его компонента вдоль оси ox равны

$$p = q H_s, \quad p_x = q H_s, \quad (9)$$

так как вектор $\vec{p}$ направлен вдоль оси ox . Это верно и для комплексных значений p и q . Отсюда следует величина заряда

$$q = \frac{p_x}{H_s} = \frac{p}{H_s}. \quad (10)$$

Если вектор $\vec{E}$ направлен вдоль оси спирали, то вектор напряжённости магнитного поля $\vec{H}$ не пронизывает витки спирали и не влияет на возбуждение тока. Тогда из уравнений связи (8) следует

$$p_x = \varepsilon_0 \alpha_{ee}^{(11)} E_x. \quad (11)$$

Здесь $\alpha_{ee}^{(11)}$ – компонента тензора диэлектрической восприимчивости $\alpha_{ee}^{(ij)}$, для которого, в общем случае, индексы i и j могут принимать значения от 1 до 3. Используя формулы (10) и (11), получаем

$$q = \frac{\varepsilon_0 \alpha_{ee}^{(11)} E_x}{H_s}. \quad (12)$$

Теперь из соотношений (1) и (4) следует формула для электроёмкости спирали

$$C = \frac{\varepsilon_0 \alpha_{ee}^{(11)}}{H_s^2}. \quad (13)$$

Отметим, что формула (13) приводит к правильной размерности электроёмкости, поскольку диэлектрическая восприимчивость имеет размерность м^{-3} . Эффективное значение электроёмкости (13) является, в общем случае, комплексной величиной. В дальнейшем для перехода к классическому значению ёмкости будем использовать модуль величины (13).

Вычисление индуктивности спирали. В случае квазистационарного тока (однородного в пределах спирали) модуль вектора магнитного момента спирали $\vec{m}$ равен

$$m = ISN_t, \quad (14)$$

где S – площадь витка спирали. Допустим, что магнитное поле направлено вдоль оси спирали, тогда $H = H_x$, $m = m_x$. Поскольку в этом случае электрическое поле ортогонально оси спирали и не создаёт электрический ток, из уравнений связи (8) получаем:

$$m = \alpha_{mm}^{(11)} H_x. \quad (15)$$

Здесь $\alpha_{mm}^{(11)}$ – компонента тензора магнитной восприимчивости спирали $\alpha_{mm}^{(ij)}$, для которого, в общем случае, индексы i и j могут принимать значения от 1 до 3.

Магнитный поток сквозь спираль равен

$$\Phi = \mu_0 H S N_t = \mu_0 \frac{m}{\alpha_{mm}^{(11)}} S N_t. \quad (16)$$

Выражая магнитный поток через индуктивность L следующим образом

$$\Phi = LI, \quad (17)$$

получаем формулу для индуктивности спирали

$$L = \frac{\mu_0}{\alpha_{mm}^{(11)}} S^2 N_t^2. \quad (18)$$

Аналогично формуле (13), соотношение (18) также даёт правильную размерность индуктивности, поскольку магнитная восприимчивость имеет размерность м^{-3} . Полученное эффективное значение индуктивности (18) является, в общем случае, комплексной величиной. В дальнейшем для перехода к классическому значению индуктивности будем использовать модуль величины (18).

Вычисление резонансной частоты спирали. Используя формулы (13) и (18), можно вычислить собственную циклическую частоту колебательного контура (в нашем случае это резонансная циклическая частота колебаний в спирали):

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \cdot \frac{H_s \sqrt{|\alpha_{mm}^{(11)}|}}{S N_t \sqrt{|\alpha_{ee}^{(11)}|}}. \quad (19)$$

С другой стороны, в рамках равноправного подхода, резонансную частоту можно определить, используя условие главного (полуволнового) резонанса, следующим образом

$$\omega_0 = \frac{2\pi c}{\lambda_0} = \frac{\pi c}{L_s}, \quad (20)$$

где c – скорость света в вакууме, L_s – полная длина спирали в выпрямленном состоянии, которая приблизительно равна половине резонансной длины волны λ_0

$$L_s = \frac{\lambda_0}{2}. \quad (21)$$

Используя формулы (19) и (20), получаем соотношение для модулей компонент восприимчивостей спирали

$$\left| \frac{\alpha_{mm}^{(11)}}{\alpha_{ee}^{(11)}} \right| = \left(\frac{\pi S N_t}{L_s H_s} \right)^2. \quad (22)$$

Сравнение со случаем гладкой оптимальной спирали. Проверим формулы (19) и (20) на примере известных соотношений для гладкой спирали. Особый интерес представляет оптимальная спираль, для которой электрический дипольный момент и магнитный момент равны [3]. Это равенство моментов имеет место при активации спирали как электрическим, так и магнитным полем. Такую спираль можно также назвать сбалансированной.

Для оптимальной спирали выполняется равенство компонент восприимчивостей

$$\alpha_{mm}^{(11)} = \alpha_{ee}^{(11)}, \quad (23)$$

тогда из уравнения (19) следует

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \cdot \frac{H_s}{S N_t}. \quad (24)$$

Для гладкой спирали удобно ввести в рассмотрение универсальную характеристику – угол подъёма спирали α , который образован спиральной линией и плоскостью, перпендикулярной оси спирали (рисунок 2).

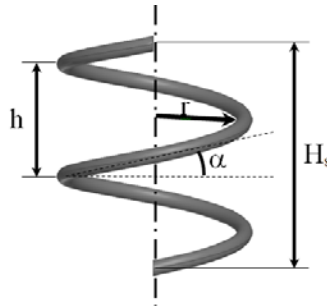


Рисунок 2 – Гладкая цилиндрическая спираль

Высота гладкой спирали и площадь её витка равны

$$H_s = L_s \sin \alpha, \quad (25)$$

$$S = \pi r^2 = \frac{L_s^2 \cos^2 \alpha}{4\pi N_t^2}, \quad (26)$$

где r – радиус витка гладкой спирали.

Учитывая, что $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$, из соотношений (24)–(26) получаем ранее найденное уравне-

ние для гладкой оптимальной спирали [3]

$$4N_t \sin \alpha = \cos^2 \alpha. \quad (27)$$

Решение этого уравнения даёт ранее полученный угол подъёма оптимальной гладкой спирали в зависимости от числа витков N_t [3]

$$\alpha = \arcsin(-2N_t \pm \sqrt{4N_t^2 + 1}). \quad (28)$$

Таким образом, полученные формулы (13) и (18) для ёмкости и индуктивности спирали согласуются с известными соотношениями для гладкой оптимальной спирали.

Оптимальные параметры планарной полувитковой спирали. Применим формулы (13) и (18) к случаю планарной спирали, чтобы определить её оптимальные параметры. Наша цель – рассчитать и спроектировать сбалансированную планарную спираль, одинаково восприимчивую к электрическому и магнитному полю падающей волны, обладающую электрическим дипольным моментом и магнитным моментом, равными друг другу. На основе таких оптимальных планарных спиралей с использованием технологий печатных плат могут быть созданы метаматериал либо метаповерхность с перспективными свойствами.

Полная длина полувитковой планарной спирали (см. рисунок 3) в выпрямленном состоянии равна

$$L_s = 2l + h_s, \quad (29)$$

где l – длина металлической полоски на одной стороне печатной платы, h_s – толщина диэлектрической подложки (печатной платы).

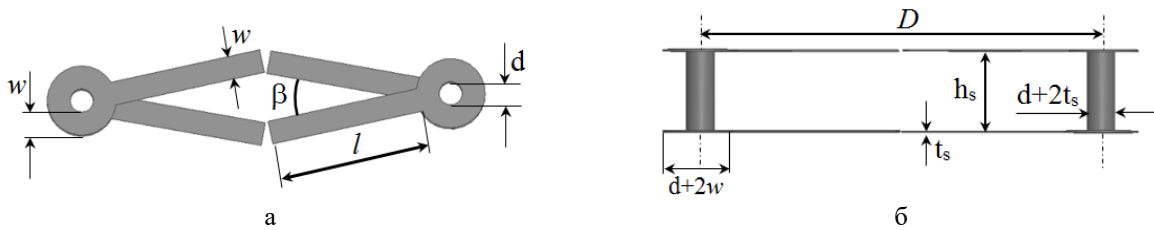


Рисунок 3 – Парная планарная полувитковая спираль, вид сверху печатной платы, наблюдатель смотрит вслед падающей электромагнитной волне (а) и вид сбоку, вдоль печатной платы (б)

Формула для высоты полувитковой планарной спирали имеет вид

$$H_s = 2l \sin \alpha, \quad (30)$$

где $\alpha = \frac{\beta}{2}$ – угол подъема планарной спирали, β – угол между металлическими полосками на двух сторонах платы. Площадь витка парной планарной спирали равна

$$S = 2h_s l \cos \alpha, \quad (31)$$

и в случае полувитковой спирали $N_t = \frac{1}{2}$. Используя формулы (20), (23), (24), (29)–(31), получаем для оптимальной парной полувитковой спирали

$$\frac{\pi}{L_s} = \frac{H_s}{SN_t}, \quad (32)$$

далее следует выражение для оптимального угла подъема полувитковой планарной спирали

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h_s}{2} \frac{\pi}{2l + h_s}. \quad (33)$$

Для гладкой спирали все параметры можно выразить через угол подъема α , поэтому оптимальный угол подъема определяется формулой (28). Для планарной спирали возможные значения толщины подложки h_s зависят от технологии изготовления печатных плат. Для планарной спирали необходимо также учесть требуемую частоту резонанса $\nu_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$.

Следовательно, получаем формулу, по которой можно вычислить оптимальный угол β между металлическими полосками на двух сторонах платы (рисунок 3а):

$$\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \frac{\pi h_s}{4c} \nu_0. \quad (34)$$

Чтобы определить предельный угол подъема, найдем длину металлической полоски l

$$l = \frac{1}{2} \left(\frac{c}{2\nu_0} - h_s \right). \quad (35)$$

Должно выполняться неравенство $l > 0$, поэтому получаем условие для толщины печатной платы

$$h_s < \frac{c}{2\nu_0}. \quad (36)$$

Это неравенство необходимо учитывать при выборе значений h_s в зависимости от резонансной частоты. Теперь из формул (34) и (36) следует

$$\operatorname{tg} \frac{\beta_{\max}}{2} = \frac{\pi}{8}, \quad \beta_{\max} = 42,9^\circ. \quad (37)$$

Вычисление импеданса спирали. Теперь, используя формулы (4) и (14), выражаем импеданс спирали, то есть её комплексное сопротивление

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{E_s H_s}{m} SN_t. \quad (38)$$

Если воздействует только электрическое поле, направленное вдоль оси спирали, а магнитное не пронизывает витки спирали, то из уравнений связи (8) следует

$$m = j \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \alpha_{me}^{(11)} E. \quad (39)$$

Теперь из формулы (38) следует, что импеданс спирали можно выразить через её магнитоэлектрическую восприимчивость, и он равен

$$Z = -j \frac{H_s SN_t}{\alpha_{me}^{(11)}} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}. \quad (40)$$

Здесь $\alpha_{me}^{(11)}$ – компонента тензора магнитоэлектрической восприимчивости $\alpha_{ee}^{(ij)}$, для которого, в общем случае, индексы i и j могут принимать значения от 1 до 3.

Отметим, что формула (40) приводит к правильной размерности импеданса, поскольку магнитоэлектрическая восприимчивость имеет размерность м^{-3} . Импеданс (40) является, в общем случае, комплексной величиной. В дальнейшем для перехода к эффективному значению импеданса будем использовать модуль величины (40).

Вычисление добротности спирали как колебательного контура. Добротность спирали можно записать в виде

$$Q = \frac{1}{|Z|} \sqrt{\frac{|L|}{|C|}} = \frac{\omega_0 L}{R}. \quad (41)$$

Используя формулы (13), (18) и (40), получаем

$$Q = \frac{|\alpha_{me}^{(11)}|}{\sqrt{|\alpha_{ee}^{(11)}| |\alpha_{mm}^{(11)}|}}. \quad (42)$$

Для оптимальной спирали компоненты всех трёх восприимчивостей равны [2]:

$$\alpha_{mm}^{(11)} = \alpha_{ee}^{(11)} = \alpha_{me}^{(11)}. \quad (43)$$

Поэтому для оптимальной спирали получаем $Q = 1$. Следовательно, для оптимальной спирали волновое сопротивление равно её активному сопротивлению.

Таким образом, согласно (42), добротность спирали как колебательного контура можно выразить через компоненты диэлектрической, магнитной и магнитоэлектрической восприимчивостей, аналогично ёмкости спирали (13) и индуктивности спирали (18). Это справедливо и для гладкой, и для планарной спирали. Все восприимчивости (поляризуемости) спирали, в свою очередь, могут быть определены в результате моделирования, либо экспериментальным путём.

Закключение. Предложен принципиально новый бианизотропный элемент метаматериалов и метаповерхностей в виде пары полувитковых планарных спиралей. Построена эквивалентная

электрическая схема пары полувитковых планарных спиралей. Вычислены эффективные значения сопротивления, ёмкости, индуктивности и добротности такого элемента метаматериала. Электрические характеристики «мета-атома» выражены через его диэлектрическую, магнитную и электромагнитную поляризуемости. Найден угол между металлическими полосками на двух сторонах печатной платы, при котором все три поляризуемости бианизотропного элемента метаматериалов равны в условиях резонанса, то есть «мета-атом» является сбалансированным.

Областью применения полученных результатов является электродинамика микроволнового диапазона. Результаты могут быть использованы при теоретических и экспериментальных исследованиях метаматериалов и метаповерхностей с изменяемыми свойствами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проекты: Ф22КИ-016 и Ф22КИТГ-021, а также ГПНИ «Конвергенция – 2025», подпрограмма «Междисциплинарные исследования и новые зарождающиеся технологии».

Литература

1. Planar broadband Huygens' metasurfaces for wave manipulations / F. S. Cuesta [et. al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2018. – Vol. 66 (12). – P. 7117–7127.
2. Serdyukov, A. N. Electromagnetics of bianisotropic materials : Theory and Applications / A. N. Serdyukov, I. V. Semchenko, S. A. Tretyakov, A. H. Sihvola. – London : Gordon and Breach Publishing Group, 2001. – 337 p.
3. Семченко, И. В. Электромагнитные волны в метаматериалах и спиральных структурах : монография / И. В. Семченко, С. А. Хахомов. – Минск : Беларуская навука, 2019. – 279 с.

¹ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

²Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

³БелНИПИнефть, ПО Белоруснефть

УДК 537.876:621.3.09

Расчет параметров метаматериала для получения кросс-поляризационного полного отражения при отсутствии прохождения и поглощения электромагнитных волн

С.А. ХАХОМОВ¹, А.Л. САМОФАЛОВ¹, И.А. ФАНЯЕВ¹, И.В. СЕМЧЕНКО^{1,2}, А.А. ТИМОШЕНКО¹

В работе проведено компьютерное моделирование и оптимизация параметров метаматериала для получения кросс-поляризационного полного отражения при отсутствии прохождения и поглощения электромагнитных волн. Показано, что для получения кросс-поляризационного отражения в метаматериале, в котором при этом коэффициенты прохождения и поглощения на резонансной частоте должны равняться нулю, т. е. метаматериал должен не пропускать и не поглощать электромагнитные волны во всем исследуемом диапазоне частот, необходимо получить эквивалентный электромагнитный отклик ячейки метаматериала. Достичь желаемых свойств позволяет баланс электрического дипольного и магнитного моментов отдельного элемента метаматериала.

Ключевые слова: метаматериал, кросс-поляризатор, планарный элемент, отражение, поглощение.

The paper presents computer modeling and optimization of metamaterial parameters to obtain a cross-polarizing total reflection in the absence of transmission and absorption of electromagnetic waves. It is shown that in order to obtain a cross-polarizing reflection in a metamaterial, in which the transmission and absorption coefficients at the resonant frequency should be zero, i. e. the metamaterial should not transmit or absorb electromagnetic waves throughout the studied frequency range, it is necessary to obtain an equivalent electromagnetic response of a metamaterial cell. The balance of the electric dipole and magnetic moments of a separate element of the metamaterial makes it possible to achieve the desired properties.

Keywords: metamaterial, cross-polarizer, planar element, reflection, absorption.

Введение. Кросс-поляризационный отражатель (рефлектор) представляет собой устройство, вращающее плоскость поляризации отраженной волны ровно на 90° относительно падающей линейно-поляризованной плоской волны, при этом коэффициенты прохождения и поглощения такого устройства на резонансной частоте должны равняться нулю.

Для получения кросс-поляризационного отражения в метаматериале, в котором при этом коэффициенты прохождения и поглощения на резонансной частоте должны равняться нулю, т. е. метаматериал должен не пропускать и не поглощать электромагнитные волны во всем исследуемом диапазоне частот, необходимо получить эквивалентный электромагнитный отклик ячейки метаматериала. Достичь желаемых свойств позволяет баланс электрического дипольного и магнитного моментов отдельного элемента метаматериала. В качестве элемента метаматериала мы рассматриваем одновитковую планарную спираль. Под действием падающей плоской электромагнитной волны в такой одновитковой планарной спирали индуцируются дипольные моменты, которые можно выразить через компоненты тензоров электрических, магнитных, электромагнитных и магнитоэлектрических поляризуемостей. Равные по абсолютной величине амплитуды этих поляризуемостей означают сбалансированный отклик от такого микро-резонатора.

Моделирование параметров одиночной планарной спирали. Для достижения сбалансированного электромагнитного отклика (равенства амплитуд поляризуемостей в резонансе) от спирального микро-резонатора было проведено численное моделирование одновитковой планарной спирали в вакууме, с учетом частотного сдвига от 3 ГГц, обусловленного наличием планируемого диэлектрика, при этом все структурные параметры планарной спирали оптимизированы. Данная методика подробно описана в работах [1]–[2]. В статье [3] предложена аналогичная планарная спираль, состоящая из двух витков.

Расчет структурных параметров одновитковой планарной спирали и всего кросс-поляризационного рефлектора проведен с учетом технических возможностей технологий изготовления печатных плат и доступных в Республике Беларусь материалов. В качестве ди-

электрика взяты два материала с двусторонним медным фольгированием, относительно невысокой стоимостью и соответствующими нашим расчетам относительной диэлектрической проницаемостью (ϵ) и тангенсом угла диэлектрических потерь (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Параметры используемых материалов

Материал	Диэлектрическая проницаемость (ϵ)	Тангенс угла диэлектрических потерь	Толщина металлического основания (t), мкм	Толщина ядра (h), мм
Arlon AD255C	2,55	0,0014	35	3,175
Taconic TLY	2,2	0,0009	35	3,175

На рисунке 1 показаны зависимости вычисленных осевых компонент тензоров электрической (α_{ee}^{yy}), магнитной (α_{mm}^{yy}), электромагнитной (α_{em}^{yy}) и магнитоэлектрической (α_{me}^{yy}) поляризуемостей одновитковой планарной спирали, нормированных на импеданс свободного пространства (η_0) в исследуемом частотном диапазоне, с учетом частотного сдвига, обусловленного значением диэлектрической проницаемости используемых диэлектриков: Arlon AD255C и Taconic TLY. Мы используем термин «осевые компоненты», поскольку координатная ось OY направлена вдоль оси планарной спирали.

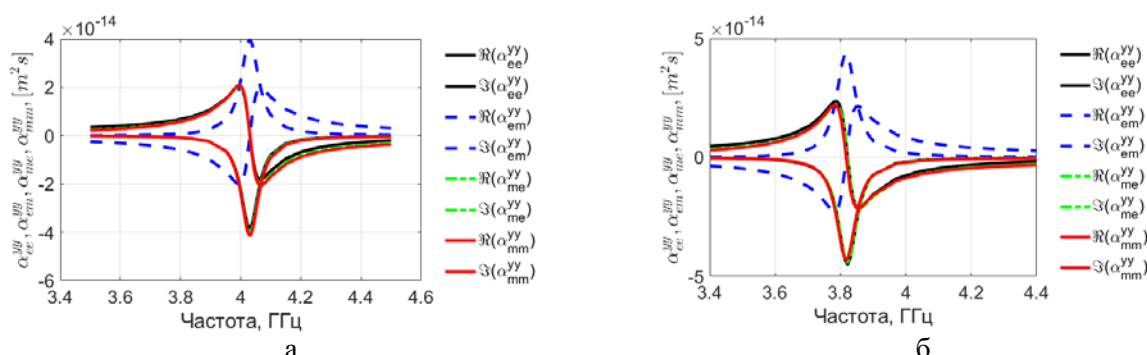


Рисунок 1 – Частотная зависимость осевых компонент тензоров поляризуемостей одновитковой планарной спирали, нормированных на импеданс свободного пространства с учетом частотного сдвига, обусловленного значением диэлектрической проницаемости диэлектрика Arlon AD255C (а) и Taconic TLY (б)

Из графиков на рисунке 1 следует, что все осевые компоненты тензоров поляризуемостей одновитковой планарной спирали приблизительно равны друг другу по абсолютной величине на резонансной частоте, что свидетельствует о сбалансированном электромагнитном отклике такой спирали на возбуждение линейно поляризованной плоской волной.

Моделирование параметров кросс-поляризационного отражателя. На рисунке 2 показана элементарная ячейка кросс-поляризационного отражателя на основе планарных одновитковых спиралей для микроволнового диапазона частот. Элементарная ячейка метаповерхности состоит из левосторонних и правосторонних проводящих планарных спиралей, расположенных на диэлектрической подложке. Структурные параметры спиралей адаптированы к балансу их индивидуальных поляризуемостей.

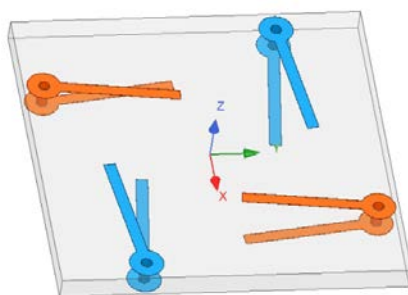


Рисунок 2 – Элементарная ячейка метаматериала, состоящего из сбалансированных одновитковых планарных спиралей на диэлектрической подложке. Синим цветом показаны спирали с левосторонним закручиванием, оранжевым цветом – спирали с правосторонним закручиванием

Изменяя параметры структурного элемента метаматериала (элементарной ячейки), добились, для ячейки в целом, равенства как действительных, так и мнимых частей компонент электрического и магнитного дипольного моментов на резонансной частоте (3 ГГц), то есть баланса такой ячейки.

Таким образом, получены параметры метаматериала, состоящего из одновитковых планарных спиралей (рисунок 3), обладающего функцией кросс-поляризационного отражения на резонансной частоте. Численные значения рассчитанных параметров приведены в таблицах 2 и 3, где l – расстояние между планарными спиральями.

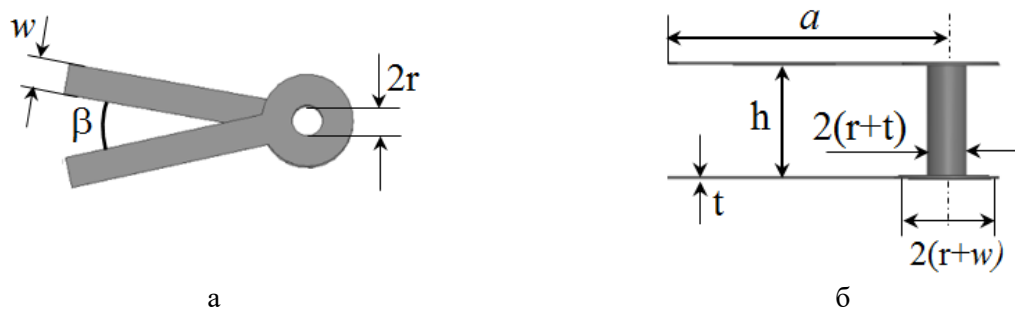


Рисунок 3 – Параметры одновитковой планарной спирали: а – вид сверху, б – вид сбоку

Таблица 2 – Значения параметров кросс-поляризационного отражателя на подложке Arlon AD255C

Параметр	β , град	a , мм	r , мм	w , мм	l , мм
Значение	15	18,5	0,75	1,6	12

Таблица 3 – Значения параметров кросс-поляризационного отражателя на подложке Taconic TLY

Параметр	β , град	a , мм	r , мм	w , мм	l , мм
Значение	15	19,6	0,75	1,7	12

На рисунке 4 приведены графики частотной зависимости коэффициентов со-поляризованного отражения (R_{co}) и прохождения (T_{co}), коэффициентов кросс-поляризованного отражения (R_{cr}), прохождения (T_{cr}) для рассматриваемого метаматериала.

Полные значения коэффициентов отражения (R), прохождения (T) и поглощения (A) могут быть выражены как: $R = R_{co} + R_{cr}$, $T = T_{co} + T_{cr}$, $A = 1 - R_{co} - R_{cr} - T_{co} - T_{cr}$.

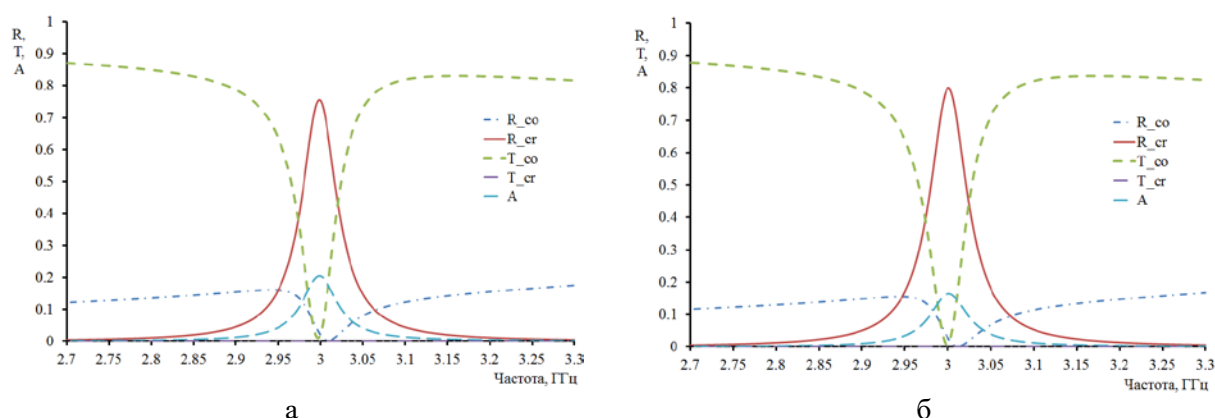


Рисунок 4 – Графики частотной зависимости коэффициентов со-поляризованного отражения (R_{co}) и прохождения (T_{co}), коэффициентов кросс-поляризованного отражения (R_{cr}), прохождения (T_{cr}) кросс-поляризационного отражателя в случае медных полосок на подложке Arlon AD255C (а) и на подложке Taconic TLY (б)

Анализ графиков на рисунке 4 показывает, что для обоих диэлектриков коэффициент кросс-поляризованного отражения (R_{cr}) принимает значения, близкие к 0,8 на резонансной час-

тоте, при этом коэффициент со-поляризованного отражения (R_{co}) практически равен нулю, что говорит о повороте плоскости поляризации отраженной электромагнитной волны на 90° . На графиках видно, что в резонансе коэффициент прохождения равен нулю, но при этом наблюдается поглощение электромагнитной волны на 20,4 % на подложке Arlon AD255C и 16,5 % на подложке Taconic TLY. Поглощение связано с потерями в проводнике (медь) и самом диэлектрике.

Для анализа потерь энергии на рисунке 5 приведены графики частотной зависимости коэффициентов отражения, прохождения и поглощения метаматериала для случая идеальный проводник (PEC) – диэлектрик.

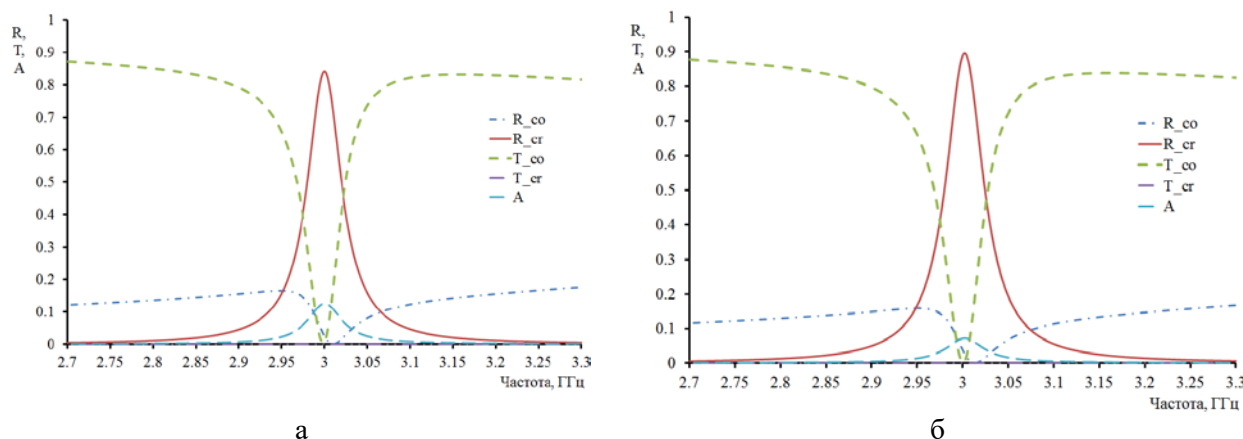


Рисунок 5 – Графики частотной зависимости коэффициентов со-поляризованного отражения (R_{co}) и прохождения (T_{co}), коэффициентов кросс-поляризованного отражения (R_{cr}), прохождения (T_{cr}) кросс-поляризационного отражателя для случая идеальный проводник (PEC) – Arlon AD255C (а) и для случая идеальный проводник (PEC) – Taconic TLY (б)

Анализ графиков на рисунках 4а и 5а позволяет сделать вывод о причинах поглощения в метаматериале на подложке Arlon AD255C: 12,4 % потерь от интенсивности падающей волны составляет поглощение в диэлектрике Arlon AD255C и 8 % в медном проводнике, а анализ графиков на рисунках 4б и 5б позволяет сделать вывод о причинах поглощения в метаматериале на подложке Taconic TLY: 7,2 % потерь от интенсивности падающей волны составляет поглощение в диэлектрике Taconic TLY и 9,3 % в медном проводнике.

На рисунке 6 показана частотная зависимость коэффициента эллиптичности (ψ) и угла поворота плоскости поляризации отраженной волны (θ) для двух исследуемых диэлектрических подложек. Расчет данных параметров проводился согласно методике, описанной в работе [3]. Как видно из рисунков 6а и 6б, угол поворота плоскости поляризации отраженной волны ниже резонансной частоты равен 85,3 и 86,8 градуса, выше резонансной частоты плоскость поляризации отраженной волны поворачивается в противоположную сторону на 93,8 и 93 градуса. Коэффициент эллиптичности отраженной волны для обеих диэлектрических подложек вблизи резонанса имеет значения, близкие к нулю, то есть поляризация отраженной волны является практически линейной. Рассчитанные значения угла поворота поляризации и эллиптичности отраженной волны соответствуют ожидаемым значениям, что показывает эффективность предложенных кросс-поляризационных рефлекторов.

Закключение. В результате проведенных исследований рассчитаны параметры одиночного планарного элемента метаматериала на резонансной частоте для получения кросс-поляризационного полного отражения при отсутствии прохождения и поглощения электромагнитных волн. Показано, что для получения кросс-поляризационного отражения в метаматериале необходимо получить эквивалентный электромагнитный отклик ячейки метаматериала. Достичь желаемых свойств позволяет баланс электрического дипольного и магнитного моментов отдельного элемента метаматериала.

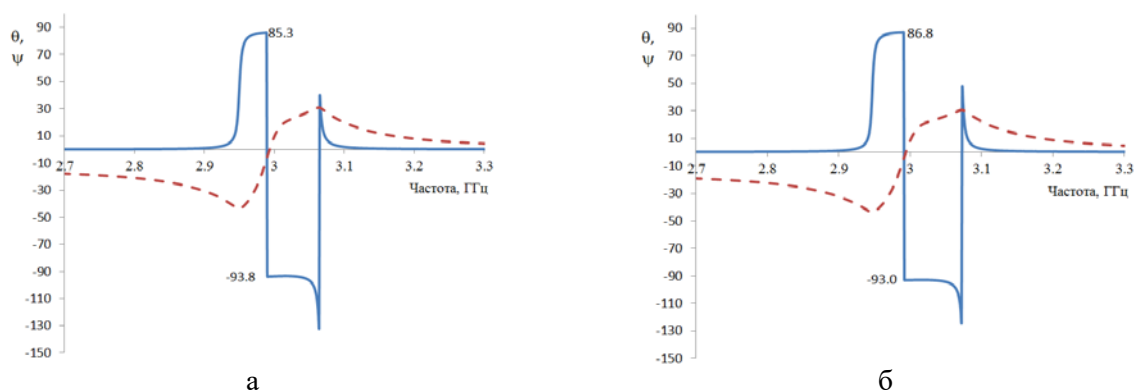


Рисунок 6 – Графики частотной зависимости коэффициента эллиптичности отраженной волны (ψ – штриховая линия) и угла поворота плоскости поляризации отраженной волны (θ – сплошная линия) в случае медных планарных спиралей на подложке Arlon AD255C (а) и на подложке Taconic TLY (б)

Для достижения сбалансированного электромагнитного отклика (равенство амплитуд поляризуемостей на резонансной частоте) от одиночного планарного элемента метаматериала проведено численное моделирование такого микро-резонатора в вакууме, с учетом частотного сдвига резонанса при наличии диэлектрика (Arlon AD255C и Taconic TLY), при этом все структурные параметры одиночной планарной спирали оптимизированы. Получены численные значения параметров метаматериала, состоящего из одновитковых планарных спиралей, обладающего функцией кросс-поляризационного отражения на резонансной частоте, для двух видов диэлектрической подложки. Проведен анализ причин поглощения в метаматериале на резонансной частоте.

Проведенные исследования позволяют перейти к разработке теоретических основ новых типов преобразователей поляризации электромагнитных волн на основе композитных сред с включениями различной формы, изготовлению экспериментальных образцов новых искусственных метаматериалов [4]–[6].

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проекты Ф22КИ-016, Ф22КИТГ-021.

Литература

1. Ishimaru, A. Generalized constitutive relations for meta materials based on the quasi-static Lorentz theory / A. Ishimaru, L. Seung-Woo, Y. Kuga, V. Jandhyala // IEEE Trans. Antennas Propag. – 2003. – V. 51 – P. 2550–2557.
2. Asadchy, V. S. Determining polarizability tensors for an arbitrary small electromagnetic scatterer / V. S. Asadchy [et al.] // Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications. – 2014. – V. 12, № 4. – P. 298–304.
3. Planar broadband Huygens' metasurfaces for wave manipulations / F. S. Cuesta // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2018. – Vol. 66 (12). – P. 7117–7127.
4. Семченко, И. В. Электромагнитные волны в метаматериалах и спиральных структурах : монография / И. В. Семченко, С. А. Хахомов. – Минск : Беларуская навука, 2019. – 279 с.
5. Semchenko, I. Production and experimental study of a weakly reflecting absorbing metamaterial based on planar spirals in the microwave range / I. Semchenko [et. al.] // Research and Education: Traditions and Innovations : INTER-ACADEMIA 2021 / S. Khakhomov, I. Semchenko, O. Demidenko, D. Kovalenko (eds.). – Singapore : Lecture Notes in Networks and Systems, Springer, 2022. – V. 422. – P. 261–269.
6. Semchenko, I. V. Investigation of electromagnetic properties of a high absorptive, weakly reflective metamaterial-substrate system with compensated chirality / I. V. Semchenko [et al.] // J. Appl. Phys. – 2017. – V. 121. – P. 015108.

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Краткие сообщения

УДК 512.542

О пересечении ненильпотентных максимальных подгрупп в группах с операторами

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

В работе исследовано строение подгруппы, равной пересечению ядер не p -нильпотентных абнормальных максимальных подгрупп группы G без одного класса сопряжённых подгрупп. Установлены свойства соответствующей обобщенной подгруппы Фраттини.

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

The structure of the subgroup, equal to the intersection of the nuclei of non- p -nilpotent abnormal maximal subgroups of the group G without one class of conjugate subgroups is studied. The properties of the general Frattini subgroup are established.

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

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

В работе будет использоваться понятие максимальной A -допустимой подгруппы. С необходимыми определениями и обозначениями можно ознакомиться в работе [7].

Следует отметить, что не каждая максимальная подгруппа обязана быть одновременно максимальной A -допустимой подгруппой. С другой стороны, не всякая максимальная из A -допустимых подгрупп группы будет одновременно максимальной подгруппой в обычном смысле [8].

Обозначим через $\bar{\Delta}_{\Theta_1}^p(G, A)$ пересечение ядер всех не p -нильпотентных абнормальных максимальных A -допустимых подгрупп, не сопряженных с некоторой A -допустимой максимальной подгруппой. А через $\bar{\Delta}_{\Theta_1}^n(G, A)$ пересечение ядер всех ненильпотентных абнормальных максимальных A -допустимых подгрупп, не сопряженных с некоторой максимальной A -допустимой подгруппой. Всегда будем полагать, что пересечение пустого множества подгрупп из G совпадает с самой группой G .

Лемма 1 [9]. Пусть p – простое нечётное число. Группа G является p -нильпотентной тогда и только тогда, когда для любой подгруппы P , характеристической в некоторой силовской p -подгруппе группы G , $N_G(P)/C_G(P)$ – p -подгруппа.

Теорема 1. Пусть $p > 2$, группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$ и Θ_1 – подгрупповой функтор, выделяющий в каждой группе один класс сопряжённых подгрупп и саму группу. Тогда для любой не p -разрешимой группы G справедливо $\bar{\Delta}_{\Theta_1}^p(G, A)/P \subseteq \Delta(G/P, A)$, где P – нормальная A -допустимая p -подгруппа группы G .

Доказательство. Обозначим $D = \bar{\Delta}_{\Theta_1}^p(G, A)$. Пусть P – A -допустимая силовская p -подгруппа из D , не содержащаяся в максимальной A -допустимой Θ_1 -подгруппе M . По лемме Фраттини $G = DN_G(P)$.

Предположим, что $N_G(P) \neq G$. Пусть R – максимальная A -допустимая подгруппа группы G такая, что $N_G(P) \subseteq R$. Из абнормальности $N_G(P)$ следует, что R является абнормальной. Так как $G = DR$, то либо R p -нильпотентна либо не p -нильпотентная подгруппа, сопряженная с максимальной A -допустимой подгруппой M . Если предположить, что R – не p -нильпотентная подгруппа, сопряженная с максимальной A -допустимой подгруппой M , то в силу того, что $|G:M| \neq |G:K|$, получаем противоречие. Остается заключить, что R – p -нильпотентная подгруппа группы G . Следовательно, $N_G(P)$ – p -нильпотентная подгруппа.

Если D p -нильпотентна, то нетрудно видеть, что группа G p -разрешима. Противоречие.

Будем считать, что D не p -нильпотентна. Тогда по лемме 1 найдётся характеристическая подгруппа P^* из P такая, что $N_D(P^*)/C_D(P^*)$ – не p -группа. Так как $N_G(P) \subseteq N_G(P^*)$, то $G = DN_G(P^*)$.

Возможны случаи $N_G(P^*) = G$, либо $N_G(P^*)$ p -нильпотентна. Так как $N_D(P^*)/C_D(P^*)$ не p -группа, то второй случай невозможен. Остаётся принять, что $N_D(P^*)/C_D(P^*)$ – не p -группа и $P^* \triangleleft G$.

Пусть P^* – максимальная A -допустимая подгруппа среди характеристических подгрупп группы P , обладающая отмеченными выше свойствами. Так как $N_G(P)$ p -нильпотентна, то $P^* \subset P$. Пусть P_0/P^* – характеристическая подгруппа группы P/P^* . Тогда P_0 характеристична в P и $P^* \subset P_0$. Ввиду выбора подгруппы P^* получаем, что $N_D(P_0)/C_D(P_0)$ – p -группа.

Заметим, что $N_{D/P^*}(P_0/P^*) = N_D(P_0)/P^*$ и $C_D(P_0)P^*/P^* \subseteq C_{D/P^*}(P_0/P^*)$. Отсюда получаем, что $N_{D/P^*}(P_0/P^*)/C_{D/P^*}(P_0/P^*)$ – p -группа. Следовательно, по лемме 1 группа D/P^* является p -нильпотентной. Но тогда D является p -разрешимой группой. Отсюда и из p -разрешимости G/D следует p -разрешимость и самой группы G . Противоречие. Остаётся заключить, что P – нормальная p -подгруппа группы G .

Так как $M \hat{U} P$, то несложно заметить, что $\bar{\Delta}_{\Theta_1}^p(G, A)/P \subseteq \Delta(G/P, A)$. Теорема доказана.

Следствие 1.1. Пусть $p > 2$, группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$ и Θ_1 – m -функтор, выделяющий в каждой группе один класс сопряжённых подгрупп и саму группу. Тогда в любой не p -разрешимой группе G существует нормальная A -допустимая p -подгруппа P такая, что $\bar{\Delta}_{\Theta_1}^p(G, A)/P \in \mathfrak{N}$.

Следствие 1.2. Пусть $p > 2$, группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$ и Θ_1 – m -функтор, выделяющий в каждой группе один класс сопряжённых подгрупп и саму группу. Тогда в любой не p -разрешимой группе G подгруппа $\bar{\Delta}_{\Theta_1}^p(G, A) \in \mathfrak{N}_p \mathfrak{N}$.

Следствие 1.3. В любой не p -разрешимой группе G , $p > 2$ подгруппа, равная пересечению не p -нильпотентных абнормальных максимальных подгрупп, не сопряженных с некоторой максимальной подгруппой, метанильпотентна.

Теорема 2. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$ и Θ_1 – m -функтор, выделяющий в каждой группе один класс сопряжённых подгрупп и саму группу. Тогда для любой неразрешимой группы G справедливо $\bar{\Delta}_{\Theta_1}^{\mathfrak{N}}(G, A)/P \subseteq \Delta(G/P, A)$, где P – нормальная p -подгруппа группы G .

Доказательство. Несложно заметить, что

$$\bar{\Delta}_{\Theta_1}^p(G, A) \supseteq \bar{\Delta}_{\Theta_1}^{\mathfrak{N}}(G, A) \supseteq \Delta(G, A).$$

Если G не разрешима, то G не p -разрешима для некоторого $p \in \pi(G)$. Если $p > 2$, то по теореме 1 $\bar{\Delta}_{\Theta_1}^p(G, A)/P \subseteq \Delta(G/P, A)$, а следовательно, $\bar{\Delta}_{\Theta_1}^{\mathfrak{N}}(G, A)/P \subseteq \Delta(G/P, A)$. Пусть G p -разрешима для любого нечётного $p \in \pi(G)$. Нетрудно видеть, что в этом случае G является разрешимой.

Следствие 2.1. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$ и θ_1 – m -функтор, выделяющий в каждой группе один класс сопряжённых подгрупп и саму группу. Тогда в любой неразрешимой группе G существует нормальная A -допустимая p -подгруппа P такая, что $\bar{\Delta}_{\theta_1}^{\mathfrak{N}}(G, A)/P \in \mathfrak{N}$.

Следствие 2.2. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$ и θ_1 – m -функтор, выделяющий в каждой группе один класс сопряжённых подгрупп и саму группу. Тогда в любой неразрешимой группе подгруппа $\bar{\Delta}_{\theta_1}^{\mathfrak{N}}(G, A) \in \mathfrak{N}_p \mathfrak{N}$.

Следствие 2.4. В любой неразрешимой группе G подгруппа, равная пересечению ненильпотентных абнормальных максимальных подгрупп, не сопряженных с некоторой максимальной подгруппой, метанильпотентна.

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. – 272 с.
3. Селькин, М. В. Максимальные подгруппы в теории классов конечных групп / М. В. Селькин. – Мн. : Беларуская навука, 1997. – 144 с.
4. Шидов, Л. И. О максимальных подгруппах конечных групп / Л. И. Шидов // Сиб. матем. журн. – 1971. – Т. 12, № 3. – С. 682–683.
5. Шлык, В. В. О пересечении максимальных подгрупп в конечных группах / В. В. Шлык // Матем. заметки. – 1973. – Т. 14, № 3. – С. 429–439.
6. Gilotti, A. On the intersection of maximal non-supersoluble subgroups in a finite group / A. Gilotti, U. Tiberio // Bollettino U.M.I. – 2000. – V. 8, № 3-B. – P. 691–698.
7. Бородич, Р. В. О пересечении максимальных подгрупп конечных групп / Р. В. Бородич // Укр. мат. журн. – 2019. – Т. 71, № 11. – С. 1455–1465.
8. Borodich, R. V. A generalized Frattini subgroup / R. V. Borodich // Asian-European Journal of Mathematics. – 2019. – № 14 (02). – DOI: 10.1142 / S1793557121500261
9. Thompson, J. G. Normal p -complements for finite groups / J. G. Thompson // J. Algebra. – 1964. – № 1. – P. 43–46.

К 95-летию юбилею академика Любови Владимировны Хотылевой

Г.Г. ГОНЧАРЕНКО

12 марта 2023 г. исполнилось 95 лет выдающемуся отечественному генетику академику Любови Владимировне Хотылевой.

Ключевые слова: академик Л.В. Хотылева, гетерозис, гибридная мощь, зерновые.

In 2023, world famous great geneticist, academician Lyubov Vladimirovna Khotyleva, turned 95.

Keywords: academician L.V. Khotyleva, heterosis, hybrid power, corns.



Ее называют живой легендой генетики. И действительно, 95-летний юбилей уже наступил, но академик Любовь Хотылева продолжает свой мощный интеллектуальный путь великого ученого и наставника.

У академика Хотылевой много наград: орден Ленина, Трудового Красного Знамени, Франциска Скорины, медали, благодарность Президента РБ. Она – заслуженный деятель науки БССР, лауреат премии Национальной академии наук, Государственной премии БССР, автор более 500 научных работ.

На первый взгляд может показаться, что слишком много для одного человека, что она обласкана судьбой и легко прошла по жизни. Нет, она всего добилась сама благодаря колоссальному трудолюбию, поразительной стойкости и, несомненно, природному таланту ученого.

Она редко говорит о наградах. В основном о работе, о коллегах генетиках, о прорывных направлениях и тенденциях в мировой генетике, о выведенных сортах зерно-

вых и овощных, о гетерозисе, в раскрытие механизмов которого внесла огромный вклад. Гетерозисные сорта зерновых, выведенных академиком Хотылевой с сотрудниками, выращиваются и приносят урожаи на полях от Балтии до Сахалина, в республиках Средней Азии и Кавказа, Китае и Индии [1].

Несмотря на присутствие в её характере железной воли, она не леди Тэтчер, а скорее королева Елизавета. В ней много мудрости, внутреннего тепла, которого хватает и на коллег и сотрудников, и на учеников. Как тонко и элегантно она председательствует и ведет дискуссии на форумах и престижных конференциях, огромное количество которых ей довелось организовывать и возглавлять. Именно она председательствовала на открытии XIV Всемирного генетического конгресса в Москве. Не случайно у нее много учеников по всему пространству СНГ и за его пределами, мощная научная школа – 47 кандидатов и 6 докторов наук.

Любовь Владимировна Хотылева родилась 12 марта 1928 г. в Гомеле. Семья проживала на улице Кирова, и школа, в которой она училась, располагалась на Карла-Маркса.

Грозные испытания начались неожиданно. В роковое воскресенье 22 июня школьница Хотылева с мамой разыскивали отца в парке Паскевича уже в военной форме и сразу попали под первую бомбежку Гомеля. Этой же ночью санитарный поезд № 1058 увез ее отца на войну, с которой он уже не вернулся. Под бомбежки они попадали в Чечерске, под Новозыбковом и под Черниговом, где погибло много людей. Больные и голодные, без денег, только со справкой об эвакуации через три месяца они окончили бегство от смерти под Куйбышевом, где жил и работал в Кинельском сельхозинституте дядя Саша, мамин брат [1].

Здесь девушка реально оценила настоящее богатство – библиотеку профессора. Жадно впитывая накопленные интеллектуальные ценности, юная Любовь Хотылева мощно расши-

ряла кругозор и формировалась как личность. Благодаря творческой атмосфере, а также упорству и трудолюбию, девушка сдала экстерном 22 экзамена за девятый и десятый классы, с отличием окончила школу и пошла в Кинельский институт, в котором проучилась 2 года.

Война подошла к победному концу, они вернулись в Беларусь, где в Горецкой в Сельхозакадемии Любовь Владимировна проучилась 3 года и в 1948 г. окончила ее также с отличием. Здесь она твердо решает стать генетиком, поэтому в аспирантуру Московского университета поступает на кафедру генетики и дарвинизма. Под руководством академика Бориса Павловича Соколова Хотылева прошла хорошую научную школу и в 1953 г. успешно защитила кандидатскую диссертацию на тему «Сравнение способов получения гибридов кукурузы для целей семеноводства» [1].

Ее брали на работу в Белоруссии в Институт земледелия. Но в ходе дискуссии о кукурузе в одном из важных кабинетов, выслушав Хотылеву, академик Николай Васильевич Турбин воскликнул: «Я прямо сегодня зачисляю вас к себе!». С этого момента вся ее научная и педагогическая жизнь связана с Национальной академией наук Беларуси, в которой она прошла путь от научного сотрудника до директора Института генетики и цитологии, академика-секретаря Отделения, советника Президиума НАН Беларуси. А тогда вместе с сотрудниками она продолжила исследования генетических основ гетерозиса в определении гибридной мощности зерновых. Полученные результаты были обобщены в ее докторской диссертации «Принципы и методы селекции на комбинационную способность» (1966), а также изложены в монографиях «Гетерозис» (1961), «Селекция гибридной кукурузы» (1965), «Диалельный анализ в селекции» (1974). Эти работы стали важнейшими пособиями для генетиков и селекционеров бывшего СССР. Когда директора Николая Турбина в 1971 г. вызвали на работу в Москву, коллектив однозначно выдвинул на этот пост Хотылеву. На должность ее утверждали в ЦК КПБ, и Петр Машеров спросил, как она планирует работать. Последовал ответ: «Не буду тормозить ту работу, на которую нацелил коллектив мой предшественник».

Четверть века Любовь Владимировна возглавляла коллектив. Благодаря ее организаторским способностям институт занял лидирующие позиции в стране и вошел в тройку ведущих генетических центров на постсоветском пространстве. В 1972 г. она избирается членом-корреспондентом, а в 1980 г. – академиком АН БССР. С начала 80-х гг. Институт генетики и цитологии был признан головным в Союзе по проблеме гетерозиса и успешно координировал все исследования от Бреста до Сахалина. За разработку проблем гетерозиса Любови Владимировне в 1984 г. присуждается Государственная премия, а в 1986 г. она награждается Орденом Ленина. На ее научные разработки и выведенные сорта зерновых получено 18 свидетельств на изобретения и 8 патентов [1].

В 1978 г. Любовь Владимировна председательствует на XIV Всемирном генетическом конгрессе в Москве, в 80-е и 90-е гг. представляет страну на XIII–XVII генетических конгрессах с докладами в Дели, Монреале, Бирмингеме. Получает ряд международных наград и почетных званий.

С начала 2000-х изменяется масштаб деятельности академика Хотылевой. Она продолжает плодотворно работать в составе президиума НАН Беларуси, Президиума ВАК СССР, ВАК Беларуси, является вице-президентом Всесоюзного общества генетиков и селекционеров им. Вавилова, академиком Международной академии наук Евразии, председателем Международной ассоциации обществ генетиков и селекционеров СНГ, входит в состав редколлегии 8 международных научных журналов и экспертных советов [1].

Подводя итог, хочется еще раз подчеркнуть, что Любовь Владимировна Хотылева продолжает свой путь великого ученого и наставника и, когда ее спрашивают о планах на будущее, отвечает: «Наука не уходит на пенсию».

Литература

1. Гончаренко, Г. Королева отечественной генетики. О тех, кто зажигает звезды на небосклоне науки / Г. Гончаренко // Гомельская правда. – 2023. – 11 февр. – С. 7–8.

Видовая идентификация особей близких видов шмелей с использованием митохондриального гена COI

Г.Г. ГОНЧАРЕНКО, С.А. ЗЯТЬКОВ

В ходе исследования были проанализированы особенности и применимость метода ПЦР-ПДРФ в качестве быстрого, дешевого и надежного инструмента для идентификации двух близких видов шмелей *Bombus terrestris* L. и *B. lucorum* L. Кроме того, приведена последовательность диагностического участка митохондриального гена субъединицы 1 цитохромоксидазы с (COI) и последовательность праймеров оптимальная для ДНК-диагностики данных видов.

Ключевые слова: шмели, *Bombus*, ПЦР-ПДРФ, COI, ДНК-идентификация.

The features and applicability of the PCR-RLFP method as a fast, cheap and reliable tool for identifying two closely related bumblebee species *Bombus terrestris* L. and *B. lucorum* L. are analyzed. In addition, the sequence of the diagnostic site of the mitochondrial gene of cytochrome oxidase c (COI) subunit 1 and the sequence of primers is optimal for DNA diagnostics of these species.

Keywords: bumblebees, *Bombus*, PCR-RLFP, COI, DNA-identification.

Шмели наряду с пчелами являются основными опылителями цветковых растений и сельскохозяйственных культур и в три раза превосходят пчел по этим показателям, поэтому распространено их коммерческое разведение [1]. Для преодоления инбридинга, который происходит при разведении, используют особей из естественных популяций, при этом важна точная генотипическая и видовая идентификация представителей рода *Bombus*. В последние годы для этой задачи используются методы ДНК-анализа митохондриальных генов [2]–[6]. В связи с этим целью данной работы было проанализировать применимость ПЦР-ПДРФ метода на основе митохондриального гена субъединицы 1 цитохромоксидазы с (COI) для видовой идентификации особей близких видов шмелей *Bombus terrestris* L. и *B. lucorum* L.

Шмель земляной большой (*B. terrestris*) распространён на юге Беларуси и в последние годы широко используется как эффективный опылитель в тепличных хозяйствах. Что касается близкого вида – Шмеля земляного малого, норového (*B. lucorum*), то он также часто встречается в природных популяциях и ареалы этих двух видов частично пересекаются.

Для анализа отлавливались особи из природных популяций обоих видов, причем для исследования брали как рабочих особей, так маток и самцов. Затем отпрепарированные биологические образцы, полученные из грудных мышц и конечностей представителей рода *Bombus* Юга Беларуси, подвергали выделению суммарной ДНК. Для выделения ДНК [7] из грудных мышц оптимальным оказался упрощенный СТАВ-метод, а из конечностей – SDS-метод и метод с использованием ионно-обменной смолы Chelex 100.

```
3721 gaggtaaaaa agaaaccttt ggaaatttaa gaataattta tgctatatta ggaattggat
3781 ttttaggttt tattgtttga gctcatcata tatttactgt aggattagac gttgatacac
3841 gagcatattt tacatcagct acaataatta ttgccgtacc tacaggaatt aaagttttta
3901 gatgattagc aacatatcat ggttcaaaaa taaatttcaa tattacaatt atctgatcaa
3961 ttggattccat tttaatatatt acaattggag gattaactgg tgtaatactt tctaattcat
4021 caatcgatat tattttacat gatacatact atgtagtagg tcattttcac tatgttttat
4081 caataggagc agtttttgca attatttcaa gaattattca ttgattccca ataattacag
4141 gtttaataat aaatcaaaaa tgattaaaaa ttcaatt
```

Рисунок 1 –Фрагмент мтДНК *B. terrestris* размером 446 н.п., содержащий сайты рестрикции (выделено) для рестриктазы Hinf I и фланкирующие его участки прикрепления праймеров (подчеркнуто)

Построение праймеров базировалось на мтДНК *B. terrestris* (GenBank: NC_045179) [2]. Праймеры были разработаны для амплификации фрагмента митохондриального гена COI величиной 446 н.п. (рисунок 1) от 3732 до 4177 нуклеотида (GenBank: NC_045179).

Прямой: (COI_M2F) 5'-GAAACCTTTGGAAATTTAAGA-3';

обратный: (COI_End1R) 5'-AATTGAATTTTAAATCATTTTGA-3'.

После амплификации полученные образцы инкубировали с рестриктазой Hinf I [4], [6] с последующим электрофорезом в 1,5 % агарозном геле (рисунок 2).

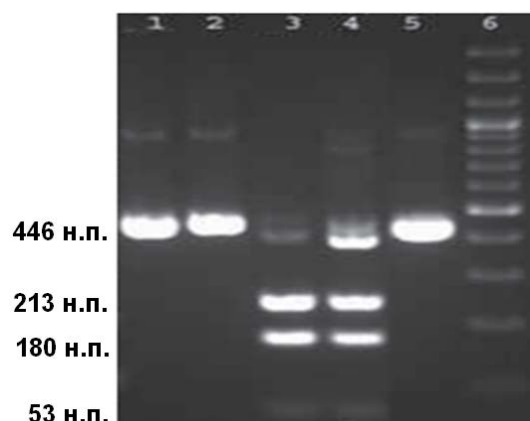


Рисунок 2 – Гаплотипы фрагмента COI мтДНК (446 п.н.) после обработки рестриктазой Hinf I.
1, 2, 5 – *Bombus lucorum*; 3, 4 – *B. terrestris*; 6 – Маркер

На рисунке 2 хорошо видно, что после разрезания рестриктазой Hinf I образцы *B. lucorum* представлены одной фракцией величиной 446 н.п., в то время как *B. terrestris* – тремя фракциями величиной 213, 180 и 53 н.п., соответственно. Это обусловлено тем, что в месте узнавания рестриктазы Hinf I присутствует диагностический сайт (на рисунке 1 обведен в квадрат): у *B. terrestris* он представлен цитозином, а у *B. lucorum* – тимином.

Таким образом, показано, что ПЦР-ПДРФ является быстрым, относительно дешевым и надежным инструментом для идентификации двух близких видов шмелей Юга Беларуси *B. terrestris* и *B. lucorum*.

Работа проводилась в рамках темы ГПНИ 21-14, выполняемой в рамках Государственной программы «Природные ресурсы и окружающая среда».

Литература

1. Perrigault, M. Alternative to honeybees. *Bombus* : rearing and use [in pollination] (Alternatives a l'abeille domestique. Les bourdons: élevage et utilisation) / M. Perrigault // Abeilles et Cie (Belgium). – 1999. – Vol. 64. – P. 23–24.
2. Murray, T. E. Cryptic species diversity in a widespread bumblebee complex revealed using mitochondrial DNA RFLPs / T. E. Murray, Ú. Fitzpatrick, M. J. F. Brown, R. J. Paxton // Conservation Genetics. – 2008. – Vol. 9. – P. 653–666.
3. Carolan, J. C. Colour Patterns Do Not Diagnose Species : Quantitative Evaluation of a DNA Bar-coded Cryptic Bumblebee Complex / J. C. Carolan [et al.] // PLoS ONE. – 2012. – Vol. 7, iss. 1. – P. 1–10.
4. Vesterlund, S.-R. Molecular identification of cryptic bumblebee species from degraded samples using PCR–RFLP approach / S.-R. Vesterlund, J. Sorvari, A. Vasemägi // Molecular Ecology Resources. – 2013. – Vol. 14, iss. 1. – P. 122–126.
5. Cejas, D. Unveiling introgression in bumblebee (*Bombus terrestris*) populations through mitogenome-based markers / D. Cejas [et al.] // Anim. Genet. – 2019. – Vol. 51 (1). – P. 70–77.
6. Зяцьков, С. А. ПЦР-ПДРФ анализ видов шмелей / С. А. Зяцьков, Г. Г. Гончаренко, А. В. Крук, Е. М. Курак // Биолого-химические и экологические аспекты состояния и развития Полесского региона и сопредельных территорий : сборник научных трудов X Международной научно-практической конф. – Мозырь : МПУ им. И.П. Шамякина, 2022. – С. 42–46.
7. Sambrook, J. Molecular Cloning : a Laboratory Manual / J. Sambrook, E. F. Fritsch, T. Maniatis. – New York : Cold Spring Harbor Laboratory Press, NY, USA, 1989. – 270 p.

Регистрация мест обитаний куторы малой (*Neomys anomalus* Cabrera, 1907) в Ушачском районе Витебской области

А.А. САВАРИН

Приведены сведения о находках куторы малой (*Neomys anomalus*) в Ушачском районе Витебской области (2018–2022 гг.). Указаны географические координаты мест поимок. Для отлова зверьков применялись обрезанные ПЭТ-бутылки большого диаметра (до 16 см). Следует ожидать обитание куторы малой и в ряде других озер Ушачского и Полоцкого районов.

Ключевые слова: *Neomys anomalus*, Ушачский район, заказник «Вечелье», река Ушача.

The data on the records of Mediterranean water shrew (*Neomys anomalus*) in the Ushachy district of the Vitebsk region are analyzed (2018–2022). The geographical coordinates of the places of captures are indicated. To catch animals, trimmed PET bottles of a large diameter (up to 16 cm) were used. One should expect the dwelling of the Mediterranean water shrew in a number of other lakes in the Ushachy and Polotsk districts.

Keywords: *Neomys anomalus*, Ushachy district, Vechelye reserve, Ushacha river.

Введение. Кутора малая (*Neomys anomalus* Cabrera, 1907) – один из видов землероек (Soricidae), занесенных в приложение третьего и четвертого изданий Красной книги Беларуси 2004 и 2015 гг. [1]. В последние десятилетия особи данного вида отлавливались в единичных экземплярах в Пружанском [2] и Березовском районах [3] Брестской области, в Воложинском районе Минской, в Лепельском [2] и Ушачском районах [4] Витебской областей.

Способы регистрации мест обитаний куторы: поимка в живоловушку и ловушку Геро, находка мертвых особей [2], а также поимка в модифицированную ловушку Барбера [3], [4]. Перспективен анализ погадок сов, обитающих вблизи водоемов.

Цель работы – обратить внимание специалистов на высокую эффективность использования модифицированных ловушек Барбера для выявления мест обитания куторы малой, указать точные географические координаты ее поимок для дальнейшего мониторинга. Предварительные результаты исследований были опубликованы [5].

Результаты и обсуждение. В течение 2018–2022 гг. вдоль берегов озер Борковщина, Должина, Вечелье, а также на правом берегу р. Ушача (Ушачский район Витебской области, рисунок 1) вкапывались модифицированные ловушки Барбера (обрезанные сверху ПЭТ-бутылки объемом 5–6 литров, до 4/5 наполненных водой). Соблюдались следующие методические требования:

- диаметр ловушек – около 15–16 см (обрезка бутылок – в наиболее широкой части);
- размещение ловушек на участках с обильной водной и околотоводной растительностью;
- размещение ловушек не далее 1 м от береговой линии (по мере удаления от берега в уловах абсолютно преобладают мышевидные грызуны и бурозубки);
- расстояние между ловушками – около 5 м (более частое их размещение не увеличивает уловистость);
- канавки не делались (сохранение естественной среды обитания);
- не использовались консервирующие жидкости (экологическое требование);
- вода подливалась или отливалась из ловушек с учетом вероятности дождя (при низком или высоком уровне воды в ловушке землеройка выскакивает).

Строгое выполнение указанных требований позволило в результате полевых работ с 24.07.2022 по 05.08.2022 у р. Ушача (близ д. Новоселье) получить следующие результаты: относительная численность особей *N. anomalus* оказалась выше, чем у *N. fodiens* (0,081 и 0,047 ос/лс соответственно). Следует заметить, что ранее было доказано совместное обитание двух видов кутор и в оз. Борковщина, Должина и Вечелье (два последних водоема с 2020 г. включены в состав заказника местного значения «Вечелье»). На эту особенность биологии кутор (совместное обитание двух видов) указывал И.Н. Сержанин [6].



Рисунок 1 – Карта мест исследований:

1 – оз. Борковщина, 2 – оз. Должина, 3 – оз. Вечелье, 4 – р. Ушача

Географические координаты мест поймок куторы малой в Ушачском районе (2018–2022 гг.) указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Места поймок особей *N. anomalus*

Название водоема	Географические координаты поймок	
Озеро Борковщина	55°06'18,5"N 28°36'04,7"E	
Протока в озеро Должина	55°06'20,9"N 28°36'01,5"E; 55°06'23,1"N 28°35'59,5"E; 55°06'26,2"N 28°35'59,4"E	55°06'22,0"N 28°36'02,1"E; 55°06'23,2"N 28°35'59,5"E; 55°06'27,6"N 28°35'59,1"E
Озеро Должина	55°06'33,7"N 28°36'05,8"E; 55°07'05,1"N 28°36'20,7"E	55°06'33,8"N 28°36'03,1"E;
Протока в озеро Вечелье	55°07'42,6"N 28°36'27,9"E;	55°07'42,6"N 28°36'28,2"E
Озеро Вечелье	55°07'54,5"N 28°36'43,2"E; 55°07'55,4"N 28°36'37,2"E	55°07'55,3"N 28°36'38,6"E;
Река Ушача	55°07'43,1"N 28°36'01,9"E; 55°07'50,8"N 28°35'50,9"E;	55°07'49,8"N 28°35'49,3"E; 55°07'51,0"N 28°35'50,8"E

Закключение. Использование почвенных ловушек большого диаметра позволило доказать обитание особей куторы малой в системе взаимосвязанных озер Борковщина-Должина-Вечелье (общая протяженность которых с протоками составляет около 8 км) и в р. Ушача. Причем, во всех названных водоемах совместно с этим видом обитает и кутора обыкновенная. Полагаем, что с целью выявления других мест обитаний *N. anomalus* на территории Беларуси следует придерживаться описанной методики выставления ловушек.

Полученные результаты, а также знание ландшафтных особенностей северного региона Беларуси, позволяют предполагать широкое распространение куторы малой и в других водоемах Ушачского и Полоцкого районов Витебской области.

Литература

1. Красная книга Республики Беларусь : редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды диких животных. – Минск : Беларуская Энцыклапедыя імя П. Броўкі, 2015. – 317 с.
2. Новые данные о распространении и биологии видов семейства землеройковых (Soricidae, Mammalia) в Беларуси / В. В. Гричик [и др.] // Журнал Белорусского государственного университета. Биология. – 2020. – № 2. – С. 58–65.
3. Саварин, А. А. О находке куторы малой (*Neomys anomalus*) на территории станции по очистке сточных вод г. Береза (Брестская область) / А. А. Саварин, А. Н. Молош // Вісник Одеського національного університету. Біологія. – 2017. – Т. 22, № 1 (40). – С. 71–77.
4. Саварин, А. А. Находка куторы малой (*Neomys anomalus* Cabrera, 1907) в Ушачском районе Витебской области / А. А. Саварин // Веснік ВДУ. – 2019. – № 2 (103). – С. 66–71.
5. Саварин, А. А. О распространении и морфологии куторы малой (*Neomys anomalus* Cabrera, 1907) в Ушачском районе Витебской области / А. А. Саварин // Актуальные проблемы охраны животного мира в Беларуси и сопредельных регионах : материалы II Международной научно-практической конференции, Минск, 11–14 октября 2022 г. ; редкол.: А. В. Кулак [и др.]. – Минск : А. Н. Вараксин, 2022. – С. 375–378.
6. Сержанин, И. Н. Млекопитающие Белоруссии / И. Н. Сержанин. – Минск : Издательство АН БССР, 1961. – С. 55.

Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 08.11.2022

Обсуждения

УДК 514.112 (076,2) (075,3)

Решение геометрической задачи «квадратура круга» построением с помощью циркуля и линейки без шкалы с делениями

Г.В. ГОВОР

История развития геометрии знает ряд задач на построение, которые не имеют общепризнанных решений до наших дней. Одна из них – задача о квадратуре круга. Условием решения задачи является построение с помощью двух простых приспособлений – циркуля и линейки без шкалы с делениями. В данной статье вышеназванная задача решена в пределах точности, достигаемой с помощью обычного циркуля из готовальни, школьной линейки и остро заточенного карандаша.

Ключевые слова: квадратура круга, квадрат, число π , линейка, циркуль.

The history of the development of geometry knows a number of tasks about construction that do not have generally recognized solutions till this day. One of them, is the task of squaring a circle. The condition for solving the task is the construction using two simple devices – a compass and a ruler without a scale with divisions. In this article, the mentioned task is solved within the accuracy, achieved with the help of an ordinary compass from a case of drawing instruments, a school ruler and a sharp pencil.

Keywords: squaring a circle, regular tetragon, π , ruler, compass.

Квадратура круга – задача, заключающаяся в нахождении способа построения с помощью циркуля и линейки без шкалы с делениями квадрата, равновеликого площадью данному кругу [1]. Фактически, решение этой задачи связано с точностью определения числа π .

За тысячелетия накопилось множество значений числа π – результатов решений геометров и математиков разных стран: в древнем Египте принимали значение π_E равным $\approx 3,1604$, в Греции $\pi_G \approx 3,1428$, в Китае $\pi_K \approx 3,1415$, в Индии $\pi_I \approx 3,162$ и т. д.

Характерно, что многие математики не пытались строить геометрически равновеликий по площади кругу квадрат. Одни делили окружность на правильные многоугольники, другие искали решения в сакральной геометрии и т. д. Простейший механический способ предложил Леонардо да Винчи: изготовим круговой цилиндр с радиусом основания R и высотой $R/2$, намажем чернилами боковую поверхность этого цилиндра и прокатим его по плоскости. За один полный оборот цилиндр отпечатает на плоскости прямоугольник площадью πR^2 . Располагая таким прямоугольником уже несложно построить равновеликий ему квадрат.

Из теоремы Линдемана [2] также следует, что решить задачу о квадратуре круга нельзя не только циркулем и линейкой, то есть с помощью прямых и окружностей, но и с помощью любых других алгебраических кривых и поверхностей (например, эллипсов, гипербол, кубических парабол и т. п.). Следовательно, по нашему мнению, геометрическое решение может быть только приближённым.

Важным этапом в исследовании проблемы стало сочинение Архимеда «Измерение круга», в котором впервые строго доказана теорема: площадь круга равна площади прямоугольного треугольника, у которого один катет равен радиусу круга, а другой – длине окружности. Это означало, что если удастся осуществить спрямление окружности, то есть построить отрезок такой же длины, то задача о квадратуре круга будет решена [3].

Учитывая опыт предшествующих поколений геометров, мы решали задачу двумя способами:

1) Геометрическим построением квадрата, равновеликого площадью данному кругу, при помощи циркуля и линейки без шкалы с делениями. Исходные предпосылки для решения задачи таким построением нами основаны на поиске точки на общей диагонали, проведённой через вершины вписанного и описывающего данный круг квадратов. Вписанный квадрат заведомо меньше, а описанный – заведомо больше площади искомого круга. Следовательно,

9) На пересечениях диагонали **GX** и **YW** описанного квадрата **G Y X W** с окружностью **O** получаем точки **A, B, C, D** и, соединив их последовательно прямыми **A с B, B с C, C с D** и **D с A**, получаем вписанный квадрат **ABCD** в данную окружность **O**.

10) Ставим ножку циркуля в точку **L** и делаем две засечки радиусом **OL** на окружности **O**, получая точки **E** и **M**.

11) Соединив прямыми при помощи линейки точки **E с M, M с Z**, и **Z с E**, получаем вписанный в данную окружность **O** равносторонний треугольник **EZM**.

12) На пересечении вертикальной оси **ZL** со стороной **EM** вписанного треугольника **EZM** находим точку **H**.

Далее проводим расчёты в предположении, что радиус **R** равен **58** неких условных единиц значений, это могут быть сантиметры, метры, километры и т. п.

Если $R = 58$; $1/2R = 29$; $2R = 116$; $R^2 = 3364$, тогда:

13) **$EO = R = 58$, $OH = 1/2R = 29$, $EH = 1/2$ стороны **EM** вписанного треугольника **EZM** будет равна: $EH^2 = EO^2 - OH^2 = 3364 - 841 = 2523$; $EH = \sqrt{2523} = 50,22947$.**

14) Сторона **AD** вписанного квадрата **ABCD** будет равна:

$$AD^2 = AO^2 + OD^2 = 3364 + 3364 = 6728; AD = \sqrt{6728} = 82,02438; 1/2AD = AS = 41,01219.$$

15) На пересечении стороны **EM** вписанного треугольника **EZM** и стороны **AB** вписанного квадрата **ABCD** находим точку **U**.

16) Длина отрезка **EU** равна разнице между отрезками **EH** и **AS**:

$$EU = EH - AS = 50,22947 - 41,01219 = 9,21728.$$

17) Ставим ножку циркуля в точку **G** описанного квадрата **G Y X W** и радиусом равным отрезку **EU** делаем засечку на диагонали **GX**, получив точку **K** и отрезок **GK**, равный отрезку **EU**.

18) Ставим ножку циркуля в точку **O** и радиусом, равным отрезку **OK**, делаем засечки на отрезках **OY, OX** и **OW**, получив точки **F, T**, и **V**, которые вместе с точкой **K** образуют вершины искомого квадрата.

19) При помощи линейки поочерёдно соединяем точки **K, F, T**, и **V** прямыми, получив искомый квадрат **KFTV**, с определённой точностью равный своей площадью площади данного круга **O**.

Чтобы доказать это сделаем некоторые расчёты:

Отрезок **KT** равен разнице диагонали **GX** описанного квадрата **G Y X W** и суммы отрезков **GK** и **TX**. $GX^2 = GY^2 + YX^2 = 2R^2 + 2R^2 = 26912$; $GX = \sqrt{26912} = 164,04877$; $KT = GX - (GK + TX) = 164,04877 - 18,43456 = 145,61421$.

Если известна длина гипотенузы **KT** равностороннего прямоугольного треугольника **KFT**, то длины катетов этого треугольника находим по формуле Пифагора:

$$KF = \sqrt{1/2 KT^2} = \sqrt{10601,74907} = 102,96479.$$

Площадь **SKFTV** квадрата **KFTV** равна $KF^2 = 10601,74797$; площадь данного круга **O** равна $\pi R^2 = 3,14159 \times 3364 = 10568,30876$; отношение **SKFTV** к **SO** равно $SKFTV / SO = 1,00316 \approx 1$.

Приемлемое для расчётов в практике архитектуры и строительства значение числа $\pi \ddot{Y}$ равно $\pi \ddot{Y} = SKFTV / R^2 = 3,15153$.

Отношение $\pi \ddot{Y}$ к π равно $\pi \ddot{Y} / \pi = 3,15153 / 3,14159 = 1,00316 \approx 1$.

Примечание: число π греческое, число $\pi \ddot{Y}$ мы обозначили буквой $\ddot{Y}$, как белорусское.

Отметим, что все вышеприведённые соотношения до пятого знака после запятой справедливы при любых численных значениях радиуса **R**, что подтверждено выполненными нами расчётами.

Следовательно, задача о квадратуре круга, в соответствии с её условиями, построением квадрата, равновеликого площадью площади данного круга, геометрически решена в пределах точности, которую можно достичь с помощью обычного циркуля из готовальни, линейки без делений и остро заточенного карандаша.

Понятно, что с решением задачи о квадратуре круга и определением $\pi \ddot{Y}$ мы задержались на две тысячи лет. Однако нами показано, что геометрически с помощью линейки без шкалы с делениями и циркуля из готовальни задача решается и значение числа π грубо можно определить по вышеприведённому нами алгоритму. Естественно, в практике расчётов сегодня следует использовать более точное значение числа π , равное **3,1415926...**

2) Алгоритм определения длины окружности данного круга методом спрямления окружности.

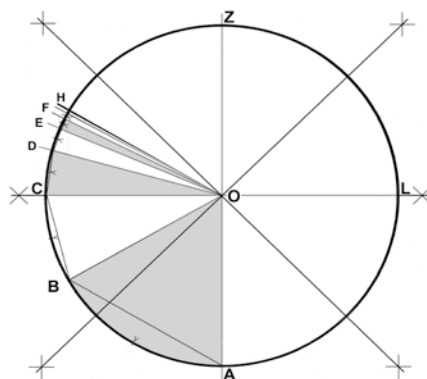


Рисунок 2 – Метод спрямления окружности

Исходные данные: $R = 58$, $2R = 116$, $R^2 = 3364$, длина окружности $P_0 = 2\pi R = 728,84949$, начинаем спрямление окружности данного круга с деления её на дуги и секторы пошаговым уменьшением дуг в 2 раза:

1) Ставим ножку циркуля в точку A и радиусом R , делаем засечку на окружности O , получив точку B , дугу $AB = 1/6 P_0$, сектор $AOB = 60^\circ$ и хорду $AB = R$.

2) Делим при помощи циркуля известным способом дугу AB на 2 равные части и делаем засечку из точки B радиусом равным $1/2$ дуги AB на окружности O , получив точку, совпавшую с точкой C пересечения горизонтальной оси с окружностью O , дугу $BC = 1/12 P_0$, сектор $BOC = 30^\circ$ и хорду BC .

3) Делим при помощи циркуля дугу BC на 2 равные части и делаем засечку из точки C радиусом равным $1/2$ дуги BC на окружности O , получив точку D , дугу $CD = 1/24 P_0$, сектор $COD = 15^\circ$ и хорду CD .

4) Делим при помощи циркуля дугу CD на 2 равные части и делаем засечку из точки D радиусом равным $1/2$ дуги CD на окружности O , получив точку E , дугу $DE = 1/48 P_0$, сектор $DOE = 7,5^\circ$ и хорду DE .

5) Делим при помощи циркуля дугу DE на 2 равные части и делаем засечку из точки E радиусом равным $1/2$ дуги DE на окружности O , получив точку F , дугу $EF = 1/96 P_0$, сектор $EOF = 3,75^\circ$ и хорду EF .

6) Ищем длины хорд AB , BC , CD , DE , EF :

$$\text{хорда } AB = 2R \cdot \sin 60^\circ / 2 = 116 \cdot \sin 30^\circ = 116 \cdot 0,5 = 58;$$

$$\text{хорда } BC = 2R \cdot \sin 30^\circ / 2 = 116 \cdot \sin 15^\circ = 116 \cdot 0,258 = 30,023;$$

$$\text{хорда } CD = 2R \cdot \sin 15^\circ / 2 = 116 \cdot \sin 7,5^\circ = 116 \cdot 0,1305 = 15,141;$$

$$\text{хорда } DE = 2R \cdot \sin 7,5^\circ / 2 = 116 \cdot \sin 3,75^\circ = 116 \cdot 0,065 = 7,586;$$

$$\text{хорда } EF = 2R \cdot \sin 3,75^\circ / 2 = 116 \cdot \sin 1,875^\circ = 116 \cdot 0,032 = 3,795;$$

7) Ищем длины дуг AB , BC , CD , DE , EF при длине окружности $O = 2\pi R = 364,424$ и пропорциях ($AB = 1/6 P_0$, $BC = 1/12 P_0$, $CD = 1/24 P_0$, $DE = 1/48 P_0$, $EF = 1/96 P_0$):

$$\text{дуга } AB = 364,424 / 6 = 60,737,$$

$$\text{дуга } BC = 364,424 / 12 = 30,368,$$

$$\text{дуга } CD = 364,424 / 24 = 15,184,$$

$$\text{дуга } DE = 364,424 / 48 = 7,592,$$

$$\text{дуга } EF = 364,424 / 96 = 3,796.$$

8) Ищем частное между длинами одноимённых дуг AB , BC , CD , DE , EF и хорд AB , BC , CD , DE , EF :

$$\text{дугу } AB / \text{на хорду } AB = 60,737 / 58 = 1,04718;$$

$$\text{дугу } BC / \text{на хорду } BC = 30,368 / 30,023 = 1,01149;$$

$$\text{дугу } CD / \text{на хорду } CD = 15,184 / 15,141 = 1,00283;$$

$$\text{дугу } DE / \text{на хорду } DE = 7,592 / 7,586 = 1,00079;$$

$$\text{дугу } EF / \text{на хорду } EF = 3,796 / 3,795 = 1,00026.$$

Здесь очевидна закономерность уменьшения значения частных и приближение равенства одноимённых дуги и хорды одного сектора. В связи с этой закономерностью нами созданы ниже-

приведённые шкалы длин дуг и хорд секторов и таблица спрямления дуг путём последовательного выравнивания длин дуг и хорд до практически полного их равенства (до пятого знака после запятой).

Шкала пропорций дуг к длине окружности O с последовательным уменьшением их в 2 раза в секторе АОН данного круга O : 1) = $1/6 R_o$, 2) = $1/12 R_o$, 3) = $1/24 R_o$, 4) = $1/48 R_o$, 5) = $1/96 R_o$, 6) = $1/192 R_o$; 7) = $1/384 R_o$, 8) = $1/768 R_o$.

Таблица – Спрявление дуг методом последовательного уменьшения их длин вдвое до полного равенства с длиной хорды общего сектора (точно до 5-го знака после запятой при радиусе окружности $R = 58$)

№ сектора	Часть R_o	Угол сектора	Длина дуги сектора	Длина хорды сектора	Примечания
1	6	$360^\circ / 6 = 60^\circ$	60,74	$58 = R$	
2	12	$360^\circ / 12 = 30^\circ$	30,36	30,02	
3	24	$360^\circ / 24 = 15^\circ$	15,18	15,14	
4	48	$360^\circ / 48 = 7,5^\circ$	7,59	7,58	
5	96	$360^\circ / 96 = 3,75^\circ$	3,796	3,795	
6	192	$360^\circ / 192 = 1,875^\circ$	1,898	1,897	
7	384	$360^\circ / 384 = 0,9375^\circ$	0,94902	0,94901	
8	768	$360^\circ / 768 = 0,46875^\circ$	0,47451	0,47451	

$R = 58$, $1/2R = 29$. Сектор 8): угол = $360^\circ/768 = 0,46875^\circ$ дуга = **0,47451** хорда = **0,47451**; $R_o = 2\pi R = 364,42474$; $R_o = 8$ -я хорда **0, 47451** $\times 768 = 364,42368$; разница = **0,00106**.

Предполагаемая площадь искомого квадрата **SKFTV**, при равенстве с $S_o = \pi R^2 = 10568,31768$.

По теореме Архимеда площадь **S** прямоугольного треугольника, у которого один катет равен **R**, а второй – спрямленной длине окружности **Po** данного круга **O**, равна: $S = P_o \times 1/2R = 364,42368 \times 1/2R = 10568,28672$; $S_o = 10568,31768$; $S = 10568,28672$; разница = **0,03096**.

Следовательно, при радиусе окружности **R = 58** длина стороны **KV** искомого квадрата **KFTV** равна: $L_{KV} = \sqrt{S_o} = \sqrt{10568,31768} = 102,80232$.

Примечание: Отношение **R** к стороне **KV** искомого квадрата **KFTV** равно новому в геометрии найденному нами числу, которое мы предлагаем обозначить как **Ў**.

$$\mathbf{\mathring{U}} = KV/R = 102,80232 / 58 = \underline{1,77245}.$$

Это отношение **R** к длине стороны искомого квадрата, равновеликого площадью данному кругу, является единым для любого значения **R** данного круга.

Например: **R = 93**. Следовательно, при радиусе окружности **R = 93** длина стороны **KV** искомого квадрата **KFTV** равна: $L_{KV} = \sqrt{S_o} = \sqrt{27171,63486} = 164,83820$; $\mathring{U} = KV/R = 164,83820 / 93 = \underline{1,77245}$.

Отсюда следует, что умножив радиус любого данного круга на число **Ў**, мы легко можем вычислить длину стороны искомого квадрата, равного своей площадью площади данного круга, и соответственно саму площадь искомого квадрата:

$$KV = R \cdot \mathring{U}; SKFTV = KV^2; SKFTV = S_o.$$

Заключение. Задача о квадратуре круга в соответствии с её условиями решена двумя способами: путём построения квадрата, равновеликого площадью данному кругу, а также путём спрямления окружности и вычисления длины стороны искомого квадрата. Впервые найдено и введено в практику геометрических построений число **Ў**, умножив на которое значение радиуса данного круга, получаем с достаточной для практики архитектуры и строительства точностью значение площади квадрата, равновеликого площадью данному кругу.

Литература

1. Рудио, Ф. О квадратуре круга (Архимед, Гюйгенс, Ламберт, Лежандр) / Ф. Рудио. – Изд. 3-е. – М.–Л. : ОГИЗ, 1936. – 237 с.
2. Адамар, Ж. Элементарная геометрия / Ж. Адамар. – М. : ОГИЗ, 1948. – Ч. 1. – 608 с.
3. Белозеров, С. Е. Пять знаменитых задач древности (История и современная теория) / С. Е. Белозеров. – Ростов : Изд-во Ростовского ун-та, 1975. – 320 с.

Персоналии

УДК 512.542.66*В.М.Селькин

Селькин Вадим Михайлович (к 30-летию научно-педагогической деятельности)

А.Ф. ВАСИЛЬЕВ

В 2022 г. исполнилось 30 лет научно-педагогической деятельности В.М. Селькина.

Ключевые слова: В.М. Селькин, теории классов групп, алгебраические системы.

2022 marked 30 years of V.M. Selkin's scientific and pedagogical activity.

Keywords: V.M. Selkin, theories of group classes, algebraic systems.

У теории групп три исторических корня: теория алгебраических уравнений, теория чисел и геометрия. Математики, стоящие у истоков теории групп, – это Леонард Эйлер, Карл Фридрих Гаусс, Жозеф Луи Лагранж, Нильс Хенрик Абель и Эварист Галуа. В историю советской и мировой математики вошел крупный алгебраист, организатор теоретико-групповых исследований. О.Ю. Шмидт (основоположник московской алгебраической школы). Учеником О.Ю. Шмидта являлся С.А. Чунихин, научные исследования которого посвящены теории конечных групп, который стал основателем алгебраической школы в городе Гомеле.

Дальнейшее развитие эта школа получила под руководство Л.А. Шеметкова (доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, Заслуженный деятель науки Республики Беларусь). В 80-е гг. XX в. он совместно с А.Н. Скибой (доктор физико-математических наук, профессор) создал новое направление в алгебре – теорию формаций алгебраических систем, основы которой представлены в книге «Формации алгебраических систем» (Москва, «Наука», 1989 г.). Идеи и результаты этой книги нашли применение в исследованиях многих авторов по теории формаций конечномерных алгебр Ли и их обобщений, теории n -арных групп, Ω -групп, в теории формальных языков. К ним обращались А. Баллистер-Болинше, В. Дерк, и Т. Хоукс, Ш. Бэль, А. Кребс, С. Райффершайд, Д.-Е. Пин, К. Солер-Эскрива.

Селькин Вадим Михайлович родился 15 августа 1969 г. в г. Гомеле Республики Беларусь.

В 1992 г. Вадим Селькин закончил математический факультет Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины с дипломом с отличием, в 1996 – аспирантуру ГГУ им. Ф. Скорины по специальности математическая логика, алгебра и теория чисел под руководством А.Н. Скибы. После окончания аспирантуры работает в ГГУ им. Ф. Скорины.

Интерес к исследованиям по теории формаций алгебраических систем В. Селькин проявил будучи еще студентом ГГУ им. Франциска Скорины при написании дипломной работы «Композиционные формации конечных групп» (1992), научный руководитель А.Н. Скиба (основатель научной школы «Алгебра классов»).

В 1996 г. В.М. Селькин защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Наследственные и нормально наследственные критические локальные формации». В 2011 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук «Однопорожденные формации и их факторизация» (научный консультант Скиба А.Н.).

Вся научно-педагогическая деятельность В.М. Селькина связана с Гомельским государственным университетом имени Франциска Скорины: ассистент кафедры (1992), старший преподаватель (1993), кандидат физико-математических наук (1996), доцент (1998), замести-

тель декана математического факультета (1998–2012), доктор физико-математических наук (2012), заведующий кафедрой (2012 по настоящее время). Автор более 60 публикаций, в том числе трех монографий.

Активную научную работу успешно совмещает с учебно-методической и учебно-воспитательной работой в университете. В профессиональной педагогической деятельности помимо классических учебных дисциплин по математике проводит занятия по информационным технологиям, программированию, компьютерной графике, современным проблемам информационных процессов. В учебной деятельности использует современные формы обучения, разрабатывает учебно-методические комплексы по преподаваемым дисциплинам. Осуществлял научное руководство курсовыми и дипломными работами студентов, а также научными работами магистрантов и аспирантов.

В.М. Селькин работает по научным направлениям «Теория групп и ее приложения», «Теория классов групп и других алгебраических систем», «Алгебра, геометрия и теория чисел». Развивая эти направления, его достижения заключались в том, что впервые:

- описаны основные классы неприводимых τ -замкнутых ω -насыщенных формаций;
- описаны общие свойства критических τ -замкнутых ω -насыщенных формаций;
- решена проблема Л.А. Шеметкова об описании минимальных τ -замкнутых ω -насыщенных не Н-формаций;
- доказана теорема о существовании минимальных τ -замкнутых ω -насыщенных не Н-формаций (решение ослабленной проблемы Гашюца в классе разрешимо ω -насыщенных формаций);
- решена проблема Л.А. Шеметкова и А.Н. Скибы о разрешимо ω -насыщенности первого сомножителя факторизации разрешимо ω -насыщенной формации;
- решена проблема Л.А. Шеметкова и А.Н. Скибы об описании несократимых факторизаций ограниченных и однопорожденных разрешимо ω -насыщенных формаций;
- доказаны теоремы об однозначной определимости неразложимых сомножителей факторизаций ограниченных и однопорожденных разрешимо ω -насыщенных формаций;
- рассмотрен ряд приложений, полученных из описания несократимых факторизаций ограниченных и однопорожденных разрешимо ω -насыщенных формаций.

Все эти результаты имеют теоретический характер и хороший потенциал для дальнейшего развития.

Приведем наиболее значимые публикации В.М. Селькина в отмеченных выше направлениях.

Статьи в научных журналах:

1. Селькин, В. М. О существовании минимальных локальных нормально наследственных не Н-формаций / В. М. Селькин // Доклады НАН Беларуси. – 1999. – № 3. – С. 29–31.
2. Selkin, V. V. On minimal τ -closed ω -local non-nilpotent formations / V. M. Selkin // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2000. – № 3 (16). – С. 48–51.
3. Селькин, В. М. Об одной проблеме теории ω -критических формаций / В. М. Селькин // Доклады НАН Беларуси. – 2001. – Т. 45, № 5. – С. 9–12.
4. Selkin, V. M. On non-trivial factorizations of one-generated ω saturated formations / V. M. Selkin, A. N. Skiba // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2001. – № 16. – С. 207–208.
5. Селькин, В. М. Формации с единственной максимальной τ -замкнутой ω -локальной подформацией / В. М. Селькин // Весці НАН Беларусі. – 2002. – № 1. – С. 25–29.
6. Селькин, В. М. Минимальные наследственные ω -локальные не Н-формации / В. М. Селькин // Украинский матем. журнал. – 2002. – Т. 54, № 3. – С. 45–56.
7. Селькин, В. М. Об одной проблеме теории ω -локальных формаций / В. М. Селькин // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2005. – № 32. – С. 166–168.
8. Belous, L. I. On minimal τ -closed ω -composition non H-formations / L. I. Belous, V. M. Selkin // Algebra and Discrete mathem. – 2006. – № 4. – P. 1–11.
9. Белоус, Л. И. Об одном классе критических ω -композиционных формаций / Л. И. Белоус, В. М. Селькин, А. Н. Скиба // Доклады НАН Беларуси. – 2006. – Т. 50, № 6. – С. 36–40.

10. Guo, W. Factorization theory of one-generated Bear ω -local formations / W. Guo, V. M. Selkin, K. P. Shum // *Communications in Algebra*. – 2007. – V. 35, № 9. – P. 2901–2931.
11. Селькин, В. М. О минимальных τ -замкнутых ω -локальных не метанильпотентных формациях / В. М. Селькин // *Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины*. – 2008. – № 47. – С. 184–188.
12. Селькин, В. М. О минимальных τ -замкнутых ω -локальных не Н-формациях / В. М. Селькин // *Труды Ин-та матем. НАН Беларуси*. – 2008. – Т. 16, № 1. – С. 81–85.
13. Селькин, В. М. Про існування мінімальних τ -замкнутих ω локальних не Н-формацій / В. М. Селькин // *Український матем. журнал*. – 2010. – Т. 62, № 4. – С. 572–576.
14. Селькин, В. М. О факторизациях подформаций однопорожденных наследственных ω -насыщенных формаций / В. М. Селькин // *Труды Ин-та матем. и мех. Уральского отделения РАН*. – 2012. – Т. 18, № 2. – С. 232–237.
15. Селькин, В. М. Об одном свойстве произведения неединичных формаций / В. М. Селькин // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2012. – № 1 (10). – С. 101–104.
16. Селькин, В. М. О несократимых факторизациях ограниченных ω -композиционных формациях / В. М. Селькин // *Доклады НАН Беларуси*. – 2012. – Т. 56, № 2. – С. 31–34.
17. Selkin, V. M. On factorizations of limited solubly ω -saturated formations / V. M. Selkin // *Algebra and Discrete Mathem.* – 2012. – V.13, № 2. – P. 247–255.
18. Selkin, V. M. On minimal τ -closed ω -local Н-formations / V. M. Selkin // *Algebra Colloquim.* – 2012. – V. 19, № 4. – P. 1155–1165.
- Монография:
 19. Селькин, В. М. Однопорожденные формации / В. М. Селькин. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2012. – 208 с.
- Материалы докладов конференций:
 20. Селькин, В. М. Об одном вопросе теории ω -локальных формаций / В. М. Селькин // *Материалы Междунар. науч. конф., посвящ. 80-летию профессора Вольфганга Гашюца*. – Гомель, 2000. – С. 49–51.
 21. Селькин, В. М. Описание минимальных ω -локальных не Н-формаций / В. М. Селькин // *Материалы Белорусской матем. конф.* – Минск, 2000. – С. 71.
 22. Selkin, V. M. On factorizations of saturated formations / V. M. Selkin, A. N. Skiba // *Groups and group rings : The ninth International conference, Bialystok, June 18–23*. – Bialystok, 2001. – P. 30–31.
 23. Селькин, В. М. О существовании минимальных τ -замкнутых ω -локальных не Н-формаций / В. М. Селькин // *III Международная алгебраическая конференция, Суммы, 2–8 июля 2001*. – Суммы, 2001. – С. 242.
 24. Селькин, В. М. О факторизациях Н p -насыщенных формаций конечных групп / В. М. Селькин, А. Н. Скиба // *III Международная алгебраическая конференция, Суммы, 2–8 июля 2001*. – Суммы, 2001. – С. 243.

Технический редактор: *О.Г. Шляхтова*. Корректоры: *Е.Н. Ермакова, И.А. Хорсун*

Подписано в печать 02.06.2023. Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 15,11. Уч.-изд. л. 13,16. Тираж 100 экз. Заказ № 307.
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.