

ИЗВЕСТИЯ

Гомельского государственного университета
имени Ф. Скорины

№ 3(132)

Естественные науки

Гомельский государственный университет
имени Ф. Скорины

ИЗВЕСТИЯ

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

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор С.А. ХАХОМОВ,
д-р. физ.-мат. наук, доцент
Зам. главн. редактора О.М. ДЕМИДЕНКО,
д-р тех. наук, профессор
Зам. главн. редактора М.В. СЕЛЬКИН,
д-р физ.-мат. наук, профессор

Члены редакционной коллегии:

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

Члены редакционной коллегии по естественным наукам:

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

Francisk Skorina Gomel State University

PROCEEDINGS

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

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

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

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief S.A. KHAKHOMOV,
Sc. D., Docent of Physics
Deputy editor-in-chief O.M. DEMIDENKO,
Sc. D., Professor
Deputy editor-in-chief M.V. SELKIN,
Sc. D., Professor

Members of editorial board:

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

Members of editorial board for the natural sciences

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

© Учреждение образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины», 2022
© Educational Establishment «Francisk Skorina Gomel State
University», 2022

ИЗВЕСТИЯ

Гомельского государственного университета
имени Ф. Скорины

НАУЧНЫЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с 1999 г.
Выходит 6 раз в год

• 2022, № 3 (132) •

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ:

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

СОДЕРЖАНИЕ

Биология

Галиновский Н.Г., Демиденко О.М., Потапов Д.В., Аверин В.С. <i>Карабидокомплексы (Coleoptera, Carabidae) в окрестностях скважин Южно-Осташковского нефтяного месторождения (Республика Беларусь)</i>	5
Галиновский Н.Г., Крицкая А.Н. <i>Зоогеографические элементы сообществ герпетобионтных жесткокрылых (Hexapoda, Coleoptera), обитающих на отвалах ОАО «Гомельский химический завод»</i>	12
Грапов А.А. <i>Модификация животных жиров с целью оценки перспективы их использования в экологичных смазочных материалах</i>	17
Гулаков А.В., Дроздов Д.Н. <i>Половозрастная динамика поглощенной дозы облучения дикого кабана, обитающего на территории радиоактивного загрязнения</i>	24
Дайнеко Н.М., Концевая И.И., Тимофеев С.Ф., Козел М.С. <i>Влияние микробных био-препаратов на биогенность почв в посевах ячменя</i>	29
Дайнеко Н.М., Тимофеев С.Ф. <i>Качество травяного корма при одноукосном использовании пойменного луга р. Сож</i>	36
Зяцьков С.А., Гончаренко Г.Г. <i>Молекулярно-генетическая идентификация Felis catus акромеланистического окраса</i>	42
Калиниченко С.А., Никитин А.Н., Шуранкова О.А. <i>Влияние экологических условий на биологическую доступность и накопление ¹³⁷Cs луговыми злаками зоны отчуждения</i> .	48
Климович Л.К., Трухоновец В.В. <i>Демонстрационные объекты по лесным культурам в Корневской экспериментальной лесной базе</i>	55
Концевая И.И. <i>Определение регенерационной способности междоузлий культуре in vitro рода Betula L.</i>	60
Крицкая А.Н., Галиновский Н.Г. <i>Биотопический преферендум герпетобионтных жесткокрылых – обитателей отвалов ОАО «Гомельский химический завод»</i>	66
Макаренко Т.В., Пырх О.В., Хаданович А.В., Парфенкова А.С. <i>Мониторинг содержания никеля и хрома в мягких тканях перловицы обыкновенной в водоемах города Гомеля и прилегающих территорий</i>	72
Храмченкова О.М. <i>Антиоксидантная активность экстрактов из пяти видов лишайников</i>	77

ИНФОРМАТИКА	
Аксёнова Н.А., Демиденко О.М., Воруев А.В. <i>Реализация системы определения эмоций студентов по мимике лица</i>	82
Козлова Е.И., Сивенкова В.Н., Головатый А.И., Чуйко В.А. <i>Подготовка изображений отпечатков пальцев к хранению в базе данных дактилоскопических изображений</i>	88
Сукач Е.И., Бурикин В.Ю., Кончиц А.А. <i>Об опыте получения, хранения и анализа Big Data с удаленных сайтов</i>	93
МАТЕМАТИКА	
Бородич Р.В., Селькин М.В., Бородич Е.Н., Бузланов А.В. <i>О пересечении A-допустимых абнормальных подгрупп, не содержащих подгруппу Фиттинга</i>	97
Бураковский В.В. <i>Симметричная маркерная кольцевая локальная сеть с односторонними буферами</i>	102
Гальмак А.М., Кулаженко Ю.И., Селькин М.В. <i>Идемпотенты в полиадических группах специального вида</i>	106
Жогаль С.И., Жогаль С.П., Алёшин Н.А., Орлов В.В. <i>Эффективная адаптация скорости машинного обучения на основе иерархического подхода к оптимизации</i>	113
ФИЗИКА	
Емельянов В.А., Шершнева Е.Б., Купо А.Н., Соколов С.И. <i>Изучение влияния примесей на процессы формообразования синтетического алмаза в зоне термического влияния лазерного излучения</i>	117
Маркова М.В. <i>Вынужденные колебания круговой трёхслойной пластины ступенчатопеременной толщины</i>	121
КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ	
Гончаренко Г.Г. <i>Сэнгеровская эпоха ДНК-секвенирования. К 100-летию дважды лауреата Нобелевской премии Фредерика Сэнгера</i>	128
Каморников С.Ф., Тютянов В.Н. <i>Характеризация конечных N_σ-критических групп</i>	130
ПЕРСОНАЛИИ	
Селькин М.В., Жогаль С.П., Миротин А.Р. <i>К 80-летнему юбилею Владимира Ивановича Мироненко</i>	133

PROCEEDINGS

of Francisk Skorina Gomel State University

SCIENTIFIC, PRODUCTION AND PRACTICAL JOURNAL

Published since 1999

Released bimonthly

• 2022, № 3 (132) •

NATURAL SCIENCES:

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

• MATHEMATICS • PHYSICS

CONTENTS

BIOLOGY

Galinovskiy N.G., Demidenko O.M., Potapov D.V., Averin V.S. <i>Carabid complexes (Coleoptera, Carabidae) in the vicinity of the wells of Yuzhno-Ostashkovskoye oil field (Republic of Belarus)</i>	5
Galinovskiy N.G., Krytskaya A.M. <i>Zoogeographical elements of the communities of herpetobiont beetles (Hexapoda, Coleoptera) living on dumps of JSC «Gomel Chemical Plant»..</i>	12
Grapov A.A. <i>Modification of animal fats in order to assess the prospects for their use in environmental lubricants</i>	17
Gulakov A.V., Drozdov D.N. <i>Sex and age dynamics of the absorbed radiation dose of a wild boar inhabiting the territory of radioactive contamination</i>	24
Daineko N.M., Koncevaya I.I., Timofeev S.F., Kozel M.S. <i>The influence of microbial biologies on soil biogenicity in barley crops</i>	29
Daineko N.M., Timofeev S.F. <i>The quality of grass fodder in the single-cut use of the floodplain meadow of the river Sozh</i>	36
Ziatkov S.A., Goncharenko G.G. <i>Molecular genetic identification of Felis catus of acromelanistic color</i>	42
Kalinichenko S.A., Nikitin A.N., Shurankova O.A. <i>The influence of environmental conditions on the biological availability and accumulation of ¹³⁷Cs by wild-growing meadow grasses of the exclusion zone</i>	48
Klimovich L.K., Truhonovets V.V. <i>Demonstration objects on forest cultures in the Korenevskaya experimental forest base</i>	55
Kontsevaya I.I. <i>Determination of internodes regenerative capacity in vitro of the genus Betula L.</i>	60
Krytskaya A.M., Galinovskiy N.G. <i>Biotopic preference of herpetobiont beetles – inhabitants of dumps of JSC «Gomel Chemical Plant»</i>	66
Makarenko T.V., Pyrh O.V., Hadanovich A.V., Parfenkova A.S. <i>Monitoring of nickel and chromium content in soft tissues of pearl barley (Unio pictorum L.) in water bodies of the city of Gomel and adjacent territories</i>	72
Khramchankova V.M. <i>Antioxidant activity of extracts from five lichen species</i>	77

INFORMATION TECHNOLOGY

Aksenova N.A., Demidenko O.M., Voruev A.V. <i>Implementation of a system for determining students' emotions by their facial expressions</i>	82
---	----

Kozlova E.I., Sivenkova V.N., Holovaty A.I., Chuyko V.A. <i>Preparation of fingerprint images for storage in the database of fingerprint images</i>	88
Sukach E.I., Burikin V.Yu., Konchits A.A. <i>On the experience of receiving, storing and analyzing Big Data from remote sites</i>	93
MATHEMATICS	
Borodich R.V., Selkin M.V., Borodich E.N., Buzlanov A.V. <i>On the intersection of A-admissible abnormal subgroups not containing a Fitting subgroup</i>	97
Burakovsky V.V. <i>Symmetric token-passing ring local area network with single buffers</i>	102
Gal'mak A.M., Kulazhenko Yu.I., Selkin M.V. <i>Idempotents in polyadic groups of a special form</i>	106
Zhogal S.I., Zhogal S.P., Aleshin N.A., Orlov V.V. <i>Efficient machine learning rate adaptation based on hierarchical optimization approach</i>	113
PHYSICS	
Emelyanov V.A., Shershnev E.B., Kupo A.N., Sokolov S.I. <i>The study of the influence of impurities on the formation of synthetic diamond in the zone of thermal influence of laser radiation</i>	117
Markova M.V. <i>Forced vibrations of a circular three-layer staged-thickness plate</i>	121
ABSTRACTS	
Goncharenko G.G. <i>The Sanger era of DNA sequencing. On the 100th anniversary of twice Nobel Prize winner Frederick Sanger</i>	128
Kamornikov S.F., Tyutyaynov V.N. <i>Characterisation of finite N_σ-critical groups</i>	130
PERSONALITY	
Selkin M.V., Zhogal S.P., Mirotin A.R. <i>To the 80th anniversary of Vladimir Ivanovich Mironenko</i>	133

Биология

УДК 502.17:622.276:547.3:595.76(476.2)

Карабидокомплексы (Coleoptera, Carabidae) в окрестностях скважин Южно-Осташковского нефтяного месторождения (Республика Беларусь)

Н.Г. ГАЛИНОВСКИЙ, О.М. ДЕМИДЕНКО, Д.В. ПОТАПОВ, В.С. АВЕРИН

В статье рассматриваются особенности формирования сообществ жесткокрылых, обитающих вблизи нефтяных скважин Южно-Осташковского нефтяного месторождения Гомельской области (Республика Беларусь), которое расположено в лесном массиве. Исследования были проведены на трех стационарах (2 скважины с различной удаленностью от границы леса и контрольном – в глубине смешанного леса). Было выявлено, что в сообществах, примыкающим к нефтяным скважинам, обитает 28 видов жуужелиц из 12 родов, среди которых видовым богатством выделялись роды *Amara*, *Harpalus*, а также *Calathus* и *Carabus*. Также обнаружено статистически достоверное влияние места обитания жуужелиц на их численность. Кроме этого был зафиксирован статистически достоверный рост численности луговых и полевых видов на границе лесного массива, напрямую примыкающем к зоне отчуждения скважины (обширному голому песчаному пространству). В то же время участок с широкой полосой переходной зоны с травянистой растительностью (экотон) позволил сгладить пики численности луговых и полевых видов, ограничив их проникновение в лесную экосистему. Выявлено, что карабидокомплексы окрестностей скважин в лесных экосистемах состоят преимущественно из мезофилов и мезоксерофилов крупных и средних размеров, предпочитающих как лесные, так и луговые местообитания.

Ключевые слова: жесткокрылые, жуужелицы, карабидокомплексы, нефтяные скважины, сообщества, доминирование, экологическая структура.

The features of the formation of Coleoptera communities living near the oil wells of Yuzhno-Ostashkovskoye oil field of Gomel region (the Republic of Belarus) are studied in the article. This oil field is located in the forestland. The studies were carried out at three sites (2 wells are located at different distances from the forest border and the control one is deep in the mixed forestland). It was revealed that 28 species of ground beetles from 12 genera live in communities adjacent to oil wells, among which the genera *Amara*, *Harpalus*, as well as *Calathus* and *Carabus* were distinguished by their species richness. Also, a statistically significant effect of the habitat of ground beetles on their number was found out. In addition, a statistically significant increase in the number of meadow and field species was recorded on the border of the forest, directly adjacent to the well exclusion zone (a vast bare sandy space). At the same time, a site with a wide strip of transitional zone with herbaceous vegetation (ecotone) made it possible to smooth out the peaks in the abundance of meadow and field species, limiting their penetration into the forest ecosystem. It was revealed that the carabid complexes in the vicinity of wells in forest ecosystems consist mainly of mesophiles and mesoxerophiles of large and medium sizes, preferring both forest and meadow habitats.

Keywords: beetles, carabids, carabidocomplexes, oil wells, communities, domination, ecological structure.

Республика Беларусь является нефтедобывающей страной и разведанные запасы ее составляют порядка 51 млн. тонн, открыто 87 месторождений, из которых активно разрабатывается около 60. При этом разработка ведется как в открытых экосистемах (поймах рек, лугах, сельскохозяйственных угодьях), так и на территории лесов.

Достаточно известным фактом является то, что не только нефть и ее производные могут отрицательно воздействовать на окружающую среду путем изменения состава ее компонентов, но и сам процесс нефтедобычи и эксплуатация нефтескважин оказывает влияние на среду обитания биоты [1]–[2].

При строительстве и эксплуатации нефтяных скважин в открытых экосистемах (пойма рек) основными последствиями размещения нефтяных скважин являются сокращение растительности, запесочивание окружающей скважины территории, обеднение видового состава и

сокращение численности животных [3]–[6]. Исследования же влияния строительства и эксплуатации нефтескважин в лесных экосистемах в условиях Беларуси единичны, в связи с чем подобные изыскания достаточно актуальны, а также будут иметь высокую степень новизны и большое практическое значение для разработки мероприятий по снижению негативного воздействия процессов нефтедобычи на биоту.

Целью нашего исследования являлось изучение состояния карабидокомплексов, приуроченных к лесным экосистемам, которые непосредственно примыкают к нефтяным скважинам.

Материал и методика. Для достижения поставленной цели в условиях Южно-Осташковского нефтяного месторождения (Речицкий и Калинковичский районы Гомельской области, Республика Беларусь) были осуществлены исследования на стационарах, заложенных в 2019 г.:

1) Стационар 1 (52°22′57.1584″ с.ш.; 29°50′26.2032″ в.д.): скважина № 127 Южно-Осташковичского нефтяного месторождения (экоTON между открытой и лесной стациями);

2) Стационар 2 (52°22′57.9612″ с.ш.; 29°50′20.0868″ в.д.): скважина № 174 Южно-Осташковичского нефтяного месторождения (лесная стация, примыкающая непосредственно к зоне отчуждения нефтескважины);

3) Стационар 3 (52°22′52.1220″ с.ш.; 29°50′17.9052″ в.д.): контрольный участок, не подверженный техногенному воздействию (лесная стация).

Стационары расположены в нескольких километрах к востоку от деревни Хатыни Калинковичского района.

Учет жужелиц проводился в мае–сентябре 2019–2020 гг. при помощи почвенных ловушек. В качестве почвенных ловушек использовались полистироловые стаканы, объемом 0,5 л, на одну треть заполненные формалином. Ловушки выставлялись из расчета 20 почвенных ловушек на один стационар. При этом на участках с нефтяными скважинами ловушки выставлялись в линию по мере удаления от края отчуждения скважины (по 20 ловушек на скважину за одно посещение). Всего было обработано 21600 ловушко-суток на трех стационарах.

Первичная база жужелиц, включающая в себя данные о таксономической принадлежности, биопререферендуме, гигропререферендуме, жизненной форме и численности составляется с использованием «MS Excel». Для анализа распределений, средних, ошибок и верификации гипотез об их различиях и связях использовался язык «R». Показатели α -разнообразия в сообществах проводился с использованием программного пакета «BioDiversity Pro». Расчет индекса разнообразия Шеннона, моделей распределения проводился с использованием натурального основания логарифма. Доминирование в сообществах определялось по шкале Ренконена [7].

Результаты и обсуждение. Всего за время исследований было коллектирована 498 особей жужелиц, относящихся к 28 видам из 12 родов (таблица 1). Наиболее высоким видовым богатством выделялись роды *Amara* и *Harpalus* (по 5 видов в каждом), а также *Calathus* (4 вида) и *Carabus* (3 вида). В остальных родах было отмечено представительство по 1–2 вида (таблица 1).

Таблица 1 – Видовой состав и относительное обилие (в %) жужелиц в исследованных сообществах

Вид	Скважина		Контроль
	№ 127	№ 174	
1	2	3	4
<i>Amara aenea</i> (De Geer, 1774)	6,11	4,35	4,26
<i>Amara bifrons</i> (Gyllenhal, 1810)	1,11	0	1,06
<i>Amara communis</i> (Panzer, 1797)	1,11	3,8	6,39
<i>Amara fulva</i> (Degeer, 1774)	1,11	0,54	1,06
<i>Amara plebeja</i> (Gyllenhal, 1810)	1,67	0	0
<i>Broscus cephalotes</i> (Linnaeus, 1758)	0	4,35	0
<i>Calathus erratus</i> (Sahlberg, 1827)	40,56	17,39	4,26
<i>Calathus fuscipes</i> (Goeze, 1777)	5	1,63	1,06
<i>Calathus melanocephalus</i> (Linnaeus, 1758)	0	3,26	0
<i>Calathus micropterus</i> (Duftschmid, 1812)	18,32	17,93	21,29
<i>Carabus glabratus</i> Paykull, 1790	4,44	3,8	29,79

Окончание таблицы 1

1	2	3	4
<i>Carabus hortensis</i> Linnaeus, 1758	0	5,43	8,51
<i>Carabus nitens</i> Linnaeus, 1758	0	0,54	0
<i>Cicindela hybrida</i> Linnaeus, 1758	2,78	0	0
<i>Cicindela sylvatica</i> Linnaeus, 1758	0	3,26	0
<i>Cychrus caraboides</i> (Linnaeus, 1758)	0	0	5,32
<i>Dyschiriodes globosus</i> Herbst, 1784	0,56	0	0
<i>Harpalus anxius</i> (Duftschmid, 1812)	0,56	0	0
<i>Harpalus flavescens</i> (Piller et Mitterpacher, 1783)	2,22	9,78	0
<i>Harpalus rubripes</i> (Duftschmid, 1812)	5	11,45	5,32
<i>Harpalus rufipes</i> (De Geer, 1774)	2,78	5,43	1,06
<i>Harpalus tardus</i> (Panzer, 1797)	2,78	1,09	1,06
<i>Panagaeus bipustulatus</i> (Fabricius, 1775)	0	0,54	1,06
<i>Poecilus cupreus</i> (Linnaeus, 1758)	0	0	1,06
<i>Poecilus versicolor</i> (Sturm, 1824)	2,22	3,26	3,19
<i>Pterostichus melanarius</i> (Illiger, 1798)	0	1,63	1,06
<i>Pterostichus oblongopunctatus</i> (Fabricius, 1787)	0	0,54	3,19
<i>Synuchus vivalis</i> (Illiger, 1798)	1,67	0	0
Всего экземпляров	180	184	94
Всего видов	18	20	18
Информационное разнообразие, H'	2,098	2,557	2,263
Концентрация доминирования, D	0,209	0,097	0,148
Выравненность по Пielу, e	0,723	0,854	0,783
Видовое богатство по Маргалёфу	5,199	5,177	5,943

Исследованные стационары практически не отличались по видовому богатству между собой (число видов колебалось незначительно – от 18 до 20 видов). Что же касается численности, то стационары, размещённые вблизи нефтескважин, имели большее значение обнаруженных экземпляров, нежели контрольный участок. Данная особенность не вызывает удивления, так как хвойный лес, пусть даже и смешанный (в данном случае – сосняк зеленомошник, переходящий в сосняк черничник) как экосистема не отличается высокой степенью разнообразия беспозвоночных в целом и жесткокрылых в частности.

Для оценки влияния места обитания на численность жуелиц был проведен однофакторный дисперсионный анализ. Полученные результаты ($F = 5,1$; $p = 0,009$) свидетельствуют о достаточно высоком уровне влияния на численность места обитания жуелиц (рисунок 1).

Оценивая структуру доминирования, следует отметить, что были отмечены 2 вида жуелиц, преобладавших по численности на всех исследованных участках. Это лесной вид *Calathus micropterus* и луговой *Harpalus rubripes* (таблица 1). При этом общее число доминантов на контрольном участке леса и участке, где кромка леса примыкала к зоне отчуждения, скважины количество доминантов была наивысшей – по 6 видов. Это такие виды, как *Amara communis*, *Carabus glabratus*, *Carabus hortensis*, *Cychrus caraboides*, а также упомянутые выше 2 вида на контрольном участке и *Calathus erratus*, *Carabus hortensis*, *Harpalus flavescens*, *Harpalus rufipes* и уже отмеченные *Calathus micropterus* и *Harpalus rubripes* вблизи скважины № 174. Такая высокая численность приуроченного к открытым песчаным пространствам *Harpalus flavescens* объясняется его присутствием в начале ловушко-линии, в зоне непосредственного контакта лесного массива и зоны отчуждения нефтескважины. В окрестностях скважины № 127, на участке, отделяющем лесной массив от зоны отваловки полосой экотона, было выявлено всего 4 вида доминантов. Наряду с *Calathus micropterus* и *Harpalus rubripes* это луговые *Amara aenea* и *Calathus erratus* (таблица 1).

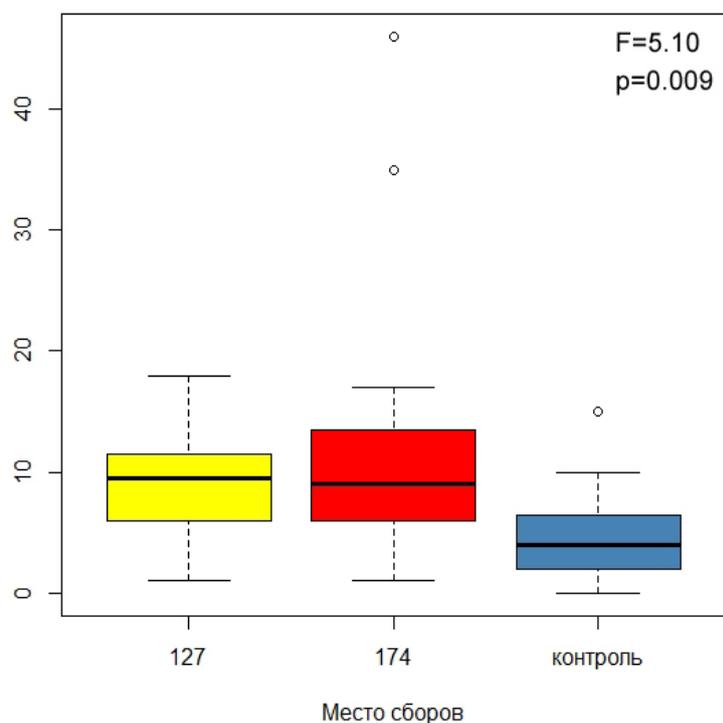
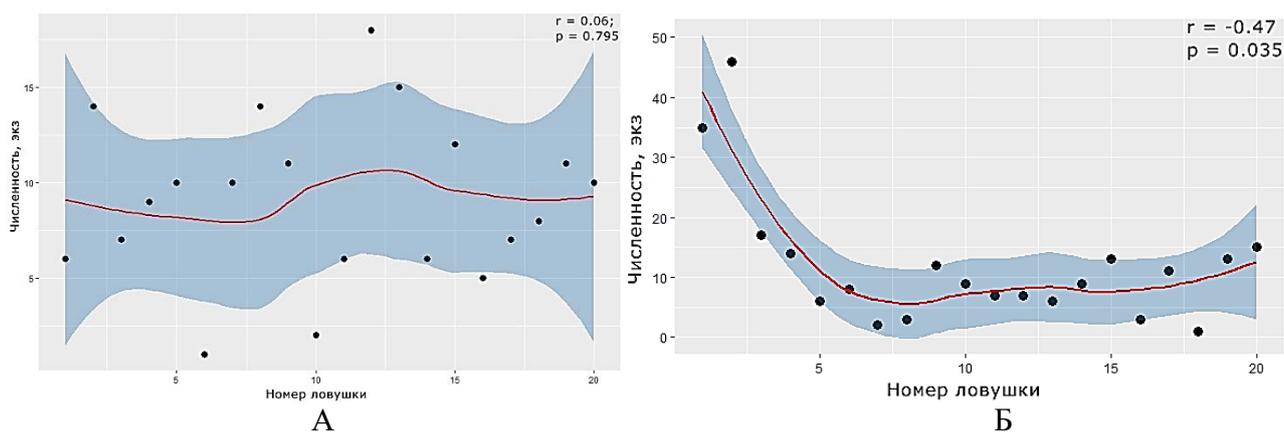


Рисунок 1 – Результаты дисперсионного анализа влияния условий обитания на численность жужелиц

Нами также были проведены исследования по зависимости численности жужелиц от удаленности от края зоны отчуждения скважины. В результате было выявлено, что в зоне экотона около скважины № 127 не наблюдается корреляционной связи между удалением от края зоны отчуждения и численностью жуков ($r = 0,06$; $p = 0,795$). Это можно объяснить достаточно однородной растительностью и условиями обитания для жужелиц на всем протяжении экотона.

В отличие от рассмотренного выше участка условия обитания жужелиц вблизи скважины № 174 (рисунок 2) значительно изменяются по мере углубления в лесной массив и численность жуков достоверно снижается ($r = -0,47$; $p = 0,035$).



А – скважина № 127; Б – скважина № 174

Рисунок 2 – Корреляционная зависимость численности жужелиц от удаленности от края зоны отчуждения нефтескважин

Подобное снижение можно объяснить высоким относительным обилием видов, связанных с открытыми песчаными пространствами (*Broscus cephalotes*, *Carabus hortensis*, *Cicindela sylvatica*) на окраине стационара, примыкающем непосредственно к песчаной зоне отваловки.

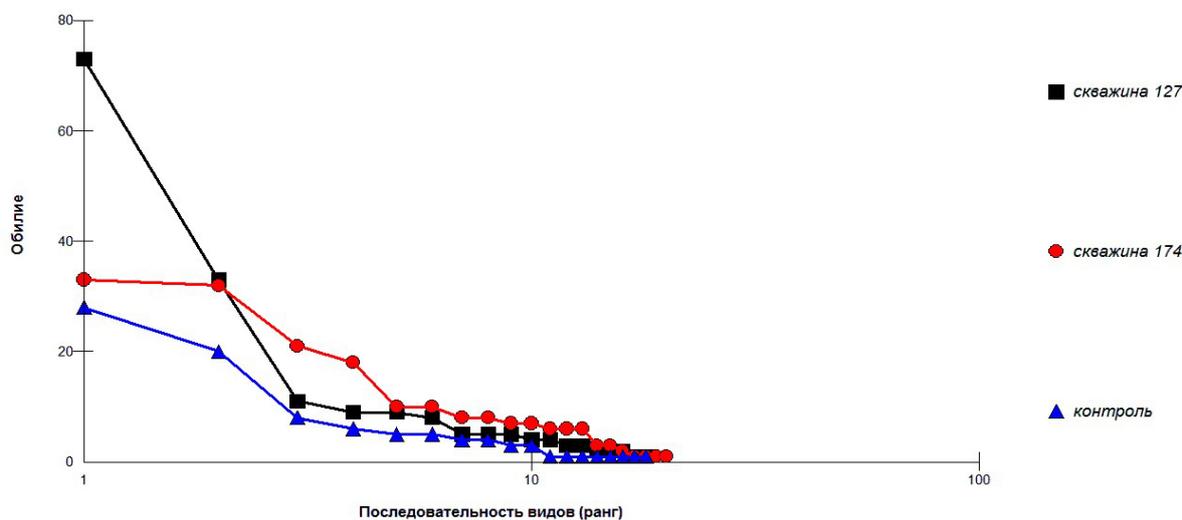


Рисунок 3 – Ранжирование видов в исследованных карабидокомплексах

При оценке ранжирования видов в исследованных сообществах было выявлено, что сообщества жесткокрылых контрольного участка и окрестностей скважины № 127, расположенное в зоне экотона, сходно с логарифмически нормальным распределением. Такой тип распределения видов характерен в своем большинстве для ненарушенных сообществ, т. е. можно предположить, что наличие широкой переходной зоны между зоной отваловки к лесному массиву нивелирует в некоторой степени техногенную трансформацию лесной экосистемы. Распределение видов в сообществе окрестностей скважины № 174 больше соответствует распределению «разломанного стержня» Макарура. Такое распределение характерно для сообществ с интенсивной межвидовой конкуренцией (рисунок 3).

Анализируя представительство экологических групп жуужелиц нами были рассмотрены гигро- и биопреферендум, а также спектр жизненных форм (таблица 2).

Таблица 2 – Экологические группы жуужелиц в исследованных сообществах

Экологическая группа	Скважины				Контроль	
	№ 124		№ 174			
	S	N	S	N	S	N
1	2	3	4	5	6	7
Гиетропреферендум						
мезогигрофилы	2	2,23	0	0	1	5,32
мезофилы	6	33,89	11	47,28	10	76,6
мезоксерофилы	7	54,44	6	40,76	6	13,83
ксерофилы	3	9,44	3	11,96	1	4,25
Биопреферендум						
лесные	3	23,33	4	27,72	5	68,09
луговые	7	19,45	8	30,43	7	17,02
полевые	8	57,22	8	41,85	6	14,89
Жизненная форма						
эпигеобинты летающие	1	2,78	1	3,26	0	0
эпигеобинты ходящие	1	4,44	3	9,78	3	43,62
геобинты бегающе-роющие	0	0	1	4,35	0	0
геобинты роющие	1	0,56	0	0	0	0
стратобинты скважники поверхностно-подстилочные	0	0	1	0,54	1	1,06
стратобинты скважники подстилочные	4	65,56	4	40,23	3	26,6
стратобинты зарывающиеся подстилично-почвенные	1	2,22	3	5,43	4	8,51
геохортобинты гарпалоидные	10	24,44	7	36,41	7	20,21
<i>Всего видов</i>	18		20		18	
<i>Всего экземпляров</i>		180		184		94

Примечание: S – число видов, N – относительное обилие, %.

Среди групп жужелиц по отношению к влажности местообитаний следует выделить мезофилов, предпочитающих станции, сбалансированные по этому параметру. Но только на контрольном участке они значительно преобладали как по видовому богатству, так и по численности (три четверти всех коллектированных особей жужелиц). На лесном участке, непосредственно прилегающем к зоне отчуждения нефтескважины, без плавного перехода по видовому богатству они также преобладали в значительной степени, но по численности мезоксерофильные виды, которые уже начинают тяготеть к более сухим местообитаниям, лишь незначительно уступили мезофилам, а в широкой зоне экотона мезоксерофильные виды начинают преобладать над мезофильными как по видовому богатству, так и по численности (таблица 2). Также необходимо отметить достаточно равномерное присутствие ксерофильных видов во всех исследованных карабидокомплексах, но в зоне интенсивной вырубki их численность значительно возрастает превышая как таковую в контроле (в два раза), так и в зоне экотона.

При рассмотрении биотопического преферендума жужелиц в сообществах окрестностей нефтескважин были выявлены только лесные, луговые и полевые виды. При этом на контрольном участке видовое богатство всех трех экологических групп было практически равно, но по численности явное и подавляющее преимущество было у лесных видов. На окраине лесного массива, прилегающего непосредственно к зоне отчуждения скважины, наблюдается резкое сокращение лесных видов как по видовому богатству, так и по численности практически в два раза при активном проникновении луговых, и в особенности, полевых видов, предпочитающих открытые пространства с преобладанием нескольких видов трав (таблица 2). В сообществе зона экотона продолжается дальнейшее сокращение лесных видов в пользу полевых, что объясняется достаточно благоприятными условиями для обитания жужелиц, тяготеющих к открытым задернованным пространствам.

Среди спектра жизненных форм в контрольном сообществе смешанного леса по видовому богатству преобладали геохортобионты гарпалоидные, представленные преимущественно жужелицами из родов *Harpalus*, но по численности они значительно уступали как крупным эпигеобионтам из рода *Carabus*, так и более мелким стратобионтам скважникам подстилочным (таблица 2). В то же время в лесном сообществе, напрямую примыкавшем к песчаной зоне отчуждения, наряду с высоким видовым богатством геохортобионты гарпалоидные также нарастили уже и свою численность, хотя по-прежнему уступая стратобионтам скважникам подстилочным при значительном сокращении таковой у крупных эпигеобионтов ходящих. В зоне экотона видовое богатство геохортобионтов гарпалоидных продолжило свой рост, но численность их несколько упала в пользу стратобионтов скважников подстилочных, обилие которых было представлено двумя третями от всех выявленных особей жужелиц (таблица 2).

Выводы. Таким образом, в результате проведенных исследований было выявлено, что:

1. Лесные сообщества жужелиц, непосредственно прилегающих к зоне отчуждения нефтяных скважин, представлено 28 видами из 12 родов, среди которых выделялись роды *Amara* и *Harpalus* (по 5 видов в каждом), а также *Calathus* (4 вида) и *Carabus* (3 вида).

2. Условия обитания жужелиц около исследованных нефтескважин статистически достоверно влияют на численность жужелиц в окрестностях нефтескважин.

3. В месте прямого прилегания песчаной зоны отчуждения к краю леса наблюдается перестройка видового состава и достоверный рост численности жужелиц (в том числе и количества доминантов), в то же время в зоне экотона таких резких изменений не выявлено.

4. В сообществе, непосредственно примыкавшем к зоне отчуждения скважины, распределение видов было наиболее характерным для биоценоза с высокой выравненностью и содержанием незанятых ниш, в отличие от зоны экотона, которая характеризовалась условиями практически не нарушенного сообщества.

5. Сообщества жужелиц окрестностей скважин Южно-Осташковского нефтяного месторождения в своем большинстве состоят из мезофилов и мезоксерофилов, видов среднего и крупного размера, предпочитающих как открытые, так и покрытые древесной растительностью местообитания с неплотной почвой, которая обладает большим количеством скважин и трещин для жизнедеятельности жуков.

Таким образом, можно сказать, что наличие широкой зоны экотона нивелировало неблагоприятное антропогенное влияние на лесных видов жуужелиц, выраженное ростом лугополевых видов в лесной экосистеме.

Литература

1. Шамраев, А. В. Влияние нефти и нефтепродуктов на различные компоненты окружающей среды / А. В. Шамраев, Т. С. Шорина // Вестник ОГУ. – 2009. – № 6 (100). – С. 642–645.
2. Хабиров, И. К. Устойчивость почвенных процессов / И. К. Хабиров, И. М. Габбасова, Ф. Х. Хазиев. – Уфа : БГАУ, 2001. – 327 с.
3. Аверин, В. С. Видовая структура сообществ мышевидных грызунов в условиях добычи нефти разными способами / В. С. Аверин, Д. В. Потапов, Н. Г. Галиновский // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2017. – № 3. – С. 5–11.
4. Галиновский, Н. Г. Карабидокомплексы окрестностей скважин Судовицкого нефтяного месторождения (Республика Беларусь) / Н. Г. Галиновский, Д. В. Потапов, В. С. Аверин // Вестник Брестского гос. ун-та им. А.С. Пушкина. – 2017. – № 2. – С. 25–32.
5. Галиновский, Н. Г. Оценка влияния обустройства нефтяных скважин на сообщества жесткокрылых (Ectognatha, Coleoptera) на примере Судовицкого нефтяного месторождения (Республика Беларусь) / Н. Г. Галиновский, О. М. Демиденко, Д. В. Потапов, В. С. Аверин // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2018. – № 3. – С. 24–29.
6. Галиновский, Н. Г. Оценка влияния высева злаковых трав в зоне отчуждения нефтяных скважин на видовую структуру сообществ жесткокрылых (Ectognatha, Coleoptera) на примере Судовицкого нефтяного месторождения (Республика Беларусь) / Н. Г. Галиновский, О. М. Демиденко, Д. В. Потапов, В. С. Аверин // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2019. – № 3. – С. 11–17.
7. Renkonen, O. Statistisch-Ökologische Untersuchungen über die terrestrische Käferwelt der finnischen Bruchmoore / O. Renkonen // Ann. Zool. – Bot. Soc. Fennicae. – 1938. – № 6. – P. 1–30.

УДК 591.9:595.76:591.524.21:504.5(476.2–21 Гомель)

Зоогеографические элементы сообществ герпетобионтных жесткокрылых (Hexapoda, Coleoptera), обитающих на отвалах ОАО «Гомельский химический завод»

Н.Г. Галиновский, А.Н. Крицкая

В статье рассматривается вопрос географического распространения герпетобионтных жесткокрылых, обитающих на отвалах фосфогипса ОАО «Гомельского химического завода». Исследования проводились с 2011 по 2013 гг. Зоогеографический анализ, как один из факторов, который способствует контролю структуры их фауны и распространения. Благодаря таким данным можно следить за стабильностью экосистем на территории города. Полученные сведения могут лечь в основу кадастра биоразнообразия фауны региона и при необходимости восстановления генезиса этой фауны.

Ключевые слова: типы ареалов, герпетобионтные жесткокрылые, отвалы фосфогипса, распространение.

The article deals with the issue of the geographical distribution of herpetobiont beetles inhabiting the phosphogypsum dumps of Gomel Chemical Plant. The studies were carried out from 2011 to 2013. Zoogeographic analysis helps to control the structure of their fauna and distribution. Thanks to such data, it is possible to monitor the stability of ecosystems in the city. The information obtained can form the basis of the cadastre of the biodiversity of the fauna of the region and, if necessary, restore the genesis of the fauna.

Keywords: range types, herpetobiont beetles, phosphogypsum dumps, beetle spread.

Введение. Мезофауна почвы включает в себя различные компоненты и почвенные жесткокрылые являются многочисленной её составляющей. Это не только многочисленная, но и весьма разнообразная группа насекомых и при этом играет огромную роль во многих наземных экосистемах. Жесткокрылые характеризуются довольно большой продолжительностью жизни, массовостью, широким ареалом. Все эти характеристики способствуют выбору их как биоиндикаторов. Сообщества герпетобионтов подвергаются влиянию климатических факторов и экологических, в том числе и со стороны постоянно развивающейся промышленности. Экологические изменения влияют так же и на видовой состав жуков и на их распространение. Мониторинг таких сообществ позволяет отслеживать изменения в фауне беспозвоночных. Ведь герпетобионты с узкой зоной толерантности могут отреагировать на какой-то фактор и уменьшиться в численности или исчезнуть. А вот виды с широкой зоной толерантности могут приспособиться к изменениям и занять чужую нишу. Среди выбранной нами группы насекомых хорошо реагируют на изменение условий среды обитания жужелицы и стафилиниды, а также муравьи [1].

Материал и методы исследований. Исследования проводились в 2011–2013 гг. на территории ОАО «Гомельский химический завод», где было выбрано 3 стационара на отвалах фосфогипса и контрольный стационар.

Стационар № 1 – участок, расположенный непосредственно у подножья отвала фосфогипса, на который до 2013 г. производился сброс фосфогипса с подвесной линии. В непосредственной близости от подошвы отвала располагается обводной канал. Наблюдается очень слабое зарастание поверхности отвала снизу. Данный стационар позволит оценить присутствие беспозвоночных, предпочитающих обитание на голых открытых участках со слабым проективным покрытием из растительности.

Стационар № 2 – участок, расположенный у подножья отвала, на который не производится сброс фосфогипса, располагается в двустах метрах от первого участка. Верхний слой почвы представляет собой фосфогипс, но в отличие от первого стационара покрыт травянистым покровом. На стационаре имеются молодая поросль осины и клена ясенелистного, кустарники. Недалеко от стационара находится обводной канал.

Стационар № 3 – участок у подножья отвала возрастом более 40 лет. Верхний горизонт почвы на глубину 5–10 см представлял собой сплошной слой фосфогипса. В различных частях отвала наблюдаются островки растительности (вейник наземный и иван-чай), в том числе и древесной (берёза), где наблюдается развитый моховой и лишайниковый покров. Так же здесь присутствуют небольшие кустарники. Недалеко от стационара располагается небольшой пруд. Сброс отходов производства на данный отвал прекращен много лет назад.

Стационар № 4 – контрольный. Представляет собой участок смешанного леса. В травянистом ярусе встречались мятлик, одуванчик лекарственный, вероника дубравная, фиалка. Подлесок представлен преимущественно крушиной ломкой. В подросте преобладали береза, сосна и дуб. В непосредственной близости от стационара находились терриконы фосфогипса. Эдификатором сообщества выступала сосна. Бонитет – 4.

Для сбора насекомых использовались почвенные ловушки. В качестве ловушек использовались полистироловые стаканчики (0,25 мл), которые закапывались линейно в почву заподлицо на расстоянии 70–100 см друг от друга. В качестве фиксирующей жидкости использовался 9 % раствор уксусной кислоты. На каждом стационаре устанавливалось по 10 ловушек. Каждые 14 дней проводилась замена ловушек. Всего за период исследований на стационарах «Отвалы» было собрано 2784 экземпляров герпетобионтных жесткокрылых, а на контрольном стационаре – 1141 экземпляр. В настоящей работе для определения типов ареалов насекомых использовали классификацию К.Б. Городкова [2]. Промежуточные данные по данному исследованию были нами опубликованы ранее [3].

Результаты и их обсуждение. В результате наших сборов на отвалах фосфогипса было обнаружено 128 видов жесткокрылых, относящихся к 23 семействам. При анализе типов распространения жесткокрылых было выделено 4 ключевые группы типов ареалов: космополитические ареалы, мультирегиональные, голарктические и палеарктические ареалы (таблица 1).

Доминантами по видовому богатству на отвалах фосфогипса являются виды, занимающие циркумареалы – 29 видов, хотя их доля особей составляет всего 7,94 %. При этом этот тип ареала включает в себя циркумтемператные виды (относительное обилие особей – 59,28 %) и циркумпозональные виды (относительное обилие особей – 40,72 %). Представителями циркумтемператных видов являются *Byrrhus pilula*, *Bembidion quadrimaculatum*, *Porcinolus murinus* и др. Представителями циркумпозональных видов являются *Chaetocnema conchinna*, *Sitona lineatus*, *Oxytelus rugosus* и др.

Субдоминантами по видовому составу являлись виды, занимающие трансареалы (25 видов) и западно-центрально-палеарктические ареалы (26 видов). При этом доля особей видов, заселяющих трансареалы, составляла 18,28 % и включала следующие зоогеографические элементы: трансевразийский температурный, трансевразийский температурно-южносибирский, трансевразийский суббореальный, транспалеарктический, транспалеарктический полизональный и транспалеарктический полизонально-южносибирский. Среди данной группы по относительному обилию доминировали транспалеарктические полизонально-южносибирские виды (*Badister bullatus*, *Microlestes minutulus*, *Poecilus versicolor*) – 59,14 %. Субдоминантами по относительному обилию (33,99 %), но доминантами по видовому богатству (10 видов) в этой же группе являлись трансевразийские температурные виды – *Drusilla canaliculata*, *Phyllobius argentatus*, *Xantholinus tricolor*.

Группа западно-центрально-палеарктических ареалов состояла из четырех зоогеографических элементов: собственно западно-центрально-палеарктических ареалы, евро-сибирско-центральноазиатские ареалы, евро-сибирско-среднеазиатские ареалы и евро-казахстанские ареалы. В данной группе доминировали виды, которые занимали евро-сибирско-центральноазиатскую область распространения как по относительному обилию – 81,42 %, так и по видовому богатству – 11 видов.

Наименьшим видовым богатством характеризовались виды, занимающие космополитические ареалы, которые в свою очередь распространены практически по всему земному шару, а так же американско-европейские ареалы, которые в основном являются антропогенными, по 2 вида каждый. Американско-европейские ареалы имеют *Ocyopus nero*, *Psyllobora vigintiduopunctata*. Космополитическое распространение имеют *Tenebrio molitor*, *Aphodius granaries*.

Таблица 1 – Распространение герпетобионтных жесткокрылых, обитающих на отвалах фосфогипса на территории «Гомельского химического завода»

Типы распространения	Число видов	Относительное обилие особей,%
Космополитические	2	0,07
Мультирегиональные	10	33,01
Мультирегиональный	5	98,26
Бирегиональный	5	1,74
Голарктические		
Циркумареалы	29	7,94
Циркумтемператный	21	59,28
Циркумполоизональный	8	40,72
Американо-европейские	2	0,11
Палеарктические		
Трансарреалы	25	18,28
Трансевразийский температурный	10	33,99
Трансевразийский температурно-южносибирский	2	0,59
Трансевразийский суббореальный	6	3,93
Транспалеарктический	1	0,39
Транспалеарктический полизональный	3	1,96
Транспалеарктический полизонально-южносибирский	3	59,14
Западно-центрально-палеарктические	26	13,15
Собственно западно-центрально-палеарктический	7	13,11
Евро-сибирско-центральноазиатский	11	81,42
Евро-сибирско-среднеазиатский	1	0,27
Евро-казахстанский	7	5,2
Евро-сибирские ареалы	10	16,88
Евро-ленский	1	1,06
Евро-байкальский	7	98,3
Евро-обский	2	0,64
Западно-палеарктические	5	0,61
Собственно западно-палеарктический	5	100
Евро-кавказский	13	1,44
Европейские	6	8,51
Всего видов	128	
Всего экземпляров		2784

Доминирующими видами по относительному обилию особей являлись виды, занимающие мультирегиональные ареалы – 33,01 % с видовым богатством – 10 видов. К этой группе относят собственно мультирегиональные (*Syncalipta spinosa*, *Silvanus bidentatus* и др.) – доля особей 98,26 % и бирегиональные ареалы (*Notoxus monoceros*, *Stibus testaceus*, *Tachyporus pusillus* и др.) – доля особей 1,74 %. Наличие такой высокой доли особей в данной группе ареалов может быть за счет заселения двух и более разделенных между собой пространств.

Трансарреалы являются субдоминантами по относительному обилию – 18,28 %. Виды из этой группы распространены вдоль Евразии, а часть таких видов встречается в Северной Африке. Евро-сибирские ареалы так же можно отнести к субдоминантам – 16,88 %. Комплекс евро-сибирского типа распространения включает 3 зоогеографических элемента: евро-ленский (*Silvanus unidentatus*), евро-байкальский (*Calathus erratus*, *Synuchus vivalis*) и евро-обский (*Lamprobyrrhulus nitidus*, *Atheta fungi*). Внутри евро-сибирской группы ареалов доминировали виды с евро-байкальским типом ареала как по видовому богатству (7 видов), так и по доли особей (98,3 %).

Палеарктический тип распространения так же включает в себя евро-кавказские и европейские ареалы. Евро-кавказский тип ареала составляет всего 1,44 % и включает 13 видов (*Acupalpus flavicollis*, *Pterostichus niger* и др.). Относительная доля видов, обитающих на европейском ареале, составляет 8,51 %, что выше даже, чем у циркумареалов. Хотя по видовому богатству европейский тип уступает циркумареалам почти в 5 раз и включает в себя 6 ви-

дов (*Morychus aeneus*, *Carabus hortensis*, *Dyschirius arenosus*).

В результате наших сборов на контрольном участке за изучаемый период было обнаружено 120 видов жесткокрылых, относящихся к 27 семействам. При анализе типов распространения жесткокрылых было выделено 5 ключевые группы типов ареалов: космополитические ареалы, мультирегиональные, голарктические, субголарктические и палеарктические ареалы (таблица 2).

Таблица 2 – Распространение герпетобионтных жесткокрылых, обитающих на контрольном участке

Типы распространения	Число видов	Относительное обилие особей, %
Космополитические	1	0,09
Мультирегиональные	9	1,49
Мультирегиональный	3	17,65
Бирегиональный	6	82,35
Голарктические		
Циркумареалы	26	6,92
Циркумпольярный бореальный	1	1,27
Циркумтемператный	17	68,35
Циркумпользональный	8	30,38
Американо-европейские	3	1,58
Субголарктические	1	0,09
Палеарктические		
Трансаралы	21	18,49
Трансевразийский температурный	9	67,3
Трансевразийский температурно-южносибирский	2	2,37
Трансевразийский суббореальный	3	7,58
Транспалеарктический полизональный	4	8,53
Транспалеарктический полизонально-южносибирский	3	14,22
Западно-центрально-палеарктические	29	27,52
Собственно западно-центрально-палеарктический	9	34,4
Евро-сибирско-центральноазиатский	11	42,68
Евро-сибирско-среднеазиатский	2	1,27
Евро-сибирско-умеренный	1	0,32
Евро-казахстанский	6	21,34
Евро-сибирские	11	17,17
Собственно евро-сибирский	1	1,02
Евро-ленский	2	78,06
Евро-байкальский	7	20,41
Евро-обский	1	0,51
Западно-палеарктические	2	0,18
Собственно западно-палеарктический	2	100
Евро-кавказский	8	9,38
Европейские	9	17,09
Всего видов	120	
Всего экземпляров		1141

Доминировали на контрольном участке виды с западно-центрально-палеарктическим типом ареала – 29 видов при относительном обилии 27,52 %. Данная группа состояла из следующих компонентов: собственно западно-центрально-палеарктические ареалы, евро-сибирско-центральноазиатские ареалы, евро-сибирско-среднеазиатские ареалы, евро-сибирско-умеренный ареал и евро-казахстанский ареал. В данной группе лидировали по видовому составу (11 видов) и по относительному обилию (42,68 %) виды, занимающие евро-сибирско-центральноазиатские ареалы (*Harpalus rufipes*, *Notiophilus palustris*, *Geotrupes stercorosus* и др.). Субдоминантами по видовому составу были виды, которые занимают циркумареалы (26 видов) и трансареалы (21 вид). Циркумареалы с долей особей 6,92% включала три компонента – циркумпольярный бореальный (*Loricera pilicornis*), циркумтемператный (*Bembidion lampros*, *Oxypselaphus obscures*, *Hypnoideus riparius* и др.) и циркумпользональный (*Longitarsus succineus*, *Tychius picirostris* и др.).

Субдоминантами по относительному обилию на контрольном стационаре явились виды, которые распространены на трансареалах (относительное обилие – 18,49 %), евро-сибирских

ареалах (относительное обилие – 17,17 %) и европейских (относительное обилие – 17,09 %).

Жужелица *Asaphidion flavipes* имеет субголарктический тип распространения и впервые встречается на данном стационаре из 4-х выбранных территорий и в количестве 1 экземпляра, относительная доля которого составила 0,09 %. Такое же низкое значение доли особей имеет и космополитический вид *Ptinus fur* – доля особей 0,09 %. Низкое видовое богатство в количестве 2 видов с долей особей 0,18% было характерно для западно-палеарктической группы (*Longitarsus parvulus*, *Anisodactylus binitatus*).

Представители мультирегионального типа ареала имеют низкую долю особей – всего 1,49 % и состоит из мультирегионального типа (3 вида) и бирегионального типа (6 видов). Немного выше относительное обилие 1,58 % у видов, заселяющих американо-европейский ареал (*Otiorhynchus scaber*, *Otiorhynchus ovatus* и *Ocupus nero*). В наши ловушки попало 8 видов с долей особей 9,38 %, заселяющих евро-кавказский тип ареала (*Harpalus tardus*, *Leistus ferrugineus*, *Pterostichus niger* и др.).

Заключение. При проведении зоогеографического анализа герпетобионтных жесткокрылых на исследуемой территории можно говорить о преобладании видов, занимающих циркумареал по видовому богатству. А мультирегиональные виды доминировали по относительному обилию. Наименше встретившимися видами являются представители космополитических ареалов и американо-европейских как и по видовой структуре, так и по доле особей. На контрольном участке преобладают западно-центрально-палеарктические виды как по видовому богатству, так и по относительному обилию. Наименее встречаемые виды заселяют космополитический и голарктический типы ареалов.

Результаты нашего исследования по оценке зоогеографической структуры сообществ жесткокрылых показали, что в фауне герпетобионтов, обитающих на отвалах фосфогипса, преобладают виды с широкими типами распространения, хотя встречаются и с более узкими. Полученный результат зоогеографического анализа можно объяснить специфическим местом сбора материала. Узкоспециализированным насекомым тяжело приспособиться к таким нестандартным условиям существования. При этом с другой стороны, жесткокрылых, реагирующих на такие особенности, можно считать биоиндикаторами. Такие биоиндикаторы весьма полезны при оценке качества среды промышленных городов, а так же различных территорий с повышенной техногенной нагрузкой. Опыт использования насекомых в качестве биоиндикаторов уже имеется [4].

Литература

1. Петренко, А. А. Жуки-стафилиниды – индикаторы состояния биоценозов Карпатского заповедника / А. А. Петренко, В. Г. Надворный // Заповедники СССР – их настоящее и будущее. – Новгород : Новгород. гос. пед. ин-т, 1990. – Ч. 3. – С. 112–114.
2. Городков, К. Б. Типы ареалов насекомых тундры и лесных зон Европейской части СССР / К. Б. Городков // Ареалы насекомых Европейской части СССР. Атлас. Карты 179-221. – Ленинград : Наука, 1984. – С. 3–20.
3. Крицкая, А. Н. Аспекты зоогеографического распространения герпетобионтных жесткокрылых, обитающих в окрестностях фосфогипса Гомельского химического завода / А. Н. Крицкая, Н. Г. Галиновский // Молодежный сборник научных статей «Научные стремления». – 2014. № 9. – С. 5–9.
4. Неверова, О. А. Опыт использования биоиндикаторов в оценке загрязнения окружающей среды : аналит. обзор = Experience of using bioindicator stoestimate the pollution of environment : analyt. review / О. А. Неверова, Н. И. Еремеева. – Новосибирск : Гос. публич. науч.-техн. б-ка Сиб. отд-ния Рос. акад. наук, Ин-т экологии человека, 2006. – 88 с.

Модификация животных жиров с целью оценки перспективы их использования в экологичных смазочных материалах

А.А. ГРАПОВ

В настоящей работе представлена оценка перспективы использования возобновляемого природного сырья в качестве нетрадиционного основного компонента экологически чистого смазочного материала. Повышенный спрос на продукты нефтепереработки и обострение экологической ситуации привели к поиску новых компонентов смазочного состава. В качестве такого экологически чистого материала могут выступать жиры животного происхождения. Высокая биоразлагаемость и низкое токсическое воздействие на окружающую среду наряду с оптимальными физико-химическими и трибологическими характеристиками обуславливают актуальность исследований животных жиров как основных компонентов смазочного состава. В результате исследований установлено, что изучение жирнокислотного состава жиров животного происхождения позволяет выделить наиболее применимые жиры в качестве компонентов основы смазочного материала. Оценка физико-химических характеристик указывает на необходимость поиска способов модификации данного вида сырья. Для повышения окислительной стабильности предложена модификация соединениями сульфонатного типа. В ходе исследований был разработан базовый состав и получен экологически чистый смазочный материал на основе модифицированных жиров животного происхождения. Показаны перспективы использования полученного смазочного материала в различных секторах экономики.

Ключевые слова: жиры, животные жиры, базовый состав, загущающая основа, модификация, сульфонат кальция, смазочный материал.

This paper presents an assessment of the prospect for using renewable-natural raw materials as an unconventional main component of an environmentally friendly lubricant. The increased demand for refined petroleum products and the aggravation of the environmental situation led to the search for new base and thickening lubricant bases. Fats of animal origin can be used as such an environmentally friendly thickening base. High biodegradability and low toxic impact on the environment, along with optimal physico-chemical and tribological characteristics, determine the relevance of studies of animal fats as the main components of a lubricant composition. As a result of the research, it was found that the study of the fatty acid composition of animal fats makes it possible to select the most acceptable fats as a thickening base of the lubricant. Evaluation of physical and chemical characteristics indicates the need to find ways to modify natural fats. To increase oxidative stability, a method for modifying this raw material with calcium sulfonate compounds is proposed. In the course of research, a basic composition was developed and an environmentally friendly lubricant based on modified fats of animal origin was obtained. Prospects for the use of the obtained lubricant in various sectors of the economy are proposed.

Keywords: fats, animal fats, basic composition, thickening base, modification, calcium sulfonate, lubricant.

Введение. Тенденция развития техники в современном машиностроении указывает на повышенный спрос смазочных материалов. Большинство смазок, представленных на мировом рынке, основаны на продуктах нефтепереработки. Смазки на основе минеральных масел не поддаются биологическому разложению, сырье является невозобновляемым, поэтому поиск альтернативных экологически чистых смазочных составов является актуальным. Однако, экологически чистые, биоразлагаемые смазочные материалы в меньшей степени используются во всех сферах промышленности. С экологической точки зрения применение данных продуктов необходимо там, где требуется быстрая разлагаемость, например, в сельском, лесном и водном хозяйствах, мобильных гидравлических системах, строительной промышленности. Снижение мировых запасов нефти наряду с токсичным воздействием смазочных материалов, загущенными нефтепродуктами на окружающую среду, обуславливают проблему поиска нового нетрадиционного природного сырья. Поэтому, одним из решений проблем экологической безопасности и рационального природопользования является разработка смазочных составов на основе возобновляемых природных соединений. К таким соединениям можно отнести жиры животного происхождения.

Основным недостатком природных жиров является низкая окислительная и термическая стабильность, обусловленная наличием в их составе ненасыщенных жирных кислот [1]. Полученные смазочные материалы на чистых жировых основах подвержены быстрому высыханию и окислительной порче, что вызывает снижение смазочной способности со временем и образование продуктов износа на рабочих поверхностях трения. Решением данной проблемы является поиск способов химической модификации природных жиров.

В отечественной масложировой промышленности для получения специализированных жиров с заданными физико-химическими характеристиками используют различные способы модификации. Модификация природных жиров представляет собой процесс изменения физико-химических параметров путем преобразования жирнокислотного и триглицеридного состава [2]. Одним из таких способов может выступать получение стойких жидкокристаллических полимерных комплексов на основе сульфонатных соединений щелочноземельных металлов (например, сверхщелочной сульфонат кальция). Особенностью смазочных материалов, полученных на данной полимерной основе, заключается в образовании на поверхности трения граничных пленок (полимеров трения), препятствующих быстрому окислению смазки и снижающих износ деталей в период повышенной эксплуатации.

Преимущества использования смазочных материалов, загущенных природными жирами, обусловлены хорошей смазочной способностью, высокой термостойкостью, вязкостью и температурой вспышки, меньшей токсичностью, что делает данные смазки потенциальной альтернативой смазочным материалам на основе нефтяных масел.

Цель настоящей работы – разработка модификации состава и оценка перспективы использования животных жиров в экологически чистых смазочных материалах.

Методы исследований. Объектом исследования в работе служили образцы природных жиров животного происхождения (свиной, бараний, говяжий, гусиный) и полученный на их основе смазочный материал – «ЭкоЖир». Жирнокислотный состав животных жиров характеризуется преобладанием ненасыщенных (олеиновой и линолевой) и насыщенных (стеариновой и пальмитиновой) кислот. Оценка содержания жирных кислот в образцах жира проводилась методом газовой хроматографии на хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2». Анализ животных жиров и смазочного материала проводился стандартными методами [3].

На начальном этапе процесса приготовления смазочного материала осуществлялась модификация животных жиров путем введения и активации спиртового раствора сверхщелочного сульфоната кальция (спиртовой раствор сверхщелочного сульфоната кальция был экспериментально получен в ходе изучения механизмов формирования сульфонатных соединений). Наличие получившегося комплекса доказывали с помощью методов ИК-спектроскопии (ИК-фурье спектрометр NIKOLET 5700 FT-IR) и растровой электронной микроскопии (РЭМ VEGA II LSH).

Результаты исследований и их обсуждение. Из жиров животного происхождения в производстве смазок применяются говяжий и гусиный жир, конское, баранье и свиное сало и др. По химическому составу они представляют собой полные сложные эфиры глицерина и высших одноосновных карбоновых кислот. Насыщенные жирные кислоты чаще представлены миристиновой, пальмитиновой кислотами, а ненасыщенные – линолевой кислотой. Высококачественные смазочные материалы изготавливают на основе индивидуальных жирных кислот или их смесей определенного состава. Широкое применение в них получили стеариновая и пальмитиновая кислоты, выделяемые из растительных и животных жиров. Для смазочных материалов, полученных на основе данных кислот, характерны максимальные значения предела прочности, эффективной вязкости и минимальное выделение масла (расслоение) [4].

В результате исследований полученные хроматограммы образцов животных жиров представлены на рисунках 1–4.

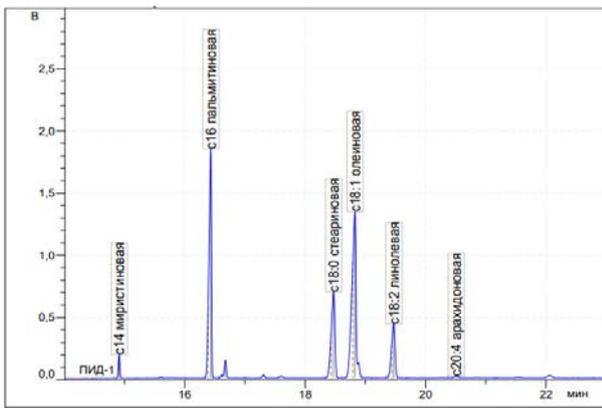


Рисунок 1 – Хроматограмма образца свиного жира

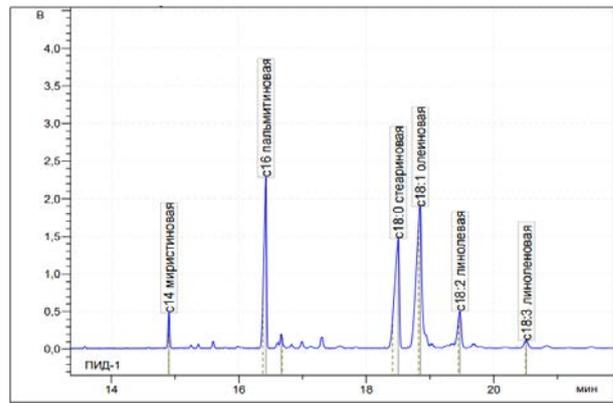


Рисунок 2 – Хроматограмма образца говяжьего жира

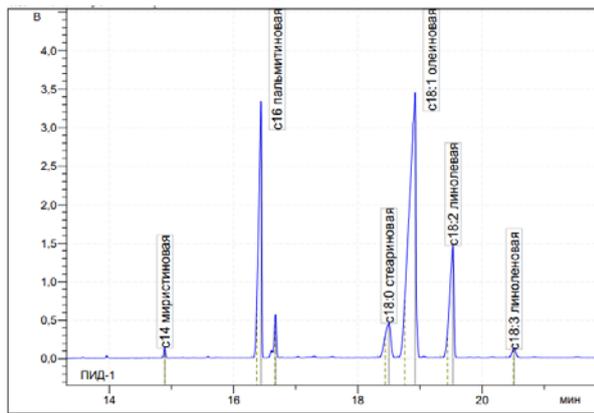


Рисунок 3 – Хроматограмма образца гусяного жира

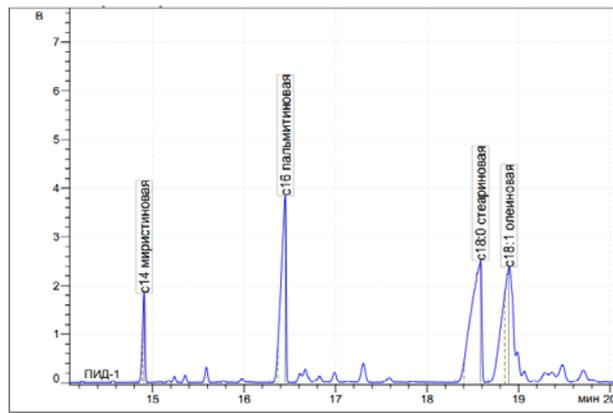


Рисунок 4 – Хроматограмма образца бараньего жира

Исходя из хроматограмм, жирнокислотный состав анализируемых образцов жира представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Жирнокислотный состав образцов животных жиров

№ п/п	Название кислот	Образцы животных жиров / Содержание (С, %)			
		Свиной	Говяжий	Гусиный	Бараний
1	C ₁₄ миристиновая	1,9	2,8	0,4	6,2
2	C ₁₆ пальмитиновая	29,9	23,2	23,6	25,4
3	C _{16:1} пальмитинолеиновая	2,2	1,0	2,3	–
4	C _{18:0} стеариновая	16,8	25,4	5,8	34,4
5	C _{18:1} олеиновая	36,0	39,7	52,7	33,8
6	C _{18:2} линолевая	9,9	6,0	14,0	–
7	C _{18:3} линоленовая	–	1,5	0,9	–
8	C _{20:4} арахидоновая	0,425	–	–	–

Содержание стеариновой кислоты в образцах животного жира от общей суммы жирных кислот составило (в %): для свиного жира – 16,8, говяжьего – 25,4, гусяного – 5,8, бараньего – 34,4.

Кроме стеариновой (C₁₈) кислоты перспективным является использование для изготовления загустителей солей пальмитиновой кислоты (C₁₆).

Содержание пальмитиновой кислоты в образцах животного жира составило (в %): для свиного жира – 29,9, говяжьего – 23,2, гусяного – 23,6, бараньего – 25,4.

Исходя из хроматограмм, жирнокислотный состав анализируемых образцов жира представлен в таблице 1.

Определение остальных кислот дает представление об окислительной стабильности, соотношении насыщенных и ненасыщенных жирных кислот жиров, что позволяет получать более качественные смазочные материалы на их основе.

В значительной степени свойства смазок зависят от показателей дисперсной фазы (загущающей основы). Физико-химические показатели природных жиров, как правило, определяются целым рядом различных факторов эндогенного и экзогенного порядка, соотношением входящих в их состав насыщенных и ненасыщенных жирных кислот [5].

В ходе исследования были определены такие показатели, как: физические – плотность, температура плавления и застывания, вязкость; химические – число омыления, йодное число, кислотное число, кислотность, перекисное число. Полученные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Физико-химические характеристики жиров животного происхождения

Характеристики		Образцы жиров			
		Свиной (С)	Говяжий (Г)	Бараний (Б)	Гусиный (Гу)
Физические	Плотность, г/см ³	0,895	0,890	0,885	0,895
	Температура плавления, С°	35	47	49	30
	Температура застывания, С°	27	36	42	15
	Вязкость, мПа·с	14	30	33	19
Химические	Число омыления, мг КОН/г	186,67	188,65	189,56	190,74
	Йодное число, % йода	56	40	39	65
	Кислотное число, мг КОН/г	2,38	2,88	2,87	0,88
	Кислотность, %	1,2	1,5	1,4	0,4
	Перекисное число, мг I ₂ /100г	0,04	0,03	0,03	0,02

Исходя из данных, представленных в таблицах 1–2, и полученных выводов по жирно-кислотному составу жиры животного происхождения не обладают оптимальными физико-химическими характеристиками и подвержены быстрому окислению. Для улучшения данных показателей разработана дальнейшая модификация данных жиров.

По своим свойствам жиры природного происхождения, а также входящие в их состав ненасыщенные жирные кислоты, обладают низкой окислительной стабильностью. С целью улучшения данного свойства проводится модификация ненасыщенных жирных кислот. Исходя из патентного поиска [6]–[9] наиболее приемлемым способом модификации природных жиров является загущение путем сульфирования.

Сульфированные высшие жирные кислоты – технический продукт взаимодействия высших жирных кислот, их эфиров, а также растительных масел и животных жиров с сульфорирующими агентами (H₂SO₄, HSO₃Cl, SO₃, олеум и др.); анионные ПАВ [10]. В качестве сульфорирующего агента использовался экспериментально полученный на основе анионного ПАВ – спиртовой раствор сверхщелочного сульфоната кальция.

Сверхщелочной сульфонат кальция – продукт химического взаимодействия анионного ПАВ (алкилбензосульфокислоты) и гидроксида кальция. Уникальность полученного соединения обусловлена высокой биоразлагаемостью (до 95 %), что делает его актуальным в рамках разработки экологически чистых смазочных составов.

В ходе модификации образцов жиров животного происхождения ключевым фактором является химическое строение реагирующих веществ и условия протекания реакции, определяющие конечный выход продукта (сульфат- или сульфопроизводное карбоновых и гидроксикарбоновых кислот). По механизму реакции ненасыщенные жирные кислоты, например, олеиновая, при взаимодействии с сульфорирующим агентом образуют сульфоэфиры (алкилбензосульфэфир олеиновой кислоты) и др. сульфосоединения, насыщенные жирные кислоты, в ходе модификации при невысокой температуре, образуются альфа-сульфокислоты (например, алкилбензосульфэфир стеариновой кислоты) [11].

С целью установления доказательств получившегося продукта по окончании синтеза жировой модификат подвергался ИК-спектрометрическому анализу.

Полученные данные представлены на рисунках 4, 5 (на примере образца свиного жира).

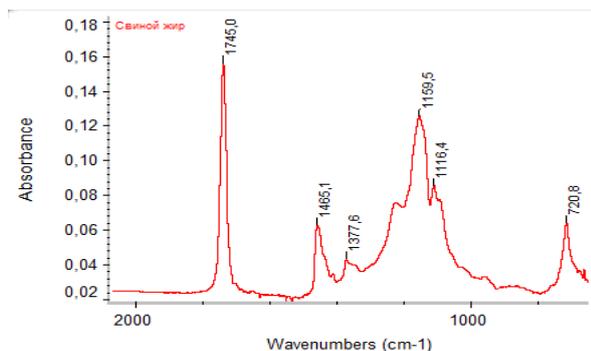


Рисунок 5 – ИК-спектр образца свиного жира

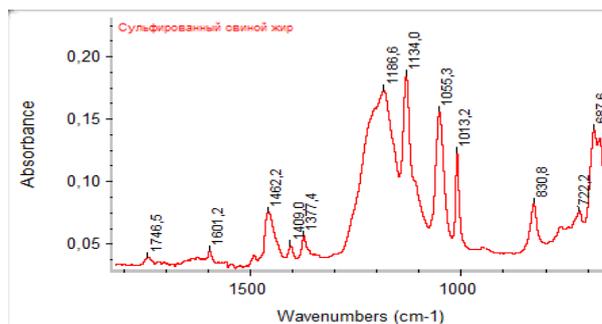


Рисунок 6 – ИК-спектр образца жирового модификата

Проведенный ИК-спектрометрический анализ показывает, что: в ИК-спектрах образцов жира присутствует полоса поглощения в области 1745 см^{-1} , возникающая в результате валентных колебаний связи ($\text{C}=\text{C}$), что свидетельствует о наличии степени ненасыщенности жирных кислот в составе жира, обуславливающие их окислительную нестабильность; в ИК-спектрах сульфонов выражены полосы поглощения в области $1048\text{--}1070$ и $1160\text{--}1250\text{ см}^{-1}$, описывающие симметричные и асимметричные валентные колебания связей ($\text{S}=\text{O}$) группы SO_3 , полосы в области $1136\text{--}1186\text{ см}^{-1}$ характеризуют колебание связи ($\text{RO-S}=\text{O-OR}$), что свидетельствует о достоверности полученного жирового модификата.

Исчезновение полосы поглощения 1745 см^{-1} и наличие полос в области $1136\text{--}1186\text{ см}^{-1}$ позволяет отобразить модификацию анионными ПАВ, сверхщелочным сульфонатом кальция, в частности, как один из способов повышения окислительной стабильности жиров природного происхождения.

На основании проведенного исследования и полученных данных был разработан базовый состав на основе образцов жирового модификата сульфонатного типа и получен экологически чистый смазочный материал «ЭкоЖир».

С целью оценки перспективы использования животных жиров полученный смазочный материал подвергался структурному и объемно-механическому анализу. Полученные данные представлены на рисунках 7, 8 и таблице 3.

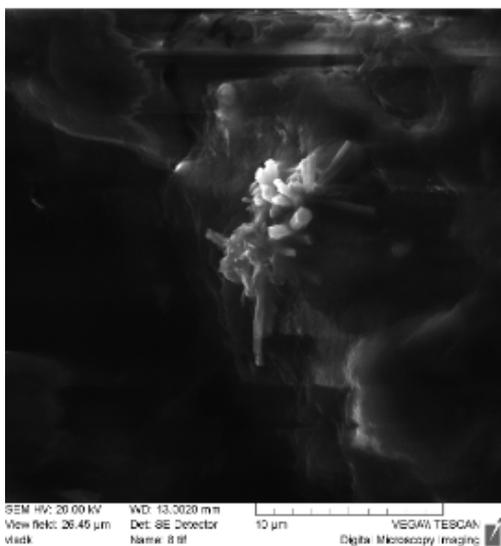


Рисунок 7 – РЭМ-снимок структурного каркаса

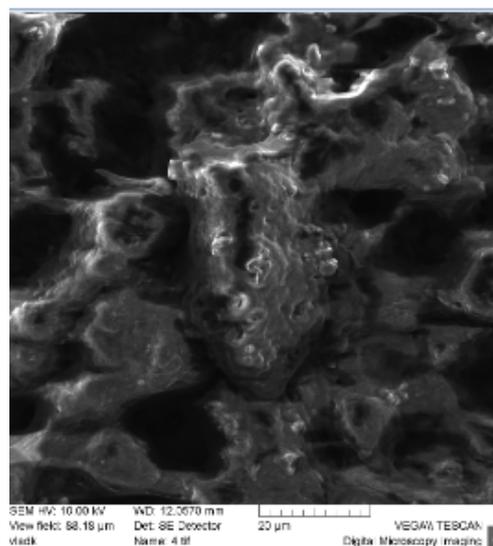


Рисунок 8 – РЭМ-снимок кальцита (ядро мицеллы жирового модификата сульфонатного типа)

Проведенный структурный анализ указывает на однородность дисперсной фазы и полноту сформированности структурного каркаса. Формирование кальцита в процессе синтеза смазочного материала показывает возможность жирового модификата сульфонатного типа к мицеллообразованию, т. е. полимерный комплекс сульфонатного типа.

Таблица 3 – Объемно-механические показатели смазочного материала «ЭкоЖир»

Характеристики		Образцы смазочного материала				
		ЭкоЖир (С)	ЭкоЖир (Г)	ЭкоЖир (Б)	ЭкоЖир (Гу)	
Объемно-механические	Предел прочности на сдвиг, Па	81	72	72	63	
	Каплевпадение, С°	210	220	203	192	
	Пенетрация, мм·10 ⁻¹	Не перемешанная	445–475	400–430	400–430	445–475
		Перемешанная	400–430	355–385	355–385	400–430
	Класс NLGL	000–00	00–0	00–0	000–00	
Коллоидная стабильность, %	6,22	5,28	5,36	5,02		
Химические	Щелочность, мг КОН/г	0,7	1	0,9	0,7	

Проведенный объемно-механический анализ и полученные данные, представленные в таблице 3, определяют область и перспективу применения смазочного материала на основе животных жиров. Механические свойства смазок определяют возможность их применения в различных узлах трения.

Предел прочности на сдвиг показывает способность смазочного материала сохранять свою структурную форму под воздействием приложенных нагрузок, т. е. способность удерживаться в негерметизированных узлах трения, не сбрасываться с движущихся деталей, не стекать с вертикальных поверхностей.

Анализ предела прочности полученного смазочного материала показывает возможность облегченного поступления к зоне трения присадок и добавок, заложенных в состав смазки, а также уменьшению износа трущихся деталей.

Температура каплевпадения определяет максимально допустимую рабочую температуру смазочного материала. Для полученного смазочного материала характерен высокий температурный режим ($T_{\text{каплевпадения}} = 220^{\circ}\text{C}$), что позволяет использовать его в высокотемпературных узлах трения.

Пенетрация и класс NLGL мера измерения консистенции смазочного материала, т. е. степени его «густоты». Исходя из данных, полученный образец можно отнести к жидким и полужидким смазкам, подходящим для работы в централизованных смазочных системах и закрытых зубчатых передачах.

Коллоидная стабильность определяется степенью совершенства структурного каркаса и вязкостью дисперсионной среды. Превышение данного показателя более чем на 30 % провоцирует резкое упрочнение и нарушение способности нормального поступления к зонам трения, что снижает вязкостные и смазочные показатели.

Щелочное число характеризует способность смазочного материала реагировать на кислотные агенты, попадающие на зоны трения, препятствует образованию коррозии на рабочей поверхности деталей.

Полученный смазочный материал может найти свое применение в качестве перспективной альтернативы смазочным маслам в закрытых зубчатых механизмах и централизованных смазочных системах, а также в качестве смазочного материала промышленного оборудования и грузового транспорта лесного и сельского хозяйств, где требуется минимальная экологическая нагрузка на окружающую среду.

Заключение. Полученный комплекс данных позволяет сделать следующие выводы:

– проведенный хроматографический анализ и полученный жирнокислотный состав указывают на перспективность использования образцов животного жира в качестве основного компонента смазочного состава;

– исследование жирнокислотного состава и физико-химических показателей выделяют проблему быстрого окисления образцов животных жиров. Решением данной проблемы является модификация состава. Установлено, что использование анионного ПАВ – сверхщелочного сульфоната кальция повышает окислительную стабильность жиров, что позволяет применять данное соединение в качестве агентов модификации состава;

– разработанный смазочный материал «ЭкоЖир» и проведенный объемно-механический анализ определяют жиры животного происхождения как перспективное не-

традиционное возобновляемое сырье в экологически чистых смазочных материалах. В рамках экономической целесообразности предлагается использовать не чистый животный жир, а продукт пищевой промышленности – жировой гудрон, что поможет решить проблему утилизации отходов производства.

Полученный смазочный материал может использоваться в качестве перспективной альтернативы смазочным маслам в закрытых зубчатых механизмах и централизованных смазочных системах, а также в качестве смазочного материала промышленного оборудования и грузового транспорта лесного и сельского хозяйств, где требуется минимальная экологическая нагрузка на окружающую среду.

Литература

1. Красильников, В. Н. Перспективы развития технологии жиров и масел / В. Н. Красильников // Прод. и ингредиенты. 2008. – № 8. – С. 56–57.
2. Матвеева, И. В. Ферментные технологии в производстве и модификации жиров современный взгляд и перспективы применения / И. В. Матвеева, Д. Кован, Х. К. Холм // Пищ. Ингредиенты : сырье и добавки. – 2010. – № 2. – С. 30–32.
3. Жиры животные топленые. Правила приемки и методы испытания : ГОСТ 8285-91. – Взамен ГОСТ 8285-74 ; введ. 01.07.1992. – М. : Стандартинформ, 2005. – 12 с.
4. Грапов, А. А. Изучение жирнокислотного состава жиров животного происхождения / А. А. Грапов // Молодежь в науке – 2021 : тез. докл. XVIII Междунар. науч. конф. молодых ученых, Минск, 27–30 сентября 2021 г. : в 2 ч. / Нац. акад. наук Беларуси, Совет молодых ученых; редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2021. – Ч. 2. Медицинские, физико-математические, физико-технические науки, химии и науки о Земле. – С. 366–368.
5. Грапов, А. А. Изучение физико-химических и трибологических характеристик жиров природного происхождения // Творчество молодых 2021: сб. науч. работ студентов, магистрантов и аспирантов / ГГУ им. Ф. Скорины; редкол.: Р. В. Бородич [и др.]. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2021. – С. 32–34.
6. Способ переэтерификации смесей триглицеридов : пат. SU 1794022 / А. Г. Сергеев, Р. Л. Перкель, Н. Л. Меламуд. – Опублик. 25.03.1974.
7. Состав для стабилизации эфиров полиненасыщенных жирных кислот : пат. SU 1775393 / И. В. Кутузов, Н. К. Бабанова, С. Н. Ельдецова, А. И. Тенцова. – Опублик. 30.05.1975.
8. Способ совместного получения метиловых эфиров высших карбоновых кислот и внутренних олефинов : пат. SU 1694570 / Б. Г. Соколов, М. Г. Кацнельсон, С. Ш. Кагна. – Опублик. 30.05.1991.
9. Описание способа сульфирования жиров : пат. 76450 / М. Д. Вульфсон, Б. И. Дуров, И. И. Этингоф, Б. С. Пригожин. – Опублик. 15.09.1924.
10. Поверхностно-активные вещества : синтез, свойства, анализ, применение / К. Р. Ланге ; под науч. ред. Л. П. Зайяенко. – СПб. : Профессия, 2007. – 240 с.
11. Грапов, А. А. Обзор способов модификации природных жиров / А. А. Грапов // Менделеевские чтения 2021 : сб. матер. Республ. науч.-практ. конф. по химии и хим. образованию, Брест, 26 февр. 2021 г. / Брест. гос. ун-т им. А.С. Пушкина ; редкол.: Э. А. Тур, Н. Ю. Колбас, В. В. Коваленко ; под общ. ред. Н. Ю. Колбас. – Брест : БрГУ, 2019. – С. 46–49.

УДК 535.231.16:599.731.1(476.2)

Половозрастная динамика поглощенной дозы облучения дикого кабана, обитающего на территории радиоактивного загрязнения

А.В. Гулаков, Д.Н. Дроздов

Показано, что вариация доз облучения дикого кабана в значительной степени зависит от индивидуальной активности животного. Такие факторы, как плотность радиоактивного загрязнения, возраст и пол животных позволяют оценить менее половины вариации дозы облучения; их использование для оценки неопределенности и прогноза возможно только в сочетании. Одним из важных факторов является пол животного, поскольку поведения самцов и самок в разные сезоны года имеют различия, которые обуславливают площадь миграции, величину и характер кормовых участков, и, как следствие, структуру кормового рациона животных.

Ключевые слова: дикий кабан, мощность дозы, цезий-137, стронций-90, мышечная ткань, костная ткань.

It is shown that the variation of doses of irradiation of wild boar largely depends on the individual activity of the animal. The factors such as the density of radioactive contamination, the age and sex of the animals make it possible to estimate less than half of the variation in radiation dose; their use for uncertainty assessment and forecasting is possible only in combination. One of the important factors is the sex of the animal, since the behavior of males and females in different seasons of the year have differences, which determine the area of migration, the size and nature of the feeding areas, and, as a result, the structure of the animal's diet.

Keywords: wild boar, dose rate, cesium-137, strontium-90, muscle tissue, bone tissue.

Введение. В настоящее время проблемы охраны природной среды и рационального использования биологических ресурсов во всем мире привлекают особое внимание. В процессе эксплуатации объектов атомной энергетики, а также при различных радиационных авариях увеличивается вероятность поступления техногенных радионуклидов в различные компоненты биосферы [1].

Катастрофа на Чернобыльской атомной электростанции является самой крупной по масштабам и нанесенному ущербу за всю историю развития атомной энергетики на планете. В результате аварии образовались значительные территории с высоким уровнем радиоактивного загрязнения. Загрязнение радиоиотопами естественных как сухопутных, так и водных биогеоценозов рассматривается как новый абиотический фактор окружающей среды.

Данным обстоятельством была продиктована необходимость проведения глобальных радиоэкологических и радиобиологических исследований по изучению закономерностей миграции техногенных радионуклидов в биосфере и действию ионизирующей радиации на живые организмы в их естественной среде обитания [2], [3].

Ионизирующая радиация является постоянно действующим фактором внешней среды, значимость которого постоянно возрастает, что требует изучения процессов взаимодействия живых организмов друг с другом и со средой их обитания в условиях радиоактивного загрязнения и повышенного радиационного фона [4]. Для современной радиоэкологии данная проблема сохраняет свою актуальность [5].

Поэтому исследование особенностей накопления и распределения радионуклидов, выявление видовых, половых, возрастных и сезонных различий в концентрировании радионуклидов в организме диких животных, обитающих в загрязненном биогеоценозе, представляет большой как научный, так и практический интерес.

Объект и методы исследований. Объектом исследований являлся дикий кабан, длительное время обитающий на территории с различным уровнем радиоактивного загрязнения.

Наиболее загрязненными радионуклидами ^{137}Cs и ^{90}Sr участками зоны отчуждения, в границах которых производилось изъятие дикого кабана, была территория междуречья При-

пяти и Днепра, расположенная на расстоянии 10–35 км от ЧАЭС. В границах этой территории находятся населенные пункты: д. Борщевка, д. Молочки, д. Погонное, д. Радин, д. Дроньки; уровень загрязнения территории ^{137}Cs составлял 1100–8184 кБк/м², ^{90}Sr 185–1633 кБк/м².

В зоне отчуждения добычу дикого кабана проводили на расстоянии 30 – 35 км от ЧАЭС, в окрестностях населенных пунктов д. Савичи, д. Жердное, плотность загрязнения ^{137}Cs 185–1480 кБк/м², ^{90}Sr 74–420 кБк/м². Полученный материал позволил провести анализ факторов формирования и вариацию дозы облучения дикого кабана, обитающего на территории Полесского радиационно-экологического заповедника.

Изъятие тканей дикого кабана и проб почвы проводили в период с 1992 по 2008 гг., в границах обозначенных территорий, которые показаны на рисунке 1.

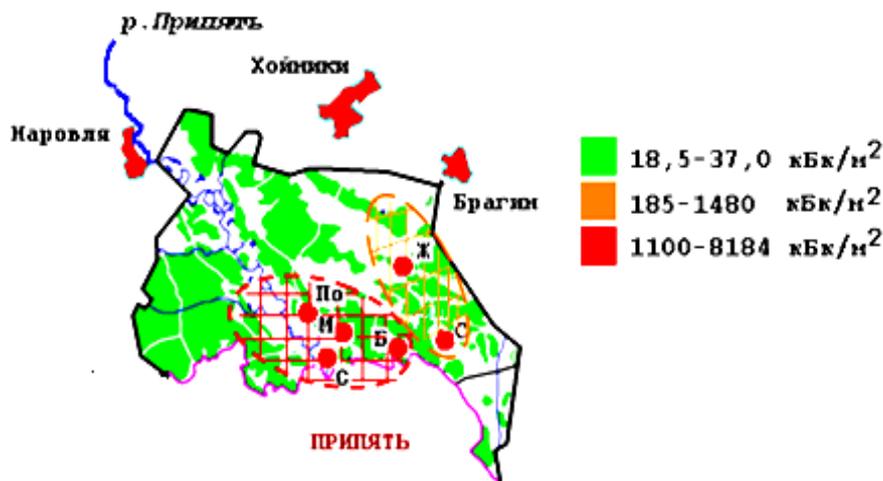


Рисунок 1 – Территория проведения исследований

Территория покрыта широколиственным и сосново-лиственным лесом с густым подростом и подростом, березовыми рощами и дубравами. По данным Полесского радиационно-экологического заповедника, насчитывается 2200 особи дикого кабана, плотность населения 10,2 особи на 1000 га. Основные места обитания различаются по сезонам: весной – это лиственный лес, зарастающая пашня и мелиоративная система; летом – бывшие сельскохозяйственные угодья, участки отселенных населенных пунктов; осенью – дубрава, зимой – смешанный хвойно-лиственный лес и сельскохозяйственные угодья.

Мощность дозы облучения складывается из дозы внешнего облучения (D_{ext}) от γ -излучающих радионуклидов, содержащихся в среде обитания (почве, воде, воздухе) и дозы внутреннего облучения (D_{int}) от радионуклидов, инкорпорированных в органах и тканях. В отдаленный период аварии на ЧАЭС доза внешнего облучения наземных позвоночных, которые обитают на территории Полесского радиационно-экологического заповедника, зависит от γ -излучения радионуклидов ^{137}Cs . Поглощенная доза облучения от поверхности почвы загрязненной радионуклидами ^{137}Cs рассчитывалась по формуле:

$$D_{\text{ext}} = \sigma \cdot K_{\gamma}, \quad (1)$$

где σ – плотность поверхностного загрязнения территории, Бк/м²; K_{γ} – дозовый фактор конверсии (коэффициент перехода «поверхностная активность – мощность дозы») при облучении от поверхности почвы, (мкГр/сут)/(Бк/м²) [6].

Для определения дозового коэффициента перехода от плотности поверхностного загрязнения ^{137}Cs к мощности поглощенной дозы внешнего облучения использовали регрессионную функцию вида:

$$K_{\gamma} = -4 \cdot 10^{-6} \cdot \ln(m) + 3 \cdot 10^{-5}, \quad (2)$$

где m – масса тела животного, кг.

Оценку дозы внутреннего облучения проводили в отношении инкорпорированного ^{137}Cs в мышечной и ^{90}Sr в костной ткани дикого кабана. При оценке допускали, что радио-

нуклиды равномерно распределены в ткани и находятся в условиях равновесия, на протяжении года концентрация радионуклидов сохраняется постоянной. Коэффициенты дозовой конверсии определили в соответствии с данными рекомендаций [6]–[8] для наземных животных, исходя из значений массы тела животного, масса самцов 320–450 кг, самок 275–375 кг. Мощность поглощенной дозы рассчитывали по формуле:

$$D_{\text{int}} = A \cdot K, \quad (3)$$

где D_{int} – мощность поглощенной дозы, мкГр/сутки; A – удельная активность ^{137}Cs в мышечной ткани, Бк/кг; K – дозовый коэффициент, равный мощности дозы, создаваемой 1 Бк/кг ^{137}Cs [9].

Дозовый коэффициент перехода от активности ^{90}Sr в костной ткани, согласно работе [6], равен $2,7 \cdot 10^{-3}$. Для определения дозового коэффициента перехода от активности инкорпорированного радионуклида ^{137}Cs к мощности поглощенной дозы внутреннего облучения использовали регрессионную функцию вида:

$$K = 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot \ln(m) + 3,6 \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

где m – масса тела животного, кг.

В связи с тем, что диких кабанов делят на определенные возрастные классы, которые учитывают массу животного, высоту в холке и число Брандта. Последнее определяли, как отношение измеренного диаметра клыка у основания и у начала шлифа. Для возрастной градации принимали следующую схему: сеголетки ~2 (до 1 года), подсвинки 1,6 (от 1 года до 2-х лет), кабаны двухлетки 1,5 (2–3 года), средне-возрастные кабаны 1,2 (3–5 лет), кабаны старшего возраста 1,01 (старше 5 лет).

Для проведения анализа данных использовали методы регрессионного анализа, параметрической и непараметрической статистики. Сравнительный анализ данных поглощенных доз облучения дикого кабана, изъятого на территории с разной плотностью загрязнения, проводили с помощью критерия Манна-Уитни. Для оценки влияния факторов на вариацию дозы облучения дикого кабана использовался двухфакторный дисперсионный анализ. Статистическая обработка данных проводилась с помощью прикладной программы Statistica 6.0.

Результаты и их обсуждение. В соответствии с характеристиками возрастных классов была сформирована таблица 1, где указаны дозы облучения животных разных возрастных классов.

Анализ квартильных размахов показал, что максимальная вариация наблюдается среди значений поглощенной дозы внутреннего облучения инкорпорированного ^{137}Cs и ^{90}Sr . Относительное квартильное отклонение принимает максимальные значение в возрастной группе кабаны двухлетки и у кабанов среднего возраста.

Таблица 1 – Возрастная динамика поглощённой дозы облучения дикого кабана, мкГр/сут

Возраст	Доза внешнего облучения (^{137}Cs)	Доза внутреннего облучения (^{137}Cs)	Доза внутреннего облучения (^{90}Sr)	Суммарная доза
Сеголетки	514,0 (480,0–544,0)*	169,3 (79,8–274,8)	34,6 (9,7–62,0)	630,8 (569,5–690,2)
Подсвинки	73,0 (73,0–82,0)	466,2 (82,5–790,8)	84,9 (30,5–101,3)	569,8 (543,3–948,8)
Кабаны двухлетки	278,5 (263,0–305,5)	82,3 (38,2–262,3)	36,8 (34,2–52,2)	421,5 (341,5–595)
Средне-возрастные кабаны	96,0 (78,3–102,5)	67,7 (27,0–169,9)	29,6 (13,4–49,1)	184,4 (134,4–324,5)
Кабаны старшего возраста	102,0 (100,0–105,5)	146,5 (106,7–173,5)	57,9 (57,7–66,5)	311,6 (269,9–335,9)

* – квартильный размах.

Разброс значений в этой группе в среднем составляет 107 %. Несколько меньшая вариация значений наблюдается у молодых животных, в среднем у сеголеток и подсвинков значений дозы облучения составляет 80 %. Минимальная вариация значений дозы наблюдается в отношении внешнего облучения у старых животных. Разброс значений в этой группе в среднем составляет 22 %.

Анализ значений суммарной дозы облучения животных разных возрастных классов показывает, что наибольшие значения доз наблюдается у молодых животных, которые не достигли репродуктивного периода. Тогда как у животных среднего возраста наблюдается трехкратное снижение суммарной дозы облучения. Анализ результатов дисперсионного анализа сочетанного действия факторов радиоактивного загрязнения территории обитания и возраста животных показал отсутствие достоверного влияния на суммарную дозу облучения ($p > 0,3$). Таким образом, динамика роста и особенности метаболизма, как производные возраста и пола животных, а также уровень радиоактивного загрязнения территории обитания не являются теми факторами, которые в полной мере обуславливают вариацию дозы облучения животных.

Сравнительный анализ центральных оценок распределения самцов и самок (таблица 2) показал достоверные различия значений суммарных доз облучения дикого кабана ($p < 0,05$).

Таблица 2 – Медиана поглощённой дозы облучения дикого кабана разного пола, мкГр/сут

Доза облучения	Зона отселения		Зона отчуждения	
	самец	самка	самец	самка
Внешняя (^{137}Cs)	103,3	96,0	268,0	207,3
Внутренняя (^{137}Cs)	98,3	43,1	192,5	154,1
Внутренняя (^{90}Sr)	44,5	32,1	57,5	39,9
Суммарная доза	246,1	171,2	518,0	401,3

Из данных, приведенных в таблице 2, видно, что суммарная доза у самцов, обитающих на территории зоны отселения, на 43,8 % больше, чем у самок, у самцов, обитающих на территории зоны отчуждения, суммарная доза на 29,2 % больше, чем у самок. Объяснить полученный эффект можно различием площади территории миграции самцов и самок. По данным радиотелеметрического анализа при наблюдении за мечеными животными показано, свиньи с выводком не покидают территорию, радиус которой больше 4 км, тогда как кабаны передвигаться за границы участка 8 км². В результате самец может задействовать в два раза больше кормовой участок [10].

Здесь следует отметить, что результаты факторного анализа пола животных не превысили 15 %, из чего следует, что пол животного так же не является ведущим фактором, который позволил бы в полной мере объяснить неопределенность оценки дозы облучения животного. Вместе с тем, нам представляется, что имеет место кумулятивное действие рассмотренных факторов, каждый из которых обладает достаточно высокой степенью вариативности. Многие авторы [11] указывают на то, что индивидуальное поведение дикого кабана связано с сезонными участками обитания, размеры которых также могут варьироваться в значительной степени. Важным, на наш взгляд, здесь является сезонная миграция и площадь кормового участка, которые невозможно оценить только по месту изъятия животного.

Заключение. Таким образом, вариация доз облучения дикого кабана в значительной степени зависит от индивидуальной активности животного. Факторы плотности радиоактивного загрязнения, возраст и пол позволяют оценить менее половины вариации дозы облучения; их использование для оценки неопределенности и прогноза возможно только в сочетании. Одним из важных факторов является пол животного, поскольку поведения самцов и самок в разные сезоны года имеют различия, которое обуславливают площадь миграции, величину и характер кормовых участков, и, как следствие структуру кормового рациона животных. В результате анализа данных установлены достоверные различия суммарных доз облучения самцов и самок, которые подтверждают это предположение.

Литература

1. Сироткин, А. Н. Радиоэкология сельскохозяйственных животных / А. Н. Сироткин, Р. Г. Ильязов. – Казань : ФЭН, 2000. – 384 с.
2. Алексахин, Р. М. Чернобыльская катастрофа и агропромышленное производство / Р. М. Алексахин // Аграрная наука. – 1996. – № 3. – С. 5–7.

3. Сельскохозяйственная радиэкология / Р. М. Алексахин [и др.] ; под ред. Р. М. Алексахина, Н. А. Корнеева. – М. : Экология, 1992. – 400 с.
4. Effects of ionizing radiation on plants and animals at levels implied by current radiation protection standards // Technical Reports Series. – 1992. – № 322. – P. 112–130.
5. Woodhead, D. S. Contamination due to radioactive materials / D. S. Woodhead // Pollution of the Seas Radioactive Materials, Heavy Metals and Oil / O. Kinne, ed., John Wiley and Sons. – N.Y., 1984. – Vol. 5, part 3. – P. 203–215.
6. МКРЗ, 2004. Международная Комиссия по Радиологической защите. Публикация 91. Основные принципы оценки воздействия ионизирующих излучений на живые организмы, за исключением человека ; пер. с англ. – М. : Изд. «Комтехпринт», 2004. –76 с.
7. Larsson, C.-M. An overview of the ERICA Integrated Approach to the assessment and management of environmental risks from ionising contaminants / C.-M. Larsson // J. Environ. Radioact. – 2008. – V. 99. – P. 1361–1518.
8. Pentreath, R. J. Concept and use of reference animals and plants / R. J. Pentreath // Protection of the Environment from Effects of Ionizing Radiation, IAEA-CN-109, IAEA. – Vienna, 2005. – P. 411–420.
9. Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки : рекомендации Р 52.18.820-2015 / Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. – Обнинск, 2015. – 60 с.
10. Царев, С. А. Биология зверей : поведение и экология кабана : учебное пособие / С. А. Царев. – М. : Изд-во ФГОУ ВПО РГФЗУ, 2011. – 163 с.
11. Царев, С. А. Кабан : социальное и территориальное поведение / С. А. Царев. – М. : Центрохотконтроль, 2000. – 113 с.

УДК 631.847.2:631.461:633.16

Влияние микробных биопрепаратов на биогенность почв в посевах ячменя

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

Проведенные исследования показали, что внесение микробных биопрепаратов увеличило численность изучаемых агрономически полезных групп в посевах ячменя по сравнению с контролем в 1,2–3,4 раза. При обработке посевов ячменя на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве микробными биопрепаратами «Полибакт», «Гордебак» и «Ресойлер» количество агрономически полезных групп микроорганизмов: целлюлозоразрушающих; фосфатмобилизирующих бактерий; а также бактерий, усваивающих минеральный азот; аммонифицирующих; олигонитрофильных; олигокарбофильных бактерий зависела от фазы развития зерновых культур. Наибольшая численность отмечена в фазе цветения, что в среднем в 1,1–1,3 раза выше, чем в фазе выхода в трубку и в 1,2–1,3 раза в фазе молочной спелости.

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

The conducted studies have shown that the introduction of microbial biologics increased the number of studied agronomically useful groups in barley crops by 1,2–3,4 times compared with the control. When processing barley crops on sod-podzolic light loamy soil with microbial biologics «Polybact», «Gordebak» and «Resoiler», the number of agronomically useful groups of microorganisms such as cellulose-destroying bacteria; phosphate-immobilizing bacteria; bacteria assimilating mineral nitrogen; ammonifying; oligonitrophilic; oligocarbofilic bacteria depended on the phase of development of grain crops: the greatest number was noted in the flowering phase, which on average, is 1,1–1,3 times higher than in the tube exit phase and 1,2–1,3 times in the milk ripeness phase.

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

Введение. Микрофлора почвы характеризуется большим разнообразием микроорганизмов, которые принимают участие в процессах почвообразования и самоочищения почвы, кругооборота в природе азота, углерода и других биогенных элементов. Микроорганизмы являются наиболее многочисленными обитателями биосферы, занимающие все доступные для жизни уголки планеты [1]. Они являются продуцентами целого ряда биологически активных веществ, таких как белки, липиды, полисахариды, органические кислоты, ферменты, витамины и др. [2].

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

Многие микроорганизмы способны адаптироваться к стрессовым условиям среды и сохранять свою жизнеспособность. Их можно использовать для защиты растений от негативных факторов внешней среды [4].

Определение биологической активности и биогенности почв позволяет оценить уровни почвенного плодородия.

Целлюлозолитическая активность почвы – один из показателей биологической активности или способность почвенных микроорганизмов разлагать целлюлозу. Интенсивность разложения клетчатки зависит от обработки почвы, ее увлажнения, от количества доступных форм азота, удобрений и других показателей.

Значительное количество микроорганизмов обладает способностью к растворению фосфора. К ним относятся бактерии, грибы, актиномицеты и даже водоросли. Эти микроорганизмы способны развиваться в различных условиях, но существенно различаются по способности к растворению минерального фосфата, которая зависит от типа почвы, его физико-химического состава, а также культуры, которая на ней будет произрастать. Концентрация железа, температура и источники углерода и азота в значительной степени влияют на фосфатмобилизирующие потенциалы этих микроорганизмов [5].

Организмы, участвующие в круговороте фосфора в почвах, очень разнообразны, и микроорганизмы, вероятно, играют самую важную роль.

Способность к фосфатмобилизации и стимуляции роста корневой системы определяет положительное влияние внесения фосфатмобилизирующих бактерий на режим питания и урожайность сельскохозяйственных культур. Применение бактерий может способствовать устранению дефицита фосфора в критический период питания в начале вегетации растений. Установлена взаимосвязь эффективности фосфатмобилизирующих бактерий с содержанием подвижных форм фосфора в дерново-подзолистых рыхло- и связносупесчаных почвах [6].

Процессу аммонификации подвергаются азотсодержащие соединения с различной структурой – белки, аминокислоты, гликопептиды, нуклеиновые кислоты, амиды, алкалоиды, амины и др.

Аммонифицирующие бактерии при помощи ферментов, выделяемых ими в почву, разлагают сложные белковые молекулы на более простые соединения. Эти соединения осмотическим путем проникают в клетки микроорганизмов и под действием внутриклеточных ферментов подвергаются дезаминированию, при котором высвобождается аммиак [7].

Олигонитрофильные бактерии принимают участие во всех процессах, связанных с превращением углерода и азота. Они способны усваивать очень многие органические и неорганические соединения углерода и азота. По сравнению с другими организмами они способны к разложению растительных остатков с широким соотношением углерода к азоту.

В микробном сообществе, испытывавшем гербицидный стресс, идет глубокая минерализация органического вещества, активно размножаются олиготрофные микроорганизмы и снижается пул аммонификаторов. Олигокарбофильные бактерии – гетеротрофные бактерии, способны к росту при минимальных концентрациях органического вещества, завершают процесс его деструкции [8].

Объекты и методика исследований. Исследования выполняли в весенний период 2021 г. на землях агрокомбината «Южный» вблизи н.п. Еремино Гомельского района Гомельской области. Объектом исследований являлась биологическая активность агрономически полезных групп при обработке микробными биопрепаратами «Полибакт», «Гордебак» и «Ресойлер» посевов ячменя.

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

Комплексный микробный препарат «Гордебак» позволяет получить экологически чистую продукцию и снизить пестицидную нагрузку на агробиоценозы. Не фитотоксичен, безвреден для человека, животных, рыб, полезных насекомых.

Микробный биопрепарат «Ресойлер», применяемый в исследованиях, разработан в РУН «Институт защиты растений» и позволяет осуществлять биоконтроль за фитопатогенами, обеспечивает получение экологически чистой продукции растениеводства и кормов, а также предназначен для оздоровления почвы и почвогрунтов и повышения продуктивности агробиоценозов, повышения роста и урожайности растений.

Для оценки эффективности препаратов был заложен полевой опыт на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве на посевах ячменя.

Схема опыта:

- 1) контроль – без обработки посевов ячменя микробными биопрепаратами;
- 2) обработка посевов ячменя микробным биопрепаратом «Полибакт»;
- 3) обработка посевов ячменя микробным биопрепаратом «Гордебак»;
- 4) обработка посевов ячменя микробным биопрепаратом «Ресойлер».

Агрохимическая характеристика почвы опыта следующая: рН в КС1 – 5,9; фосфор – 281 мг/кг; калий – 262 мг/кг.

Площадь опытных делянок составляла 5 м², размещение рендомизировано: повторность опытов – 4-х кратная. Нормы расхода по изучаемым микробным биопрепаратам «Полибакт», «Гордебак» и «Ресойлер» составляли 3 л/га.

Микробиологическую индикацию почвы выполняли согласно общепринятым в почвенной микробиологии методам [9], [10].

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

Численность микроорганизмов определяли в колониеобразующих единицах (КОЕ), пересчитывали на 1 г абсолютно сухой почвы.

Расчет эколого-физиологических индексов и коэффициентов выполняли по [11].

Результаты исследований. Численность аммонифицирующих бактерий в зависимости от варианта опыта по фазам вегетации имела некоторые общие черты: наибольшее количество отмечено в варианте «Гордебак», минимальное значение отмечено в контроле, промежуточное положение между этими вариантами занимали варианты «Полибакт» и «Ресойлер». По сравнению с контролем численность по фазам вегетации увеличилась в 1,6–2 раза в зависимости от варианта опыта. В каждом варианте опыта наибольшее количество отмечено в фазе цветения. Изучаемые параметры в фазе цветения в каждом варианте опыта в среднем были выше в 1,1–1,3 раза по сравнению с фазой выхода в трубку и фазой восковой спелости (рисунок 1).

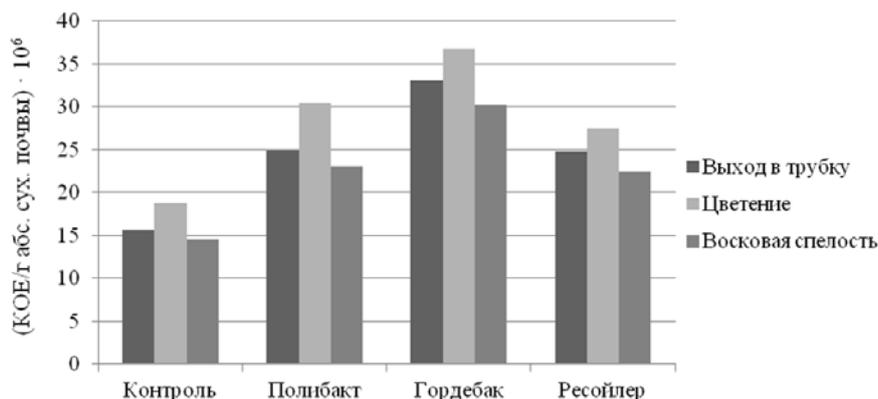


Рисунок 1 – Динамика количества аммонифицирующих бактерий в зависимости от вариантов опыта и фаз развития ячменя

Анализ количества бактерий, усваивающих минеральный азот, по вариантам опыта и фазам развития (рисунок 2) показывает, что в фазе выхода в трубку наибольшая численность наблюдалась в варианте «Гордебак», затем в варианте «Полибакт» и далее в варианте «Ресойлер». Запас изучаемых бактерий в каждом варианте опыта в фазе цветения была в 1,1–1,2 раза больше, чем в фазе выхода в трубку и в 1,3–1,4 раза выше, чем в фазе восковой спелости.

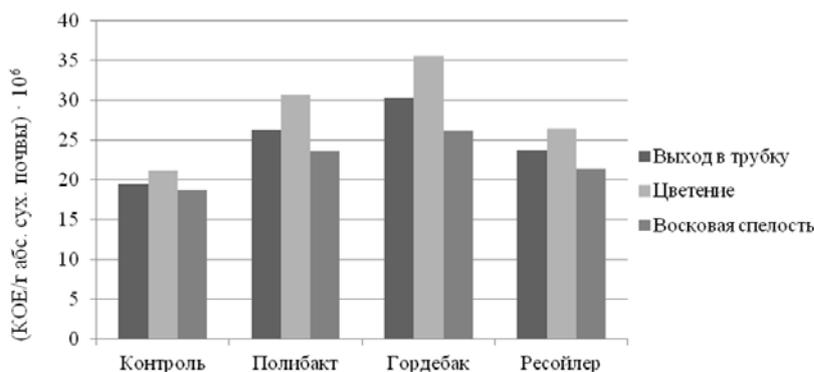


Рисунок 2 – Динамика количества бактерий, усваивающих минеральный азот в зависимости от вариантов опыта и фаз развития ячменя

Анализ численности олигонитрофильных бактерий показал, что наибольшее количество бактерий отмечено в варианте «Гордебак» и «Полибакт», несколько меньшее число наблюдалась в варианте «Ресойлер», это выше, чем в контроле в 1,6–2,3 раза в зависимости от варианта опыта.

Анализ количественных параметров олигонитрофильных бактерий по вариантам опыта показал, что в контроле, в варианте «Гордебак» и «Полибакт», изучаемый параметр в фазе цветения практически мало отличается от фазы выхода в трубку, а в варианте «Ресойлер» численность в фазе цветения в 1,2 раза выше, чем в фазе выхода в трубку. Количество бактерий в фазе цветения и в контроле в 1,3 раза, в вариантах «Полибакт» и «Гордебак» в 1,1 раза, и в варианте «Ресойлер» в 1,5 раза выше, чем в фазе восковая спелость (рисунок 3).

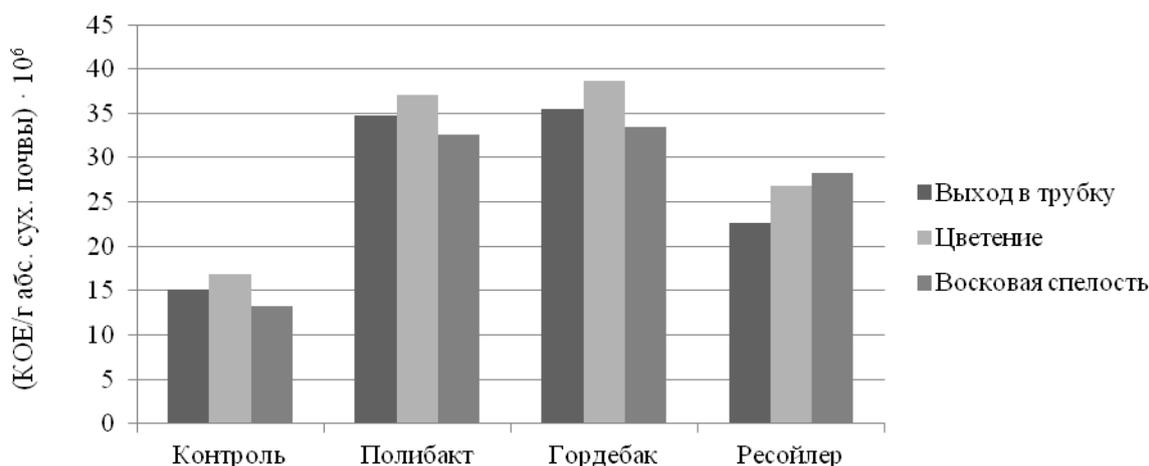


Рисунок 3 – Динамика количества олигонитрофильных бактерий в зависимости от вариантов опыта и фаз развития ячменя

Наибольшее количество фосфатмобилизующих бактерий отмечено в фазе цветения, меньшее количество зафиксировано в фазу выхода в трубку и фазу восковой спелости. Численность бактерий по сравнению с контролем увеличилась в зависимости от варианта опыта в 1,2–3,4 раза.

Численность в каждом варианте опыта в фазу цветения в 1,2–1,4 раза была выше, чем в фазе выхода в трубку и в 1,6–1,8 раза больше, чем в фазе восковой спелости (рисунок 4).

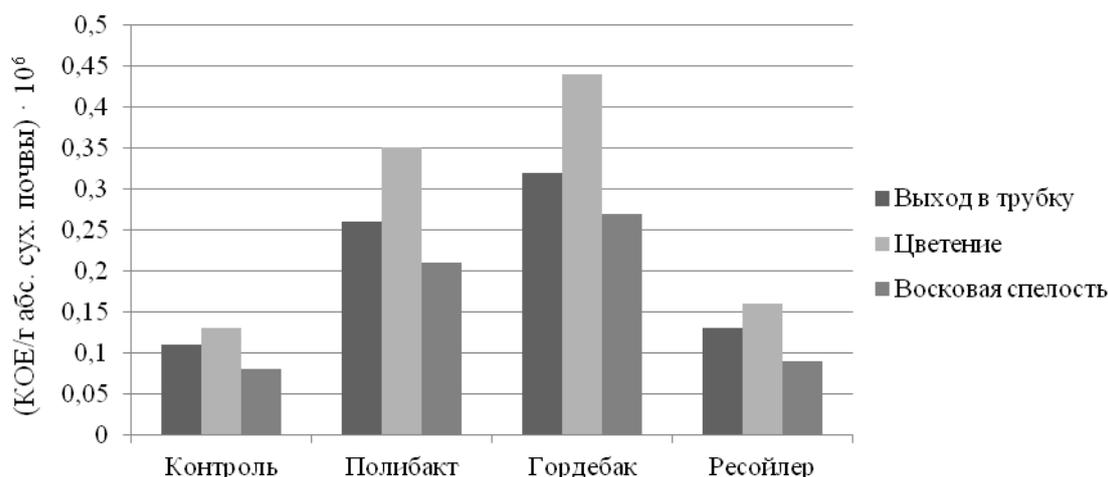


Рисунок 4 – Динамика количества фосфатмобилизующих бактерий в зависимости от вариантов опыта и фаз развития ячменя

Наиболее высокое количество олиготрофов наблюдалась в варианте «Гордебак» и «Полибакт» во всех фазах развития. Минимальное количество отмечено в контроле. Число бактерий в варианте «Ресойлер» была выше в 1,5–1,6 раза, чем в контроле.

Численность олиготрофных бактерий в каждом варианте опыта в фазе цветения в 1,1 раза оказалась выше, чем в фазе выхода в трубку и в 1,2–1,4 раза больше, чем в фазе восковой спелости (рисунок 5).

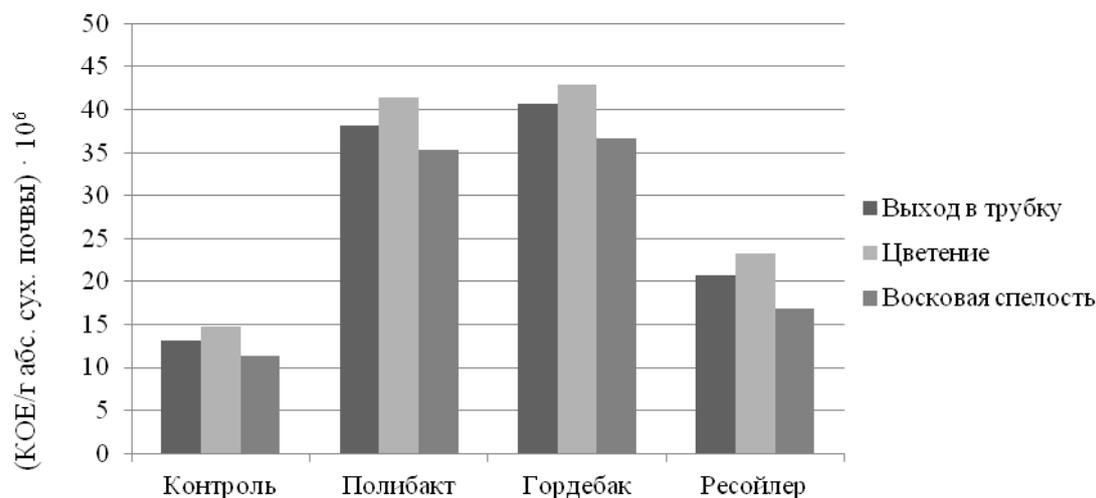


Рисунок 5 – Динамика количества олиготрофов в зависимости от вариантов опыта и фаз развития ячменя

Наибольшая численность целлюлозоразрушающих бактерий среди изучаемых вариантов опыта и фаз развития ячменя наблюдалась в варианте «Гордебак» в фазе цветения.

Анализ количества целлюлозоразрушающих бактерий по вариантам опыта в фазе цветения выявил, что в контроле и всех вариантах опыта количество бактерий была в 1,1 раза выше, чем в фазе выхода в трубку. Количественные параметры числа бактерий в фазе цветения в контроле в 1,3 раза выше, в варианте «Полибакт» и «Гордебак» в 1,1 раза больше и в варианте «Ресойлер» в 1,2 раза выше, чем в фазе восковая спелость.

Таким образом, численность целлюлозоразрушающих бактерий в каждом варианте опыта в фазе цветения в 1,1 раза была выше, чем в фазе выхода в трубку и в 1,1–1,3 раза выше, чем в фазе восковой спелости (рисунок 6).

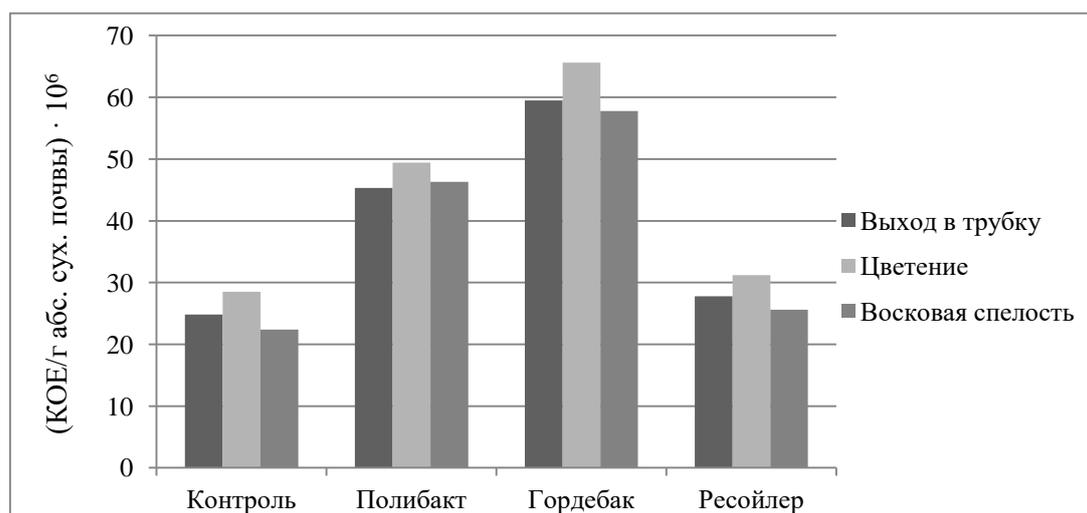


Рисунок 6 – Динамика количества целлюлозоразрушающих бактерий в зависимости от вариантов опыта и фаз развития ячменя

Наибольшая численность олигокарбофильных бактерий среди изучаемых вариантов опыта и фаз развития отмечена в варианте «Гордебак» и «Полибакт». Несколько меньшее количество наблюдалось в фазе выхода в трубку, в фазе восковой спелости зафиксировано минимальное число по отношению к другим предыдущим фазам развития.

Количество олигокарбофильных бактерий в каждом варианте опыта в фазу цветения и в фазе выхода в трубку мало отличалась между собой. В фазу цветения численность в 1,1–1,3 раза выше, чем в фазе восковой спелости (рисунок 7).

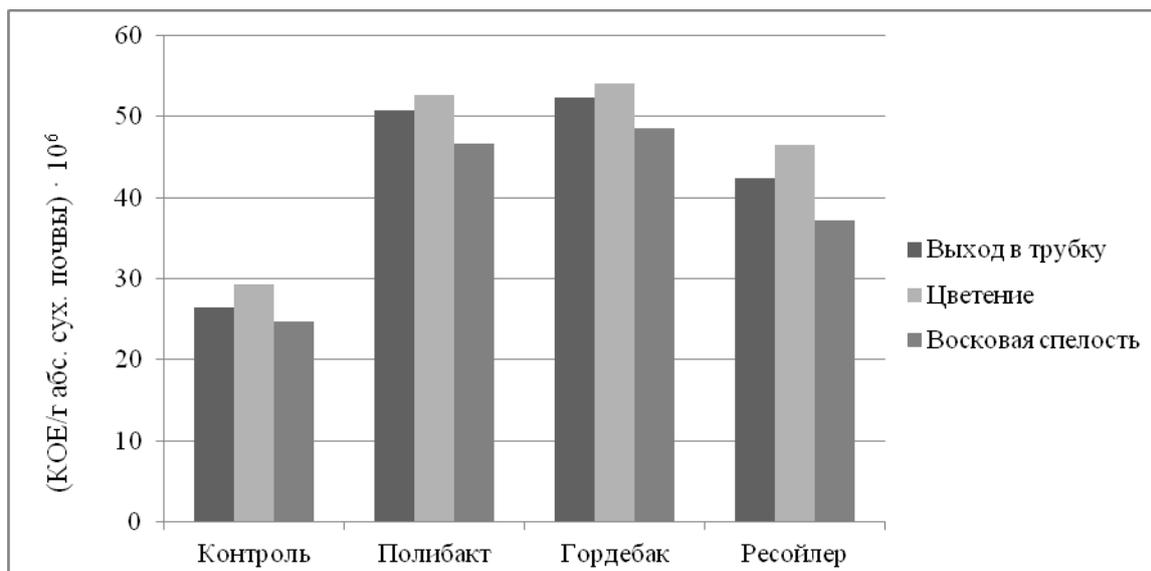


Рисунок 7 – Динамика количества олигокарбофильных бактерий в зависимости от вариантов опыта и фаз развития ячменя

Заключение. Проведенные исследования биогенности почв в посевах ячменя под влиянием биопрепаратов показали, что численность аммонифицирующих бактерий в зависимости от варианта опыта по фазам вегетации имела некоторые общие черты: наибольшее количество отмечено в варианте «Гордебак», минимальная значение отмечено в контроле, промежуточное положение между этими вариантами занимали препараты «Полибакт» и «Ресойлер». По сравнению с контролем количество бактерий по фазам вегетации увеличилась в 1,6–2 раза в зависимости от варианта опыта.

Максимальная численность бактерий, усваивающих минеральный азот, отмечена в варианте с препаратом «Гордебак», затем в варианте «Полибакт» и далее в варианте «Ресойлер». Количество бактерий в каждом варианте опыта в фазе цветения была в 1,1–1,2 раза больше, чем в фазе выхода в трубку и в 1,3–1,4 раза выше, чем в фазе восковой спелости.

Наибольшее количество олигонитрофильных бактерий отмечено в варианте с препаратами «Гордебак» и «Полибакт», несколько меньшее число наблюдалось в варианте «Ресойлер», это выше, чем в контроле в 2,3–1,6 раза в зависимости от варианта опыта.

Численность фосфатмобилизирующих бактерий по сравнению с контролем увеличилась в зависимости от варианта опыта в 1,2–3,4 раза. Количество олиготрофных бактерий в каждом варианте опыта в фазе цветения в 1,1 раза оказалось выше, чем в фазе выхода в трубку и в 1,2–1,4 раза больше, чем в фазе восковой спелости.

Литература

1. Леонтьевская, Е. А. Структура эпифитно-сапротрофных бактериальных комплексов зерновых и овощных культур : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.02.03 / Е. А. Леонтьевская. – М., 2014. – 28 с.
2. Поликсенова, В. Д. Индуцированная устойчивость растений к патогенам и абиотическим стрессовым факторам (на примере томата) / В. Д. Поликсенова // Вестник БГУ. – 2009. – № 1. – С. 48–60.
3. Егорова, Т. А. Основы биотехнологии : учеб. пособ. / Т. А. Егорова. – М. : Академия, 2003. – 208 с.
4. Солдатова, И. Э. Экологические функции микроорганизмов почв горных пастбищ / И. Э. Солдатова, Э. Д. Солдатов // Кормопроизводство. – 2016. – № 1. – С. 5–8.
5. Физикохимия и биология торфа. Методы оценки численности и разнообразия бактериальных и актиномицетных комплексов торфяных почв : учебное пособие / Т. Г. Добровольская [и др.]. – Томск : Том. гос. пед. ун-т, 2010. – 108 с.

6. Выделение и характеристика почвенных фосфатмобилизующих микроорганизмов / Н. А. Белясова [и др.] // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – № 2. – С. 93–97.

7. Свойства фосфатмобилизующих бактерий и их влияние на урожайность зерновых культур на дерново-подзолистых супесчаных почвах / Н. А. Михайловская [и др.] // Почвоведение и агрохимия. – 2011. – № 2 (47). – С. 120–128.

8. Соколов, Г. А. Изменение биологической активности почв агроценозов при использовании возрастающих доз минеральных удобрений в естественных условиях и в условиях лизиметрических опытов / Г. А. Соколов, И. В. Симакина, Е. Н. Сосновская // Почвоведение и агрохимия. – 2009. – № 2 (43). – С. 248–260.

9. Основные микробиологические и биохимические методы исследования почв / под ред. Ю. М. Возняковской. – Л. : ВНИИСХМ, 1987. – 47 с.

10. Теппер, Е. З. Практикум по микробиологии / Е. З. Теппер, В. К. Шильникова, Г. И. Переверзева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1987. – 239 с.

11. Титова, В. И. Методы оценки функционирования микробного ценоза почвы, участвующего в трансформации органического вещества : науч. метод. пособие / В. И. Титова, А. В. Козлов. – Н. Новгород : Нижегород с.-х. акад., 2012. – 192 с.

Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 27.01.2022

УДК 633.2:581.526.452(282.247.321.7)

Качество травяного корма при одноукосном использовании пойменного луга р. Сож

Н.М. ДАЙНЕКО, С.Ф. ТИМОФЕЕВ

На пойменных лугах Ветковского района Гомельской области были изучены 5 растительных сообществ. Содержание сухого вещества было относительно стабильным и варьировало в пределах 76–81 %, сырой клетчатки 33–39 %. По сырому протеину выявлено существенное превышение нормативов. Три ассоциации *Poo palustris-Alopecuretum pratensis*, *Poo-Festucetum pratensis* и *Deschampsietum cespitosa* соответствуют третьему классу по качеству. В условиях изменения климата происходит выживание наиболее приспособленных ассоциаций, но при этом имеет место обеднение качественных показателей корма.

Ключевые слова: пойменные луга, фитоценозы, бассейн р. Сож, зоотехнический анализ, сено, содержание клетчатки, сырой протеин, кормовые единицы.

5 plant communities were studied in the floodplain meadows of the Vetkovsky district of the Gomel region. The dry matter content was relatively stable and varied between 76–81 %, crude fiber was 33–39 %. For raw protein, a significant excess of the standards was revealed. Three associations, *Poo palustris-Alopecuretum pratensis*, *Poo-Festucetum pratensis* and *Deschampsietum cespitosa* correspond to the third class in quality. In the conditions of climate change, the survival of the fittest associations occurs, but at the same time there is a depletion of the quality indicators of feed.

Keywords: floodplain meadows, phytocenoses, river Sozh basin, zootechnical analysis, hay, fiber content, crude protein, feed units.

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. Выявлена существенная динамичность луговых сообществ. Происходят колебания обилия отдельных видов луговых трав, а также смена субассоциаций и ассоциаций [1]–[5], [6].

Одним из показателей изменения климата может являться уменьшение интенсивности и продолжительности затопления пойменных лугов р. Сож. В связи с этим важнейшей задачей является оценка качества травяных кормов, получаемых на территории речной долины.

Материалы и методика исследований. Объектом исследований служили пять луговых ассоциаций: *Poo palustris-Alopecuretum pratensis*, *Poo-Festucetum pratensis*, *Deschampsietum cespitosa*, *Caricetum gracilis*, *Agrostietum vinealis* расположенных в пойме р. Сож вблизи н.п. Новоселки Ветковского района в 2018–2020 гг.

Отбор растительных образцов проводили в фазу колошения – начало цветения при одноукосном использовании травостоя.

Определение качественных показателей параметров сена проводили по следующим методикам. Оценку качества сена проводили по ГОСТ 4808-87, массовую долю сухого вещества по ГОСТ 23637, массовую долю сырого протеина по ГОСТ 13496.4-93, массовую долю сырой клетчатки по ГОСТ 13496.2-91, массовую долю сырой золы по ГОСТ 26226-95, массовую долю сырого жира по ГОСТ 13496.15-97. Содержание фосфора определяли по ГОСТ 26657-97, кальция по ГОСТ 26570-95, калия по ГОСТ 30504-97 [7]–[16].

Результаты обрабатывали статистически с использованием пакетов прикладных программ Microsoft Excel.

Метеорологические условия по годам исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Динамика количество осадков (мм) и температуры воздуха (°C) по годам исследований

Месяц	°C / мм			Среднемноголетние данные
	2018	2019	2020	
Апрель	<u>11,0</u>	<u>10,1</u>	<u>8,1</u>	<u>6,6</u>
	19,1	15,7	7,8	45,0
Май	<u>18,4</u>	<u>16,4</u>	<u>11,9</u>	<u>13,9</u>
	20,6	35,2	141,0	55,0
Июнь	<u>19,2</u>	<u>23,0</u>	<u>21,5</u>	<u>17,0</u>
	67,6	44,3	45,8	79,0

Примечание: над чертой – температура воздуха (°C), под чертой – количество атмосферных осадков (мм).

Анализ метеорологических условий, складывающихся в период формирования первого укоса (апрель-июнь), по годам исследований (2018–2020 гг.) показал, что температура воздуха в апреле месяце по годам исследований, в мае 2018 и 2019 гг., а также в июне во все годы наблюдений оказалась выше среднемноголетней температуры. Количество выпавших атмосферных осадков за период наблюдений, за исключением мая месяца 2020 г., также была ниже среднемноголетних данных.

Таким образом, в основном этот период характеризовался более высокой температурой по сравнению с многолетними данными и относительно невысоким количеством атмосферных осадков, за исключением мая месяца 2020 г.

Результаты исследований. Оценку зоотехнического качества кормов производили по следующим показателям, содержание сухого вещества, сырых клетчатки, жира, протеина, золы, макроэлементов. Путем пересчета определяли содержание переваримого протеина и кормовых единиц (таблицы 2–4).

Общее правило кормления сельскохозяйственных животных состоит в том, чтобы потребность в сухом веществе была как можно больше удовлетворена для повышения их продуктивности. По существующим нормативам в сене из сеяных трав и трав естественных кормовых угодий массовая доля сухого вещества должна быть не менее 83 % [16].

Анализ зоотехнической оценки качества травостоя пойменного луга р. Сож в 2018 г. (таблица 2) показал, что по содержанию сухого вещества в исследуемых кормах, наиболее близка к нормативным значениям ассоциация *Poo palustris-Alopecuretum pratensis*. Между остальными ассоциациями различия незначительны.

Максимальное содержание калия в травостое отмечено в ассоциации *Caricetum gracilis*, а минимальное количество калия выявлено в травостое *Agrostietum vinealis*. Минимальным и максимальным содержанием фосфора в сене характеризовались травостоем ассоциации *Agrostietum vinealis* и *Poo-Festucetum pratensis*.

Важнейшим показателем качества сена является наличие в сухом веществе сырой клетчатки. Для сена 1, 2, 3 классов количество сырой клетчатки будет составлять 30 %, 32 % и 33 %. По данному показателю условно можно выделить две группы. Первая – *Poo palustris-Alopecuretum pratensis*, *Poo-Festucetum pratensis*, *Deschampsietum cespitosa*, вторая – *Caricetum gracilis*, *Agrostietum vinealis*.

Одним из показателей качества корма является количество сырого жира. В проанализированных образцах по его содержанию можно выделить три группы. Первая – *Poo palustris-Alopecuretum pratensis*, вторая – *Poo-Festucetum pratensis* и *Deschampsietum cespitosa*, третья – *Caricetum gracilis* и *Agrostietum vinealis*.

Таблица 2 – Зоотехническая оценка качества травостоя пойменного луга р. Сож, 2018 г.

Название ассоциации	Определяемые показатели, абс.сух. вещ-во, %										
	Сухое вещество	Ca	K	P	Mg	Сырая клетчатка	Сырой жир	Сырой протеин	Сырая зола	Перевар. протеин	КЕ
<i>Poo palustris-Alopecuretum pratensis</i>	77,23	0,47	2,28	0,30	0,72	33,70	2,08	15,94	8,21	10,81	0,57
<i>Poo-Festucetum pratensis</i>	77,11	0,40	2,15	0,41	0,25	35,12	3,15	17,50	11,95	11,87	0,55

Окончание таблицы 2

<i>Deschampsietum cespitosa</i>	76,80	0,36	2,80	0,28	0,47	34,2	3,20	15,15	10,60	10,20	0,57
<i>Caricetum gracilis</i>	77,80	0,32	2,98	0,34	0,58	39,80	2,87	13,90	7,90	9,10	0,42
<i>Agrostietum vinealis</i>	82,3	0,34	0,90	0,22	0,62	39,40	2,56	8,48	4,60	4,58	0,48
Среднее	78,25	0,38	2,22	0,31	0,528	36,444	2,772	14,194	8,652	9,312	0,518
Стандартное отклонение	2,29	0,06	0,82	0,07	0,18	2,93	0,46	3,45	2,82	2,83	0,07

Таблица 3 – Зоотехническая оценка качества травостоя пойменного луга р. Сож, 2019 г.

Название ассоциации	Определяемые показатели, абс.сух. вещ-во, %										
	Сухое вещество	Ca	K	P	Mg	Сырая клетчатка	Сырой жир	Сырой протеин	Сырая зола	Перевар. протеин	КЕ
<i>Poo palustris-Alopecuretum pratensis</i>	76,18	0,45	2,20	0,27	0,71	34,78	2,15	15,12	8,36	10,21	0,56
<i>Poo-Festucetum pratensis</i>	77,20	0,38	2,10	0,36	0,20	35,90	3,05	16,95	12,22	11,92	0,54
<i>Deschampsietum cespitosa</i>	77,12	0,32	2,67	0,26	0,42	35,14	3,10	14,86	10,90	9,39	0,56
<i>Caricetum gracilis</i>	75,78	0,30	2,88	0,33	0,52	40,44	2,60	13,12	7,65	7,44	0,42
<i>Agrostietum vinealis</i>	79,26	0,30	0,81	0,20	0,57	40,96	2,55	8,35	4,40	4,12	0,47
Среднее	77,11	0,35	2,13	0,28	0,48	37,44	2,69	13,68	8,71	8,62	0,51
Стандартное отклонение	1,35	0,06	0,81	0,06	0,19	3,01	0,39	3,27	3,04	2,99	0,06

Таблица 4 – Зоотехническая оценка качества травостоя пойменного луга р. Сож, 2020 г.

Название ассоциации	Определяемые показатели, абс.сух. вещ-во, %										
	Сухое вещество	Ca	K	P	Mg	Сырая клетчатка	Сырой жир	Сырой протеин	Сырая зола	Перевар. протеин	КЕ
<i>Poo palustris-Alopecuretum pratensis</i>	77,88	0,62	2,60	0,35	0,78	30,8	2,24	16,75	8,80	11,68	0,59
<i>Poo-Festucetum pratensis</i>	77,46	0,54	2,45	0,48	0,31	33,40	3,27	18,20	12,30	12,82	0,57
<i>Deschampsietum cespitosa</i>	76,29	0,59	2,80	0,34	0,58	31,90	3,32	16,19	11,15	11,24	0,59
<i>Caricetum gracilis</i>	76,22	0,44	3,15	0,40	0,63	37,18	3,12	14,8	8,22	10,36	0,45
<i>Agrostietum vinealis</i>	81,45	0,58	1,68	0,36	0,66	36,83	2,76	9,37	4,90	6,48	0,50
Среднее	77,86	0,55	2,54	0,39	0,59	34,02	2,94	15,06	9,07	10,52	0,54
Стандартное отклонение	2,13	0,07	0,55	0,06	0,17	2,88	0,45	3,41	2,87	2,42	0,06

Содержание сырого протеина в сухом веществе определяет класс сена. Для 1, 2, 3 классов содержание сырого протеина должно составлять соответственно 11, 9 и 7 %. По данному показателю 4 первых ассоциации можно отнести к первому классу, а *Agrostietum vinealis* к третьему классу. Среднее содержание сырого протеина составляло $14,19 \pm 3,45$ %. Максимальным содержанием протеина выделяется ассоциация *Poo-Festucetum pratensis* – 17,5 %. Ассоциации *Poo palustris-Alopecuretum pratensis*, *Deschampsietum cespitosa* и *Caricetum gracilis* можно отнести также к первому классу.

Одним из показателей качества сена является содержание сырой золы. Максимальное количество золы было выявлено в ассоциациях *Poo-Festucetum pratensis* и *Deschampsietum cespitosa* – 11,95–10,6 %. Минимальное количество золы обнаружено в растительности ассоциации *Agrostietum vinealis* – 4,6 %.

Продуктивность жвачных животных во многом зависит от обеспеченности рационов достаточным количеством полноценного протеина. Оценка протеиновой питательности кормов и его нормирование осуществляется по сырому и переваримому протеину. Сырой протеин – показатель, характеризующий содержание азотистых веществ в рационе. Переваримый протеин определяется по разности корма и кала и характеризует переваримость сырого протеина. В практике кормления сырой протеин определяется по количеству азота в протеине, равному 16 %.

В травостое *Agrostietum vinealis* было минимальное количество перевариваемого протеина, а в травостое ассоциации *Poo-Festucetum pratensis* – максимальное.

Интегрированным показателем качества корма является расчет количества кормовых единиц. Травостой по данному показателю можно разделить на две группы. Первая группа *Poo palustris-Alopecuretum pratensis*, *Poo-Festucetum pratensis*, *Deschampsietum cespitosa*, вторая группа *Caricetum gracilis* и *Agrostietum vinealis*.

Сено из трав естественных угодий подразделяют на три класса в соответствии по содержанию сырого протеина и кормовых единиц. Для первого класса сена это будет соответственно 11 % и 0,64; второго класса 9 % и 0,58; и третьего класса 7 % и 0,50.

По содержанию сухого вещества проанализированные пробы, полученные в условиях 2018 г. не соответствовали существующим нормативам.

В условиях 2019 г. максимальное содержание сухого вещества в сене было выявлено для ассоциации *Agrostietum vinealis*, минимальное для *Caricetum gracilis* (таблица 3).

Различия между другими тремя сообществами недостоверные. Таким образом, содержание сухого вещества во всех сообществах менее рекомендуемых 83 %.

По содержанию кальция вновь выделяется ассоциация *Poo palustris-Alopecuretum pratensis*. По другим сообществам достоверные различия отсутствуют.

По количеству калия в травостое можно выделить три группы. Максимальное количество выявлено для *Deschampsietum cespitosa* и *Caricetum gracilis*, минимальное для *Agrostietum vinealis*. Среднее положение занимают *Poo palustris-Alopecuretum pratensis* и *Poo-Festucetum pratensis*. По обеспеченности фосфором и магнием повторяется ситуация 2018 г.

Максимум количества фосфора установлен для *Poo-Festucetum pratensis*, минимум для *Poo-Festucetum pratensis*. Для магния соответственно *Poo palustris-Alopecuretum pratensis* и *Poo-Festucetum pratensis*.

По содержанию сырой клетчатки можно выделить две группы. Наибольшие значения присущи ассоциациям *Caricetum gracilis* и *Agrostietum vinealis*. В остальных трех ассоциациях обеспеченность клетчаткой находится в пределах 34–35 %.

Уровни накопления сырого жира имеют тенденции 2018 г. Максимальными и минимальными значениями вновь выделяются *Deschampsietum cespitosa* и *Poo palustris-Alopecuretum pratensis* соответственно.

По содержанию сырого протеина, как и в 2018 г. можно выделить две группы ассоциаций. Первая группа *Agrostietum vinealis* занимает промежуточное положение между вторым и третьим классом, все остальные значительно превышают норматив первого класса, но между ними при стандартном отклонении 3,27 достоверных различий не выявлено.

По количеству сырой золы можно выделить три группы и представить в виде уменьшающегося ряда *Poo-Festucetum pratensis*, *Deschampsietum cespitosa* > *Poo palustris-Alopecuretum pratensis*, *Caricetum gracilis* > *Agrostietum vinealis*.

Для оценки рассчитанного количества сырого протеина можно построить следующий убывающий ряд *Poo palustris-Alopecuretum pratensis*, *Poo-Festucetum pratensis*, *Deschampsietum cespitosa* > *Caricetum gracilis* > *Agrostietum vinealis*.

Завершающим параметром оценки качества корма является расчет кормовых единиц. Нормативные значения для первого класса сена это будет 0,64; второго класса 0,58; и третьего класса 0,50. С учетом этого к третьему классу можно отнести ассоциации *Poo palustris-Alopecuretum pratensis*, *Poo-Festucetum pratensis*, *Deschampsietum cespitosa*. Ассоциации *Caricetum gracilis* и *Agrostietum vinealis* нельзя отнести к нормативно качественному сену.

В условиях 2020 г. многие качественные параметры оценки кормов были аналогичны результатам 2018–2019 гг. (таблица 4). Вновь более высокое содержание сухого вещества

было установлено для сообщества *Agrostietum vinealis*. Содержание макроэлементов кальция, калия, фосфора, магния в травостое было выше, чем в предшествующие годы, но дифференциация по сообществам сохранилась.

Можно отметить, что в условиях 2020 г. достоверно меньше выявлено сырой клетчатки в сене. Тенденция к дифференциации сохранилась. Так, минимальное количество вещества установлено для *Poo palustris-Alopecuretum pratensis*, а максимальное для *Caricetum gracilis* и *Agrostietum vinealis*.

Содержание сырого жира в 2020 г. было выше, чем в предыдущие годы, но распределение по ассоциациям аналогично предыдущим исследованиям.

Обеспеченность кормов сырым протеином выявлена выше, чем в предыдущие годы, то есть выше 11 процентов для *Poo palustris-Alopecuretum pratensis*, *Poo-Festucetum pratensis*, *Deschampsietum cespitosa*, *Caricetum gracilis* и более 9 процентов для *Agrostietum vinealis*.

Относительно сырой золы и переваримого протеина можно заметить, их количество увеличилось, но распределение по ассоциациям аналогично предыдущим годам.

По количеству кормовых единиц к первому классу анализируемые корма не могут быть отнесены. Ко второму классу стандарта могут быть отнесены ассоциации *Poo palustris-Alopecuretum pratensis* и *Deschampsietum cespitosa*. К третьему классу могут быть отнесены *Poo-Festucetum pratensis* и *Agrostietum vinealis*. В целом же по совокупности параметров анализируемые пробы сена не могут быть отнесены даже к третьему классу.

Заключение. В результате исследований показано, что содержание сухого вещества в травостое исследуемых ассоциаций было достаточно стабильным и находилось в пределах от 76 до 81 %. Пределы варьирования не превышали 0,2–1,6 %. Несколько более высоким содержанием сухого вещества характеризовалось сообщество *Agrostietum vinealis*. В целом содержание сухого вещества во все годы было ниже уровня 83 %.

Количество сырой клетчатки в воздушно-сухом веществе также было относительно стабильным и стандартные отклонения не превышали 1,3–2,1 %.

Основными параметрами позволяющими оценить качество сена в данном случае являются сырой протеин и кормовые единицы. По содержанию сырого протеина воздушно-сухое вещество четырех ассоциаций из пяти во все годы превышало нормативные значения первого класса. Наиболее высокими значениями характеризовалась ассоциация *Poo-Festucetum pratensis*. На 2–3 процента меньшие параметры имели ассоциации *Poo palustris-Alopecuretum pratensis*, *Deschampsietum cespitosa* и *Caricetum gracilis*.

В результате исследований в среднем по количеству кормовых единиц не выявлено соответствия первому и второму классам стандарта. Три ассоциации *Poo palustris-Alopecuretum pratensis*, *Poo-Festucetum pratensis* и *Deschampsietum cespitosa* соответствуют третьему классу по качеству.

Полученные результаты оценки качества кормов могут свидетельствовать о том, что в условиях изменения климата в травостое луговых ассоциаций наблюдается обеднение качественных показателей корма.

Литература

1. Почвы Белорусской ССР / Под ред. чл.-корр. АН БССР [и др.]. – Минск : «Ураджай», 1974. – 328 с.
2. Почвоведение с основами геологии : учеб. пособ. / А. И. Горбылева, Д. М. Андреева, В. Б. Воробьев, Е. И. Петровский ; под ред. А. И. Горбылевой. – 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. Лемеш, В. Ф. Кормовые нормы и таблицы / В. Ф. Лемеш, А. П. Шпаков, В. К. Назаров. – Минск : «Ураджай», 1973. – 335 с.
6. Дайнеко, Н. М. Состав и структура пойменных лугов бассейна р. Сож : монография / Н. М. Дайнеко, С. Ф. Тимофеев. – Чернигов : Десна Полиграф, 2020. – 208 с.

7. Сено. Технические условия : ГОСТ 4808-87. – Введ. 01.05.88. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2000. – С. 13–19.
8. Корма растительные. Методы определения : ГОСТ 27548-97. – Введ. 01.01.99. – М. : Стандартинформ, 2005. – 7 с.
9. Корма. Комбикорма. Комбикормовое сырье. Методы определения содержания азота и сырого протеина : ГОСТ 13496.4-93. – Введ. 01.01.95. – М. : Стандартинформ, 2011. – 17 с.
10. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Метод определения сырой клетчатки : ГОСТ 13496.2-91. – Введ. 01.07.92. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – С. 5–7.
11. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения сырой золы : ГОСТ 26226-95. – Введ. 01.01.97. – М. : Издательство стандартов, 2003. – 19 с.
12. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания фосфора : ГОСТ 26657-97. – Введ. 01.01.99. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – С. 9–13.
13. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения сырого жира : ГОСТ 13496.15-97. – Введ. 01.01.99. – М. : Стандартинформ, 2011. – С. 9–12.
14. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения кальция : ГОСТ 26570-95. – Введ. 01.01.97. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – С. 14–18.
15. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Пламенно-фотометрический метод определения калия : ГОСТ 30504-97. – Введ. 01.01.99. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – С. 22–26.
16. Шупик, М. В. Кормление сельскохозяйственных животных. Кормление крупного рогатого скота, овец, коз и лошадей / М. В. Шупик, А. Я. Райхман. – Горки : БГСХА, 2014. – 236 с.

УДК 599.742.73+575.1+602.6+004.9

Молекулярно-генетическая идентификация *Felis catus* акромеланистического окраса

С.А. Зяцьков, Г.Г. Гончаренко

Разработаны и апробированы методы молекулярно-генетической идентификации *Felis catus* акромеланистических окрасов, позволяющие четко выявлять гетерозиготных особей (генотип Cc^s), которые фенотипически неотличимы от особей с генотипом CC .

Ключевые слова: домашняя кошка, *Felis catus* L., пигментогенез, аллель c^s , тирозиназа.

The methods of molecular genetic identification of *Felis catus* of acromelanistic colors have been developed and tested, which makes it possible to clearly identify heterozygous individuals (Cc^s genotype) that are phenotypically indistinguishable from individuals with the CC genotype.

Keywords: domestic cat, *Felis catus* L., pigmentogenesis, allele c^s , tyrosinase.

Несмотря на многовековую историю взаимоотношений домашней кошки (*Felis catus* L.) с человеком, она практически не изменилась и по внешнему виду похожа на предков (*F. libyca* Forster, *F. chaus* Gldenstaedt, *F. sylvestris* Schreber). Следует согласиться с мнением многих исследователей, что современную домашнюю кошку, за исключением некоторых декоративных пород, нельзя считать в полном смысле домашней, поскольку она сохраняет в неизменном виде привычки и поведение своих диких сородичей, лишь приспособив их к условиям жизни вблизи с человеком. С другой стороны, долгое сожительство *F. catus* рядом с человеком способствовало смягчению действия естественного отбора и тем самым благоприятствовало возникновению и закреплению большого числа легко идентифицируемых по внешнему виду животных мутантных генов окраски, чего никогда не наблюдают в популяциях диких животных. Все это обеспечило накопление такого множества расцветок меха у *F. catus*, которое мы сейчас можем наблюдать [1], [2].

Необходимо отметить, что формирование окраса меха у кошек начинается в процессе пигментогенеза (меланогенового пути) [3]–[6], который является генетически детерминированным и начинается еще на эмбриональной стадии. На очень ранних этапах развития у зародыша в области нервной трубки выделяется закладка будущих пигментных клеток меланоцитов. Сами они производить пигмент еще не могут, для этого им нужно претерпеть ряд изменений. Прежде всего, эти клетки, так называемые меланобласты, должны принять веретенообразную форму, пригодную для миграции. Мигрируют они сначала в центры пигментации, а оттуда – в волосяные фолликулы [1], [3]. Процесс формирования меланоцитов из клеток нервного валика представлен на рисунке 1.

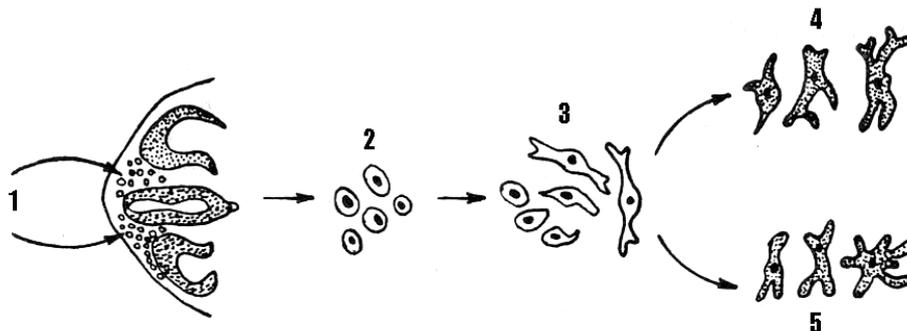


Рисунок 1 – Миграция меланобластов из нервного валика [3]:

1 – клетка нервного валика, 2 – меланобласты, 3 – незрелые меланоциты, 4 – эпидермальные меланоциты, 5 – дермальные меланоциты

Гранулы пигментов, носящие название меланосом, образуются в меланоцитах. У большинства видов млекопитающих меланоциты имеют типичное строение, связанное с наличием в клетке отростков и равномерным распределением гранул меланина.

Окраска меха у кошек определяется присутствием пигмента – меланина, который в зависимости от химического состояния может находиться в двух формах эумеланина и феомеланина. Гранулы эумеланина сферические и поглощают почти весь свет, давая черную пигментацию, в то время как гранулы феомеланина продолговатые (эллипсоидной формы) и отражают свет в красно-желто-оранжевом диапазоне [1], [3]–[7]. Этапы биосинтеза пигментов у кошек из аминокислоты тирозина и некоторые ферменты, участвующие в метаболизме, представлены на рисунке 2.



Рисунок 2 – Пути синтеза эумеланина и феомеланина из тирозина (отмечена множественная роль тирозиназы) [4]

Та или иная окраска животного является конечным результатом сложного процесса формирования и функционирования структур, связанных с образованием пигмента. Каждый из этих этапов пигментогенеза имеет соответствующий генетический контроль. При нормальном функционировании механизма биосинтеза пигментов и их распределении в волосяном покрове кошек формируется «окрас дикого типа» (серый полосатый). Все другие цветовые вариации в окрасе меха у кошек обусловлены мутациями в соответствующих генах, ответственных за формирование и распределение пигментов [1].

Целью работы было отработать методику молекулярно-генетической идентификации особей *F. catus* акромеланистического окраса.

Акромеланистический окрас проявляется из-за неравномерного окрашивания тела кошки. Такие животные имеют темную голову, конечности и хвост и значительно более светлый корпус. Эти окрасы возникают в результате наличия температурочувствительной формы тирозиназы. При нормальной температуре тела активность данной формы тирозиназы резко снижена, что и приводит к осветлению окраса. Сниженная температура головы и конечностей способствует активации фермента и запускает нормальный синтез пигмента, что и обеспечивает развитие типичного «сиамского» окраса (рисунок 3) [1], [8]. За формирование данного признака отвечает рецессивный аллель c^s локуса Color.

Локус Color имеется у всех млекопитающих и определяет работу регуляторного белка-фермента – тирозиназы. Наличие в генотипе доминантного аллеля C этого локуса обеспечивает синтез нормальной тирозиназы, и тогда процесс наработки не только пигментов в меланоцитах, но и дофамина и ДОФА в других клетках нейрального происхождения протекает в полном объеме (рисунок 2). У кошек в этом локусе помимо нормального доминантного аллеля C , который отвечает за нормальный синтез пигментов, имеется еще серия рецессивных мутантных аллелей ($C > c^b = c^s > c, c^m$) [1], [9]–[12].



Рисунок 3 – Сиамиские кошки (генотип $c^s c^s$)

Необходимо отметить, что долгое время оставалась неизвестной локализация аллелей локуса Color в хромосоме, а также их нуклеотидная последовательность и молекулярно-генетический механизм проявления акромеланистического окраса. Разрешение этих вопросов стало возможным после успешных исследований в рамках проекта «Геном кошки» (2002–2007) [13]–[14]. Было установлено, что в локусе Color (C) у млекопитающих находится ген, кодирующий тирозиназу (TYR) – фермент, участвующий в синтезе меланинов. Оказалось, что для таких пород кошек, как бирманская (соболиный окрас, генотип $c^b c^b$), сиамская (окрас колор-пойнт, генотип $c^s c^s$) (OMIA 000202-9685) в пигментогенезе принимает участие температуро-чувствительная тирозиназа. Приведенные выше породы были обнаружены в Таиланде и известны там как Суфалак (Suphalak) – бирманская и Вичиен-маат (Wichienmaat) – сиамская. Кроме того, в гене TYR обнаружены два полных варианта альбино (аллели c, c^m) (OMIA 000202-9685). Аллель c в гомозиготном состоянии (генотип cc) вызывает формирование сплошного белого окраса. Это явление происходит из-за полной инактивации фермента тирозиназы приводит к альбинизму. Кошки с данной мутацией фенотипически схожи с животными с генотипом W - (ген White). Различия между ними заключается в окраске зрачков, которые у кошек-альбиносов с генотипом cc – розовые или красные из-за полного отсутствия пигмента в радужной оболочке [1]. Кроме того, селекционная работа, проводимая с кошками бирманской породы, позволила выявить необычный окрас, названный «мокко» («moscha»), генотип $c^m c^m$. Кошки с окрасом «мокко» имеют аквамаринную окраску глаз, розовую кожу носа и подушечки лап [12].

Помимо этого, известно много примеров альбинизма причиной которых являются мутации по гену TYR. Например, варианты с потерей функции, которые вызывают кожно-глазной альбинизм типа 1A (OCA1A; OMIM: 203100) или варианты, которые снижают ферментативную активность, вызывая кожно-глазной альбинизм типа 1B (OCA1B; OMIM: 606952) у людей [12].

Таким образом, было показано, что ген тирозиназы *F. catus* находится в D1 хромосоме, а кодирующая его часть имеет размер 1587 н.п. и включает 5 экзонов (GenBank: AY959314–AY959318) (рисунок 4) [10], [15].

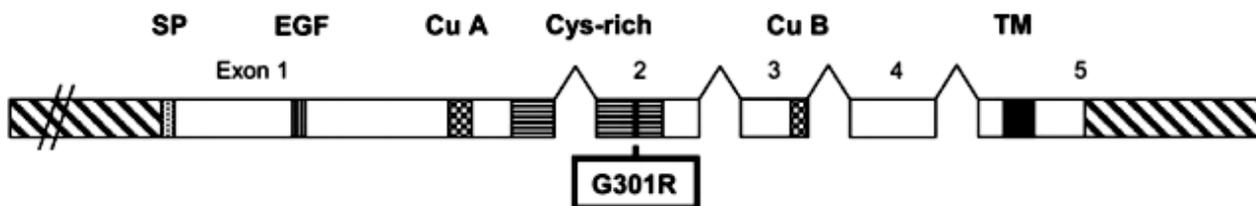


Рисунок 4 – Структура гена тирозиназы:

SP – сигнальный пептид; EGF – домен фактора эпидермального роста; Cu A и Cu B – медьсвязывающие домены; Cys-rich – домен, богатый цистеином; TM – трансмембранный домен

На рисунке указано место локализации несинонимичной мутации во 2 экзоне (TYR-901G>A), приводящий к замене глицина (G) на аргинин (R) в положении 301 кодона (G301R). Даная мутация определяет у особей с генотипом $c^s c^s$ акромеланистичный окрас (рисунок 3).

В этой связи особи с сиамским и обычным «несиамским» окрасом отличаются друг от друга однонуклеотидным замещением (SNP) во втором экзоне гена тирозиназы. Нуклеотидная последовательность фрагмента ДНК, содержащего 2 экзон гена тирозиназы для особей с аллельным вариантом сиамского типа (аллель c^s) (GenBank: AY743348.1) и особей «несиамского» дикого типа (аллель C) (GenBank: AY743346.1) представлены на рисунках 5 и 6 [9].

```

1 ttagccgatt ggaggagtac aatagccgtc aggctttatg tgatggaact ccagagggac
61 cattactgcg caatcccga aaccatgaca aagccaggac cccaaggctc cctcctctg
121 ctgatgtgga attttgcta agtctgacac aatatgaatc gggttccatg gataaagctg
181 ca

```

Рисунок 5 – Фрагмент ДНК, содержащий 2 экзон гена тирозиназы для особей с аллельным вариантом сиамского типа (аллель c^s)

```

1 ttagccgatt ggaggagtac aatagccgtc aggctttatg tgatggaact ccagagggac
61 cattactgcg caatcccga aaccatgaca aagccaggac cccaaggctc cctcctctg
121 ctgatgtgga attttgcta agtctgacac aatatgaatc gggttccatg gataaagctg
181 ca

```

Рисунок 6 – Фрагмент ДНК, содержащий 2 экзон гена тирозиназы для особей с аллельным «несиамского» типа (аллель C)

На предложенных рисунках 5 и 6 хорошо заметно месторасположение однонуклеотидного замещения (выделено цветом), кроме того на этом же рисунке подчеркнуты участки ДНК для пары праймеров, которые успешно используются при амплификации аллелей локуса TYR.

Таким образом, последовательность праймеров необходимая для амплификации предложенного фрагмента размером 179 н.п. будет следующей:

- *прямой праймер* – tagccgattggaggataca;
- *обратный праймер* – gcagctttatccatgaacc.

Фрагменты ДНК размером 179 н.п., полученные после амплификации, присутствуют как у особей *F. catus* «сиамского», так и «несиамского» окраса. Поэтому для их идентификации была использована рестриктаза *Hpa* II (рисунок 7). Эта рестриктаза имеет следующий сайт узнавания (стрелками указаны сайты рестрикции):

Рисунок 7 – Сайта узнавания и рестрикции для рестриктазы *Hpa* II

Сайт узнавания для предложенной рестриктазы как раз и содержит наше однонуклеотидное замещение. Это хорошо заметно на рисунках 8 и 9.

```

1  ttagccgatt ggaggagtac aatagccgtc aggctttatg tgatggaact ccagagggac
61 cttacttgcg caatcccaga aaccatgaca aagccaggac cccaaggctc ccctcctctg
121 ctgatgtgga attttgcccta agtctgacac aatatgaatc gggttccatg gataaagctg
181 ca

```

Рисунок 8 – Фрагмент ДНК, содержащий сайт узнавания для *Hpa* II у особей с аллельным вариантом сиамского типа (аллель c^s)

```

1  ttagccgatt ggaggagtac aatagccgtc aggctttatg tgatggaact ccagagggac
61 cttacttgcg caatcccgga aaccatgaca aagccaggac cccaaggctc ccctcctctg
121 ctgatgtgga attttgcccta agtctgacac aatatgaatc gggttccatg gataaagctg
181 ca

```

Рисунок 9 – Фрагмент ДНК, содержащий сайт узнавания для *Hpa* II у особей с аллельным вариантом несиамского типа (аллель C)

В этой связи после рестрикции у особей «сиамского» окраса фрагмент размером 179 н.п. останется не тронутым, а у особей «несиамского» окраса будет подвержен рестрикции с образованием фрагментов размером 62 н.п. и 117 н.п.

Ампликоны, полученные в ходе ПЦР после рестрикции, в дальнейшем подвергали гель-электрофорезу с флуоресцентным интеркалярным красителем бромистым этидием. Визуализация процесса электрофореза осуществлялась с помощью трансиллюминатора, который дает ультрафиолетовое излучение с длиной волны 365 нм, оптимальное для фиксации результатов, полученных в результате ПЦР-анализа.

Таким образом, электрофорез в агарозном геле позволяет разделить, а затем легко извлечь полученные в результате ПЦР фрагменты ДНК в чистом виде для последующего использования. Кроме того, анализируя электрофоретические спектры ДНК на геле, можно точно установить генотип *F. catus* по гену, кодирующему тирозиназу (рисунок 10).

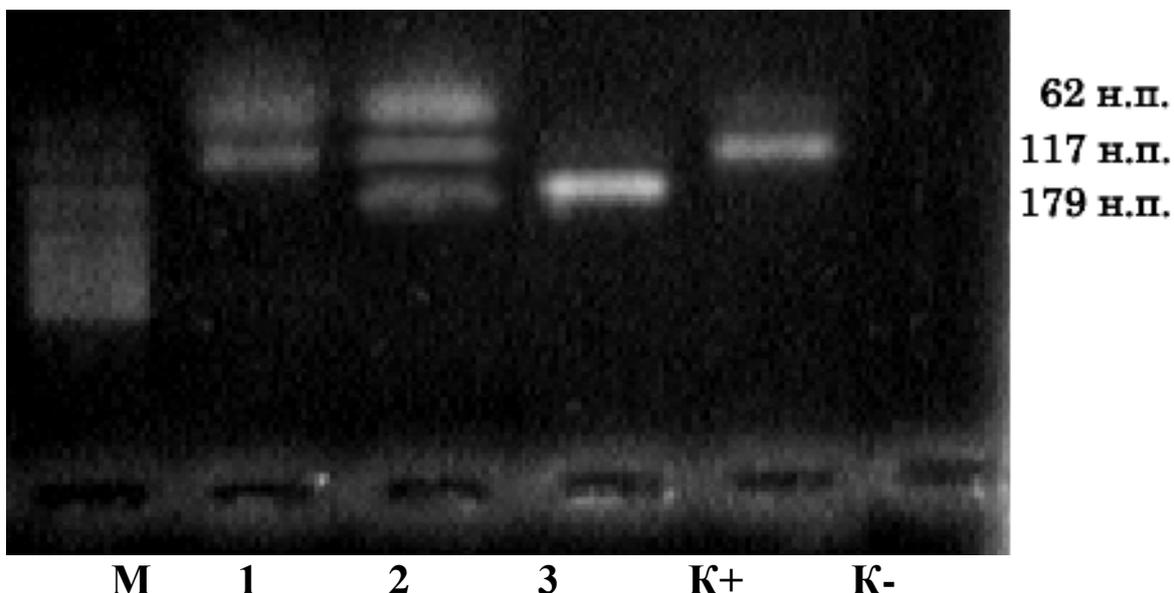


Рисунок 10 – Электрофореграмма продуктов рестрикции по гену TYR

Из рисунка 10 видно, что образец 1 включает 2 фракции (62 н.п. и 117 н.п.), что возможно только для особей с генотипом CC . Образец 2 содержит 3 фракции (62 н.п., 117 н.п. и 179 н.п.), что говорит о гетерозиготном генотипе Cc^s . Что касается 3 образца, то там присутствует только одна фракция (179 н.п.), что характеризует гомозиготу $c^s c^s$.

В результате проведенных исследований были отработаны и апробированы методы молекулярно-генетической идентификации особей *F. catus* акромеланистических окрасов. Позволяющие четко выявлять гетерозиготных особей (генотип Cc^s), которые фенотипически неотличимы от особей с генотипом CC .

Работа проводилась в рамках темы ГБ 21-34 «Фаунистические и физиологические исследования животных и человека Гомельского региона».

Литература

1. Гончаренко, Г. Г. Генетика. Анализ наследственных закономерностей на генах меха кошек *Felis catus* : практическое пособие / Г. Г. Гончаренко, С. А. Зятков. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2007. – 108 с.
2. О'Брайен, С. Генетика кошки / С. О'Брайен, Р. Робинсон, А. С. Графодатский, А. В. Таранин. – Новосибирск : Наука, 1993. – 212 с.
3. Searle, A. G. Comparative genetics of coat color in mammals / A. G. Searle. – London : Logos P.; New York : Academic P., 1968. – 308 p.
4. V. del Marmol, V. Tyrosinase and related proteins in mammalian pigmentation / V. del Marmol, F. Beermann // FEBS Lett. – 1996. – Vol. 381. – P. 165–168.
5. Hearing, V. J. Enzymatic control of pigmentation in mammals / V. J. Hearing, K. Tsukamoto // FASEB J. – 1991. – Vol. 5. – P. 2902–2909.
6. Pawelek, J. M. The enzymology of melanogenesis / J. M. Pawelek, A. K. Chakraborty. // Pigmentary System. – New York : Oxford University Press, 1998. – P. 391–400.
7. Зятков, С. А. Характер наследования и механизмы взаимодействия генов окраски меха у домашних кошек / С. А. Зятков // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2007. – № 6 (45). – С. 81–86.
8. Зятков, С. А. Молекулярно-генетическая дактилоскопия особей *Felis catus* акромеланистических окрасов / С. А. Зятков, И. В. Курако // Ростовский научный журнал. – 2017. – № 12 (50). – С. 362–366.
9. Lyons, L. A. Tyrosinase mutations associated with Siamese and Burmese patterns in the domestic cat (*Felis catus*) / L. A. Lyons, D. L. Imes, H. C. Rah, R. A. Grahn // Anim. Genet. – 2005. – № 36 (2). – P. 119–126.
10. Schmidt-Kuntzel, A. Tyrosinase and Tyrosinase Related Protein 1 Alleles Specify Domestic Cat Coat Color Phenotypes of the albino and brown Loci / A. Schmidt-Kuntzel, E. Eizirik, S. J. O'Brien, M. Menotti-Raymond // Journal of Heredity. – 2005. – Vol. 96 (4). – P. 289–301.
11. Imes, D. L. Albinism in the domestic cat (*Felis catus*) is associated with a tyrosinase (TYR) mutation / D. L. Imes, L. A. Geary, R. A. Grahn, L. A. Lyons // Animal Genetics. – 2006. – Vol. 37. – P. 175–178.
12. Yu, Y. Mocha tyrosinase variant : a new flavour of cat coat coloration / Y. Yu, R. A. Grahn, L. A. Lyons // Animal Genetics. – 2019. – Vol. 50. – P. 182–186.
13. O'Brien, S. J. The Feline Genome Project / S. J. O'Brien, M. Menotti-Raymond, W. J. Murphy, N. Yuhki // Annu. Rev. Genet. – 2002. – Vol. 36. – P. 657–686.
14. Pontius, J. U. Initial sequence and comparative analysis of the cat genome / J. U. Pontius [et al.] // Genome Res. – 2007. – Vol. 17. – P. 1675–1689.
15. Cho, K. W. A proposed nomenclature of the domestic cat karyotype / K. W. Cho [et al.] // Cytogenet Cell Genet. – 1997. – Vol. 79. – P. 71–78.

УДК 577.391:517.4; 615.9:533.16

Влияние экологических условий на биологическую доступность и накопление ^{137}Cs луговыми злаками зоны отчуждения

С.А. КАЛИНИЧЕНКО¹, А.Н. НИКИТИН², О.А. ШУРАНКОВА²

Установлены особенности влияния различных экологических условий на биологическую доступность и накопление ^{137}Cs луговыми злаками зоны отчуждения ЧАЭС. Обнаружено снижение содержания ^{137}Cs в луговых травах по мере удаления фитоценоза от эпицентра аварии, при снижении качественных показателей сообщества (проективное покрытие и физическое состояние растений). Исследовано влияние агрохимических параметров почвы, содержания почвенной влаги, соотношения форм подвижности радионуклида в почве на биологическую доступность ^{137}Cs . Проведён анализ коэффициентов накопления (K_n) и перехода (K_p), коэффициента дискриминации (DF) ^{137}Cs химическим элементом-аналогом (калием). Видовые особенности растений, связанные с транспортом катионов $\text{K}^+ - \text{Cs}^+$ вносят существенные коррективы в механизмы накопления ^{137}Cs .

Ключевые слова: луговые злаки, почва, ^{137}Cs , экологические условия, зона отчуждения ЧАЭС.

The features of the influence of various environmental conditions on the biological availability and accumulation of ^{137}Cs by meadow grasses of exclusion zone of the CNPP have been established. A decrease in the concentration of ^{137}Cs in meadow grasses was found as the phytocenoses moved away from the epicenter of the accident, with a decrease in the quality indicators of the community (projective cover and physical condition of plants). The effect of soil agrochemical parameters, soil moisture content, and the ratio of radionuclide mobility forms in soil on the bioavailability of ^{137}Cs was studied. The analysis of the soil-to-plant transfer factors (C_f) and aggregated transfer factors (T_{ag}), the discrimination coefficient (DF) of ^{137}Cs by a chemical analog element (potassium) was carried out. The species features of the plants associated with the transport of $\text{K}^+ - \text{Cs}^+$ cations make significant adjustments to the mechanisms of ^{137}Cs accumulation.

Keywords: wild-growing meadow grasses, soil, ^{137}Cs , environmental conditions, exclusion zone of the CNPP.

Введение. Луговые растения различных биологических видов, экологических групп, обитающие в сообществах различных синтаксонов, демонстрируют разную способность к аккумуляции радионуклидов. При этом принято считать, что интенсивность поступления радионуклидов в луговые растения ниже, чем лесные травы, а также часто наблюдается тенденция снижения коэффициентов накопления (K_n) радионуклидов по мере увеличения степени загрязнения почвы [1]. На этот процесс могут оказывать существенное влияние различные эдафотопные факторы, включая режим увлажнения, агрохимические параметры почвы, формы нахождения радионуклидов и т. д. [2]–[4]. Естественно, что при этом поведение радионуклидов будет различаться в условиях различных типах лугов (пойменные, низинные, заболоченные, суходольные). Так, низинные и пойменные луговые экосистемы обычно отличаются наибольшими параметрами перехода радионуклидов в травянистую растительность, а видовые различия в накоплении ^{137}Cs при этом могут составлять до 30 раз [5]. По данным [6] максимальными K_n ^{137}Cs и ^{90}Sr отличались растения луговых экосистем, почвенный покров которых представлен почвами с лёгким механическим составом, обладающих повышенным содержанием доступных для растений форм радионуклидов (водорастворимой и обменной), а видовые особенности накопления радионуклидов луговыми растениями при этом обнаружили различия для ^{137}Cs – 2–4, ^{241}Am – 2–5 раз, для ^{90}Sr и $^{239-240}\text{Pu}$ – до 3 раз. Также в работе отмечалось влияние на накопление радионуклидов некоторых элементов минерального питания растений. Помимо указанных особенностей необходимо учитывать, что растительный покров любого луга неравномерен, а представлен различными группировками растений (сообществами) способными формировать индивидуальные микроклиматические особенности и почвенные свойства в пределах каждого растительного сообщества.

Материалы и методы исследований. Для проведения исследований на территории зоны отчуждения аварии на ЧАЭС в «Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике» в 2020 г на расстоянии около 11–15 км от эпицентра аварии на-

ми были выбраны 3 луговых фитоценоза, в каждом из которых были заложены по 20 экспериментальных площадок размером 2×2 м. Территория экспериментальных полигонов (132, 116, 121 квартал Радинского лесничества) с автоморфным типом почвы имеет тип лесорастительных условий A_2 [7]. Почва дерново-подзолистая супесчаная со средней плотностью на луговом фитоценозе № 1 – $1,35 \text{ г/см}^3$ ($270,45 \text{ кг/м}^2$), луговом фитоценозе № 2 – $1,67 \text{ г/см}^3$ ($334,32 \text{ кг/м}^2$), луговом фитоценозе № 3 – $1,62 \text{ г/см}^3$ ($323,09 \text{ кг/м}^2$), что предварительно может указывать на большее содержание органической составляющей в почве первого полигона.

Синхронно с отбором почвенных образцов с каждой экспериментальной площадки отбирали надземные части луговых растений. Для исследования были выбраны 4 вида злаков, присутствовавшие на каждом из экспериментальных полигонов: пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.)), вейник наземный (*Calamagrostis epigéjos* (L.) Roth), осока трясунковидная (*Carex brizoides* (L.)), мятлик луговой (*Poa praténsis* (L.)). В натуральных условиях оценивали состояние (стресс) злаковых растений на площадке по пятибальной шкале (1 – стресс отсутствует; 5 – полное угнетение), определяли фенологическую фазу развития выбранных видов растений на площадке. Проективное покрытие составило для лугового фитоценоза № 1 – 100 %, для лугового фитоценоза № 2 – 75 %, для лугового фитоценоза № 3 – 60 %. Активно на данных лугах идёт процесс залесения. В древесном подросте встречается берёза повислая, или бородавчатая (*Betula pendula* Roth), дуб черешчатый (*Quercus robur* (L.)) и сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* (L.)). В камеральных условиях определяли массу образцов растений в естественном состоянии, после чего образцы высушивали до воздушно-сухого состояния.

С целью определения агрохимических показателей, коэффициентов перехода (K_n) радионуклидов ($\text{Бк/кг}:\text{кБк/м}^2$) и K_n ($\text{Бк/кг}:\text{Бк/кг}$) были отобраны почвенные образцы на каждом экспериментальном полигоне стандартным тростевым пробоотборником диаметром 4 см на глубину 20 см, включающие 5 уколов. Одновременно были проведены измерения мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы γ -излучения (МД) на высоте 1 м и 3–4 см от поверхности почвы при помощи дозиметра-радиометра МКС-АТ 1125 (АТОМТЕХ, РБ). В лабораторных условиях пробы почвы высушивали при температуре 20–25°C и гомогенизировали. После высушивания в очищенных от остатков корней образцах почвы определяли: гигроскопическую влагу, содержание глины в механическом составе, рН (KCl), NH_4^+ , содержание органического вещества, калий обменный, кальций обменный, магний обменный, цезий обменный, калий растворимый, кальций растворимый, магний растворимый, цезий растворимый, калий лабильный (тетрафенилборатный метод), цезий лабильный (тетрафенилборатный метод), доля воды (отношение массы воды в почве к массе влажной почвы). В надземных частях растений определяли содержание: ^{137}Cs методом γ -спектрометрии «МКС-АТ1315» (Атомтех, Беларусь) с блоком детектирования для регистрации γ -излучения на основе сцинтилляционного кристалла NaI (Tl) размерами $\text{Ø}63 \times 63$ мм, калия методом масс-спектрометрии после микроволнового вскрытия образцов листьев. В работе также оценивали коэффициент дискриминации (DF) ^{137}Cs химическим элементом-аналогом (калием). Для обработки результатов использованы стандартные методы вариационной статистики [8].

Результаты исследований и их обсуждение. Наиболее высокие величины МД, как показывают усреднённые значения (3,28–2,93 мкЗв/ч), были характерны для лугового фитоценоза № 1, расположенного ближе всего к украинской границе и соответственно эпицентру аварии на ЧАЭС. Анализ содержания ^{137}Cs в верхнем 20-см слое почвы экспериментальных площадок указывает на практически идентичную плотность загрязнения (таблица 1), что позволяет объективно оценить влияния экологических условий на накопление ^{137}Cs луговыми злаками, минимизируя математическую погрешность при расчёте K_n и K_n .

Несмотря на практически одинаковое среднее содержание ^{137}Cs в верхнем слое почвы исследуемых фитоценозов, размах варьирования данного параметра значительно снижается в сторону луга с более скудной травянистой растительностью. Видимо в данном случае на отдалённом этапе после радиационной катастрофы более чётко проявляется действие вторичных биотических факторов, значительно влияющих на пространственное перераспределение радионуклидов в поверхностном слое почвы [9].

Таблица 1 – Плотность загрязнения ^{137}Cs почвы луговых фитоценозов, $\text{кБк}/\text{м}^2$ ($\text{Ки}/\text{км}^2$)

Показатели выборки	Луговой фитоценоз № 1 (n = 20)	Луговой фитоценоз № 2 (n = 20)	Луговой фитоценоз № 3 (n = 20)
\bar{x}	2968,37 (80,23)	2956,37 (79,90)	3000,87 (81,10)
$x_{\min.}$	789,70 (21,34)	1081,23 (29,22)	1352,64 (36,56)
$x_{\max.}$	5329,82 (144,05)	4749,63 (128,37)	4551,58 (123,02)
σ	1242,71 (33,59)	921,28 (24,90)	769,48 (20,80)
V, %	41,87	31,16	25,64
Me	3210,33	2896,93	2902,70
Mo	3264,80	3035,07	2705,85

Данную закономерность подтверждает и проведённый вариационный анализ. Полученные значения медианы имеют наибольшие со средней величиной различия для первой экспериментальной площадки. Значения модального класса снижаются в сторону лугового фитоценоза № 3 с более скудной растительностью.

Анализ содержания ^{137}Cs в доминирующих видах луговых злаковых растений не во всех случаях обнаружил достоверные различия как межвидовые, так и между сообществами. Тем не менее, полученные результаты обнаруживают несколько чётких тенденций. Из четырёх исследуемых луговых злаков наибольшим содержанием радионуклида отличалась осока трясунковидная на всех экспериментальных площадках. Далее по уровню содержания следовали: пырей, мятлик луговой и вейник наземный, что обусловлено видовыми особенностями данных растений. Наблюдается также заметное снижение содержания ^{137}Cs в луговых травах по мере удаления фитоценоза от эпицентра аварии, а также при снижении качественных показателей сообщества (проективное покрытие и физическое состояние растений). Наименьшее содержание почвенной влаги соответственно приходилось на луговой фитоценоз № 1, характеризующийся наибольшим содержанием ^{137}Cs в луговых растениях. Учитывая, что плотность загрязнения почвы на всех экспериментальных площадках идентична ($\approx 2960 \text{ кБк}/\text{м}^2$ ($80 \text{ Ки}/\text{км}^2$)), то данные закономерности указывают на влияние вторичных факторов. Полученные тенденции в целом подтверждаются и при расчёте K_n и K_n (рисунок 1), включая погрешность почвенного содержания ^{137}Cs , как фактор дополнительной неопределённости.

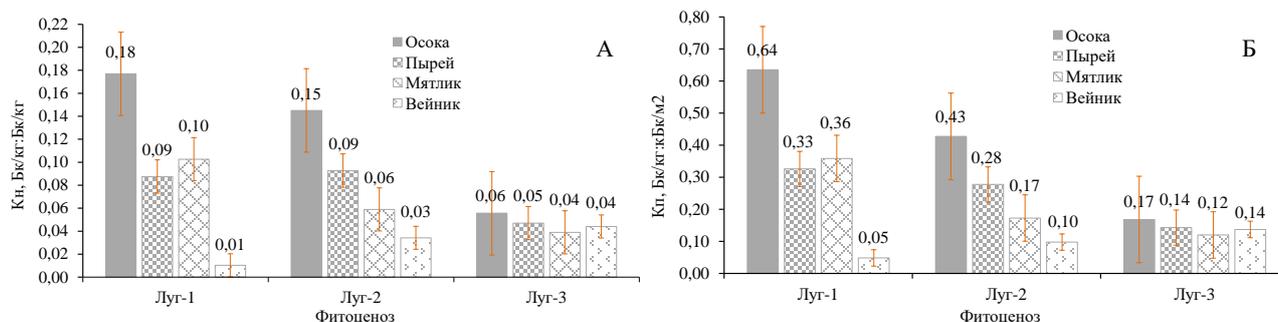


Рисунок 1 – K_n (А) и K_n (Б) ^{137}Cs в доминирующие виды луговых злаков из почвы экспериментальных площадок, $\text{Бк}/\text{кг}:\text{Бк}/\text{кг}$, $\text{Бк}/\text{кг}:\text{кБк}/\text{м}^2$

Параметры перехода также указывают на доминирование в накоплении ^{137}Cs растениями лугового фитоценоза № 1, а видовой приоритет во всех случаях принадлежит осоке.

Анализ агрохимических параметров экспериментальных площадок показал, что большинство показателей почвенного плодородия и минерального питания снижается в сторону менее продуктивных луговых фитоценозов, что в свою очередь ведёт к снижению накопления радионуклидов. Тенденция несколько нарушается только при анализе содержания обменного аммония, рН и подвижного магния, что возможно связано с методическими погрешностями. Таким образом, чёткая тенденция в накоплении ^{137}Cs прослеживается при изменении в почве содержания гумуса. Снижение содержания гумуса в почве в 1,9 раза ведёт к снижению накопления ^{137}Cs в злаках в среднем от 1,6 до 2,3 раз в зависимости от видовой

принадлежности. Аналогичная тенденция наблюдается и при анализе других показателей плодородия: гидролитической кислотности, суммы поглощённых оснований, ёмкости поглощения и степени насыщенности почв основаниями. Содержание органического вещества в почве вполне может являться одним из мониторинговых критериев при прогнозировании накопления радионуклидов луговыми злаками. Аналогичными критериями могут выступать также гидролитическая кислотность почвы, сумма поглощённых оснований, ёмкость поглощения и степени насыщенности почв основаниями. Так, например, ёмкостью поглощения или ёмкостью катионного обмена определяют общее количество катионов, которое может быть вытеснено из почвы. Данная величина характеризует физико-химическую поглотительную способность почв и зависит от минералогического и гранулометрического состава почв, а также от содержания в них гумуса. Колеблется она в широких пределах. Так, например, в суглинистых или торфяных почвах ёмкость поглощения больше, чем в песчаных. Соответственно и переход радионуклидов в растительность на таких почвах, как правило, следует ожидать более высокий. Гидролитическая кислотность – эта форма кислотности обусловлена ионами водорода, более прочно связанными в почвенном поглощающем комплексе и способными обмениваться на основания только в нейтральной или щелочной среде. Эти ионы водорода труднее замещаются на основания и вытесняются в раствор только гидролитически щелочными солями. Также как и содержание гумуса в почве, ёмкость поглощения, сумма поглощённых оснований и гидролитическая кислотность существенно зависят от режима увлажнения почвы биогеоценоза. Однако на само содержание почвенной влаги также в свою очередь оказывает влияние целый ряд различных факторов, начиная от физического состава почвы и заканчивая микроклиматическими и погодными условиями. Такие показатели, как содержание обменного аммония и pH не обнаружили видимой зависимости на накопление радионуклидов растительностью.

Существует тесная корреляционная зависимость параметров перехода радионуклидов от агрохимических показателей луговых почв (гидролитическая кислотность, содержание органического вещества, подвижных кальция, магния и др.). Органическая часть почвы обладает более высокой поглотительной способностью, чем минеральная. Поэтому, несмотря на то, что в составе мелкодисперсной фракции преобладают минеральные коллоиды, ёмкость поглощения увеличивается с возрастанием гумусированности почвы. Самая высокая гидролитическая кислотность присуща некоторым торфяным горизонтам болотных почв и их разновидностей. Обычно гидролитическая кислотность почвы больше, чем обменная. Однако минеральный состав почв играет также огромную роль при анализе поступления радионуклидов в луговую растительность, играя с одной стороны важное конкурирующее значение при питании растений, а с другой стороны замещающее значение, представляя элементы аналоги в случае их нехватки в почве. В этой связи нами также была проанализирована некоторая минеральная составляющая исследуемых луговых фитоценозов (рисунок 2).

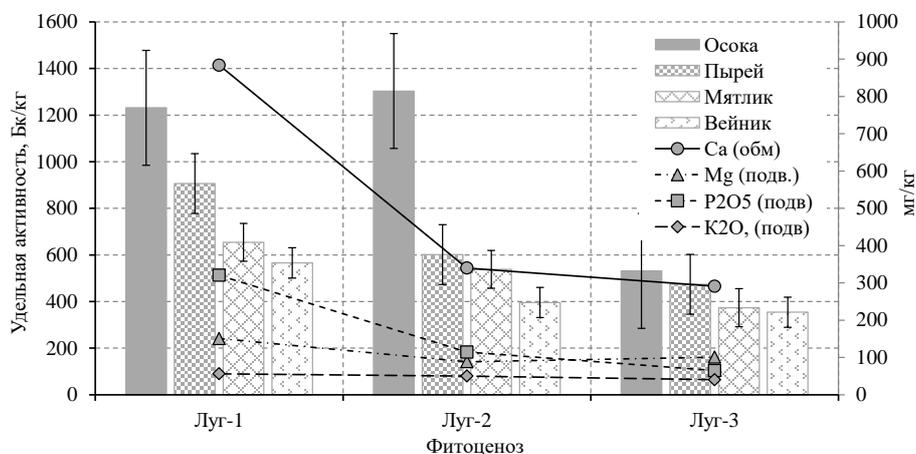


Рисунок 2 – Изменение содержания ^{137}Cs в луговых злаках в зависимости от содержания элементов минерального питания в почве экспериментальных площадок, Бк/кг, мг/кг, ед.

Практически по всем элементам минерального питания в эксперименте наблюдается снижение их содержания в сторону уменьшения почвенного плодородия лугового сообщества. Естественно данные закономерности отражаются и на физиологическом состоянии исследуемых растений и на качестве проективного покрытия фитоценоза в целом. Соответственно снижается и поступление ^{137}Cs в луговую растительность более скудных сообществ.

Расчёт корреляционных взаимосвязей между коэффициентами перехода радионуклидов в растения и агрохимическими параметрами почвы луговых фитоценозов позволяет раскрыть многие особенности, влияющие на накопление их в злаках. Из четырёх исследуемых нами видов растений не все поддаются общей закономерности, как отмечалось выше, когда почвенное плодородие влияет на рост растения и накопление в нём различных элементов, включая радиоактивные. Так, осока, мятлик и пырей обнаружили в наших исследованиях тесную прямо пропорциональную взаимосвязь практически со всеми изучаемыми показателями плодородия. Некоторые отличия в большем влиянии того или иного фактора связаны с индивидуальными (видовыми) особенностями растений. Так, например, осока, являясь более влаголюбивой, в большей степени потребляет калий. А поскольку калий в значительной мере способен замещаться ^{137}Cs , как его аналогом, то и накопление радионуклида в осоке до 2-х раз выше, чем в других растениях, что и подтверждается нашими исследованиями. Мятлик в свою очередь в равной степени нуждается во всех составляющих почвенного плодородия, поэтому и взаимосвязь здесь с коэффициентами перехода более тесная. Пырей также обнаруживает положительную корреляцию с коэффициентами перехода по всем параметрам, однако, и немного менее плотную. А вот вейник наземный со всеми агрохимическими показателями имеет очень высокую обратную корреляционную взаимосвязь, что говорит о его значительном видовом безразличии к плодородию почвы. Анализ усреднённых коэффициентов корреляции между коэффициентами перехода радионуклидов в растения и агрохимическими параметрами почвы луговых фитоценозов в целом (т. н. комплексный агрохимический показатель) также подтверждает выявленные закономерности, где мятлик является лидером по зависимости величины перехода ^{137}Cs от почвенного плодородия, а вейник наоборот.

Возможность прогнозировать накопление радионуклидов луговыми злаками даёт в ряде случаев анализ форм подвижности радионуклидов в почве. Хотя и в данном случае не всегда удаётся получить однозначный ответ из-за возможного влияния сразу нескольких факторов. В нашем случае подтверждена тенденция первостепенного участия в накоплении радионуклидов луговыми растениями лабильных форм цезия. Коэффициент корреляции между содержанием в почве лабильных форм и коэффициентами накопления радионуклида достигали единицы. Исключение опять же составил вейник наземный, где большее участие принадлежит обменным формам ($r = 0,74$). Детальный анализ содержания форм подвижности радионуклидов в почве указывает на две обнаруженные тенденции. Первая – наибольшее содержание лабильных форм ^{137}Cs в почве независимо от экспериментальной площадки (32,78–52,35 %), наименьшее – растворимых форм (0,19–0,22 %), обменных (7,69–9,36 %). Вторая – чем выше плодородие лугового фитоценоза, тем выше содержание в почве лабильных форм радионуклида. Выявление форм наиболее тесно связанных с накоплением радионуклидов не обнаружило каких-либо достоверных взаимосвязей. Выявлена лишь некоторая тенденция к более тесной взаимосвязи поступления доступных форм ^{137}Cs на более скудных лугах, с меньшим увлажнением и плодородием.

Расчёт коэффициентов дискриминации ^{137}Cs калием у злаковых растений в условиях залежных лугов ближней зоны ЧАЭС показал в целом достаточно высокие значения, что говорит о большом количестве в почве доступных форм ^{137}Cs . Поступление же калия в растительные ткани, хоть он и имеет высокое сродство с цезием, ограничено его низким содержанием в почве, по сравнению с ^{137}Cs и отсутствием дополнительных источников депонирования в почве. Обнаруженные нами зависимости в ряде случаев недостоверны, однако указывают на некоторые выявленные тенденции (рисунок 3). Несмотря на значительное превышение поступления ^{137}Cs в луговые злаки, в большинстве случаев наблюдается некоторое усиление транспорта K^+ по мере снижения почвенного плодородия и соответственно биопродуктивности экспериментальных площадок. Таким образом, на третьей экспериментальной площадке наблюдается даже преобладание поступления калия, чем ^{137}Cs в растения для трёх видов растений: осоки трясунковидной, вейника наземного и мятлика лугового.

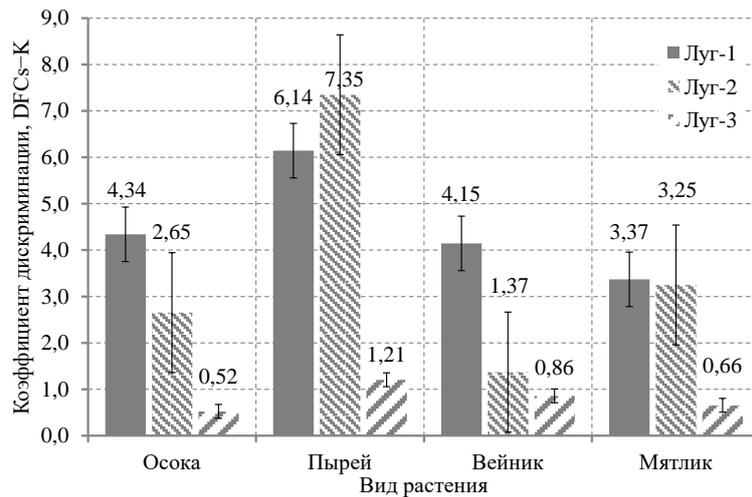


Рисунок 3 – Коэффициенты дискриминации ($DF^{137}\text{Cs-K}$) у луговых злаков различных экспериментальных площадок

При этом необходимо отметить и большее количество почвенной влаги, способствующей усилению транспорта K^+ , на данной экспериментальной площадке. Следовательно, максимальная разница между DF на различных экспериментальных площадках составила для осоки – 8,3 раза, для пырея – 6,1, для вейника – 4,8, для мятлика – 5,1 раза. На некоторую вариабельность коэффициентов дискриминации также могут оказывать влияние и другие показатели почвенного плодородия, что вносит в условиях эксперимента *in vivo* значительную неопределённость, связанную с многофакторностью. Анализ видовых различий DF между участвовавшими в эксперименте луговыми растениями указывает на достоверное превышение значений коэффициентов дискриминации для пырея ползучего на каждой экспериментальной площадке. Видимо данный вид обладает индивидуальными особенностями при транспорте этих элементов, несмотря на то, что лидером в накоплении ^{137}Cs в наших исследованиях являлась осока трясунковидная. Данное обстоятельство подтверждается в некоторой степени и анализом содержания калия в самих растениях. В целом анализ содержания калия в растениях и коэффициентов дискриминации подтверждает обнаруженные нами ранее тенденции накопления ^{137}Cs . Накопление радионуклида снижается по мере уменьшения плодородия экспериментального полигона и агрохимических параметров почвы (в нашем случае в ряду луг-1 > луг-2 > луг-3). Однако видовые особенности растений, связанные с транспортом катионов K^+-Cs^+ , вносят существенные коррективы в механизмы накопления ^{137}Cs . С учётом DF наибольшим родством к накоплению радионуклида из всех исследуемых нами растений имеет пырей ползучий, ткани которого содержат больше калия. Причём данная особенность подтверждается на всех экспериментальных площадках. Следовательно, высокие коэффициенты накопления и перехода для осоки обусловлены другими её особенностями, не связанные с повышенной диффузией калия в её ткани, что требует дальнейших исследований.

Заключение. Проведённые исследования позволили установить и уточнить ряд особенностей накопления ^{137}Cs луговыми растениями на территории зоны отчуждения ЧАЭС на современном этапе, а также факторы, влияющие на его биологическую доступность. Из трёх исследуемых луговых злаков наибольшим содержанием радионуклида отличалась осока трясунковидная на всех экспериментальных площадках. Далее по уровню содержания следовали: пырей, мятлик луговой и вейник наземный, что обусловлено видовыми особенностями данных растений. Обнаружено заметное снижение содержания ^{137}Cs в луговых травах по мере удаления фитоценоза от эпицентра аварии, а также при снижении качественных показателей сообщества (проективное покрытие и физическое состояние растений). Наибольшее содержание ^{137}Cs в луговых растениях характерно для фитоценоза с наименьшим содержанием почвенной влаги. Полученные тенденции подтверждаются и при расчёте K_n и K_d .

Анализ агрохимических параметров экспериментальных площадок показал, что большинство показателей почвенного плодородия и минерального питания снижается в сторону менее

продуктивных луговых фитоценозов, что в свою очередь ведёт к снижению накопления радионуклидов. Тенденция несколько нарушается только при анализе содержания обменного аммония, рН и подвижного магния. Снижение содержания гумуса в почве в 1,9 раза ведёт к снижению накопления ^{137}Cs в злаках в среднем от 1,6 до 2,3 раз в зависимости от видовой принадлежности. Аналогичная тенденция наблюдается и при анализе влияния гидролитической кислотности, суммы поглощённых оснований, ёмкости поглощения и степени насыщенности почв основаниями. Снижение поступления ^{137}Cs в луговую растительность происходит одновременно с уменьшением почвенного плодородия лугового сообщества и минерального питания.

Анализ содержания форм подвижности радионуклидов в почве указывает на две обнаруженные тенденции. Первая – наибольшее содержание лабильных форм ^{137}Cs в почве независимо от экспериментальной площадки (32,78–52,35 %), наименьшее – растворимых форм (0,19–0,22 %), обменных (7,69–9,36 %). Вторая – чем выше плодородие лугового фитоценоза, тем выше содержание в почве лабильных форм ^{137}Cs . Поступление калия в растительные ткани, хоть он и имеет высокое родство с цезием, ограничено его низким содержанием в почве зоны отчуждения и отсутствием дополнительных источников депонирования. Максимальная разница между DF на различных экспериментальных площадках составила для осоки – 8,3 раза, для пырея – 6,1, для вейника – 4,8, для мятлика – 5,1 раза. Видовые особенности растений, связанные с транспортом катионов $\text{K}^+ - \text{Cs}^+$, вносят существенные коррективы в механизмы накопления ^{137}Cs .

Литература

1. Булохов, А. Д. Аккумуляция ^{137}Cs растениями луговых экосистем приграничных территорий Брянской, Гомельской и Черниговской областей / А. Д. Булохов [и др.] // Научный диалог. – 2014. – № 1 (25). – С. 5–13.
2. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС : состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации / В. А. Ипатьев [и др.] // Под общ. ред. В. А. Ипатьева. – Гомель : Институт леса НАН Беларуси, 1999. – 454 с.
3. Алексахин, Р. М. Миграция радионуклидов в лесных биогеоценозах / Р. М. Алексахин, М. А. Нарышкин – М. : Наука, 1977. – 144 с.
4. Переволоцкий, А. Н. Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных биогеоценозах / А. Н. Переволоцкий. – Гомель : РНИУП «Институт радиологии», 2006. – 255 с.
5. Алексахин, Р. М. Основные итоги работ в области сельскохозяйственной радиологии по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС в 1986–2001 гг. (к 15-й годовщине аварии) / Р. М. Алексахин, С. В. Фесенко, Н. И. Санжарова // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2001. – Т. 41, вып. 3. – С. 313–325.
6. Ларионова, Н. В. Накопление искусственных радионуклидов растениями на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.01 / Н. В. Ларионова. – Обнинск, 2013. – 23 с.
7. Сибирякова, М. Д. Определение типов леса по растениям индикаторам / М. Д. Сибирякова, Т. Б. Вернандер – М., Ленинград : Гослесбумиздат, 1957. – 148 с.
8. Лакин, Г. Ф. Биометрия : учеб. пособ. для биологич. спец. вузов / Г. Ф. Лакин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 1980. – 293 с.
9. Калиниченко, С. А. Латеральная миграция радионуклидов чернобыльского происхождения в почве зоны отчуждения / С. А. Калиниченко, Р. А. Ненашев, А. Н. Никитин // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Сер. 5, Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2021. – № 2. – С. 21–33.

¹Полесский государственный радиационно-экологический заповедник

²Институт радиобиологии
НАН Беларуси

Поступила в редакцию 21.01.2022

Демонстрационные объекты по лесным культурам в Корневской экспериментальной лесной базе

Л.К. Климович, В.В. Трухоновец

В статье представлен маршрут для ознакомления с опытно-производственными лесными культурами ГЛХУ «Корневская экспериментальная база Института леса НАН Беларуси». Приведены основные лесоводственно-таксационные характеристики искусственных насаждений. Показана важность использования демонстрационных объектов по лесным культурам в процессе подготовки инженеров лесного хозяйства.

Ключевые слова: опытно-производственные объекты, лесные культуры, интродуценты, маршрут, дендрарий.

The article presents a route to get acquainted with the experimental and production forest crops of the GLHU «Korenevskaya Experimental Base of the Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus». The main forestry and taxation characteristics of artificial plantings are given. It shows the importance of using demonstration objects on forest crops in the training of forest engineers.

Keywords: pilot production facilities, forest crops, introducer, route, arboretum.

Ведение. В последнее время в мире востребовано экологическое просвещение и экологический туризм. Природный потенциал лесов Беларуси для развития этих направлений огромен [1].

Целью данной статьи является ознакомление с опытно-производственными лесными культурами ГЛХУ «Корневская экспериментальная лесная база Института леса НАН Беларуси» (КЭЛБ), которые используются при проведении тематических экскурсий студентами специальности «Лесное хозяйство» биологического факультета ГГУ имени Ф. Скорины при прохождении учебных и производственных практик. Созданные многолетние стационарные объекты в лесфонде КЭЛБ являются важнейшим элементом подготовки специалистов лесного хозяйства Беларуси [2], [3].

Большое значение для будущих лесоводов имеют вопросы лесовосстановления. Основными культивируемыми породами на территории КЭЛБ являются сосна и дуб, в качестве сопутствующих используются лиственница европейская, клен, липа, кустарники и плодовые породы. Доля лесных культур в объеме лесовосстановления составляет 45 %. Производство их осуществляется посадкой сеянцев и саженцев на лесокультурных площадях, посадка лесных культур ели проводится крупномерным посадочным материалом. Кулисы березы в сосново-березовых культурах являются биологическим барьером при корневой губке и естественными противопожарными барьерами. В качестве кустарников-азотонакопителей осуществляется посадка акации желтой и аморфы кустарниковой [3].

Материалы и методика исследований. Выбор демонстрационных объектов для показа студентам на разработанном маршруте осуществлялся по следующим критериям:

- объекты садово-паркового строительства, расположенные на территории лесного фонда (усадебный дендропарк);
- лесные объекты и объекты лесохозяйственной деятельности (высоковозрастные, высокопродуктивные, редкие по ценологическому и видовому составу лесные насаждения, уникальные деревья, породы интродуценты, научные объекты лесных исследований и т. п.).

В историческом прошлом в окрестностях г. Гомеля располагались обширные охотничьи угодья князя Паскевича. В п. Корневка сохранился охотничий дом, являющийся памятником архитектуры первой половины XIX века. Вокруг дома разбит живописный парк, перед домом – красивое искусственное озеро.

Результаты и обсуждение. Маршрут составлен по наиболее интересным опытным объектам для проведения тематических экскурсий. Он пересекает четыре лесных квартала

КЭЛБ: 129, 164, 166 и 167. Протяженность пути составляет около 3-х км. При проведении экскурсии используется 8 опытно-производственных объектов по лесным культурам. Категория лесов – эксплуатационные.

Объект 1 расположен в 129 квартале 4 выделе Корневского лесничества. Это лесные культуры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*), являющиеся уникальным объектом по изучению особенностей роста и развития искусственных насаждений (рисунок 1). Тип леса – сосняк кисличный, тип условий местопроизрастания С₂. Насаждение 8С2Г+Ос, возраст 135 лет, I класс бонитета. Полнота – 0,8, запас 430 м³/га. Почва – тяжелая свежая супесь, подстилаемая на глубине 1,5–2 м тяжелыми и средними суглинками. Напочвенный покров представлен кислицей обыкновенной, черникой, майником двулистным, седмичником европейским, ландышем майским, звездчаткой дубравной, снытью обыкновенной и др. Местоположение участка пониженное, ровное.



Рисунок 1 – Лесные культуры сосны обыкновенной

Культуры созданы в 1886 г. Посадка проводилась вручную под лопату 2–3-летними дичками сосны, выкопанными в лесу вместе с глыбкой земли. Размещение посадочных мест 1,5 × 1,5 сажени (3,1 × 3,1 м), густота посадки 1–1,1 тыс. шт./га. Первоначальный состав – 10С. Опытный объект создан с целью изучения продуктивности культур сосны обыкновенной. Динамика исследованных культур отличается высокой энергией роста и сохранением её в течение длительного времени. Описанный опыт является свидетельством того, что редкие посадки сосны при обеспечении должной сохранности и ухода за лесными культурами могут вырасти в насаждение, имеющие высокие запасы и хорошее качество древесины.

Маршрутный ход проходит через постоянный лесной питомник. Для выращивания посадочного материала с целью лесовосстановления и лесоразведения, крупномерного посадочного материала различных видов древесных пород, используемых в целях озеленения, растений с закрытой корневой системой в КЭЛБ имеются 2 питомника и 4 теплицы. Видовой состав выращиваемых и реализуемых растений составляет более 60 видов и разновидностей.

Объект 2 – лесные культуры тополя – находится в 129 квартале 14 выделе. Тип леса топольник орляковый, тип условия местопроизрастания – В₂. Возраст культур – 4 года. Способ подготовки почвы – бороздами плугом ПКЛ-70А. Густота посадки 3 тыс. шт./га. Состав – 8Т2Ос, сомкнутость – 1,0. Культуры тополя интересны тем, что густота посадки по классификации Е.С. Кретьова является редкой, культуры данной породы в лесном фонде Беларуси создаются редко.

Объект 3 – сосново-березовые культуры – расположен в квартале 164 выделе 19. Тип леса – сосняк орляковый, тип лесорастительных условий В₂. Состав насаждения – 6С4Б. Возраст 46 лет, класс бонитета – I^а. Полнота насаждения – 0,7, запас – 260 м³/га. Подлесок средней густоты, представлен крушиной ломкой и рябиной.

Смешанные культуры из сосны и березы наиболее распространены в лесном фонде

КЭЛБ, отличаются высокой продуктивностью.

Объект 4 – культуры ольхи черной (*Alnus glutinosa L.*) – расположен в квартале 164 выделе 25 (рисунок 2). Тип леса – ольшаник кисличный, тип условий местопроизрастания Д₂. Состав насаждения – 6Олч2Б2Ос. Возраст 50 лет, класс бонитета – I. Полнота насаждения – 0,7, запас – 240 м³/га. Состав подроста 8Кл2Д, высота 8,0 м, густота 1,0 тыс. шт./га, благонадежный. Подлесок редкий, представлен крушиной ломкой и рябиной.

Чёрная ольха является одной из основных лесообразующих пород в стране, ее древесина широко используется в народном хозяйстве. Поэтому созданию лесных культур ольхи черной следует уделять больше внимания.



Рисунок 2 – Черноольшаник кисличный

Объект 5 – лесные культуры дуба красного (*Quercus rubra L.*) – расположен в квартале 164 выделе 38. Состав насаждения – 9Дк1Б+Ивд+Ос. Возраст 34 года, класс бонитета I. Полнота насаждения – 0,7, запас – 120 м³/га (рисунок 3).



Рисунок 3 – Культуры дуба красного

Сохранилось 96 деревьев. До недавнего времени в Беларуси дуб красный рассматривали в качестве перспективной породы-интродуцента. Однако, в настоящее время данная порода признана инвазивным растением, создающим угрозу биологическому разнообразию страны.

Объект 6 – дендрарий – расположен на территории 166 квартала 13 выдела. Здесь находится множество опытных посадок различных древесных и кустарниковых пород, в том числе интродуцентов: орех черный (*Juglans nigra*), абрикос маньчжурский (*Prunus mandschurica*), сосна Веймутова (*Pinus strobus L.*), бархат амурский (*Phellodendron amurense Rupr.*), гледичия обыкновенная (*Gleditsia triacanthos L.*), ольха зеленая (*Alnus alnobetula Ehrh.*), орех серый (*Juglans cinerea L.*), клен гиннала (*Acer ginnala*), вишня пенсильванская (*Prunus pensylvanica*), черемуха виргинская (*Padus virginiana*), спирея иволистная (*Spiraea salicifolia*), жимолость маака (*Lonicera maackii*), ирга колосоцветная (*Amelanchier*) и другие виды. Основные посадки созданы в 1951 г. и позволяют провести сравнительный анализ темпов роста и развития различных древесных пород, их лесоводственно-таксационных характеристик. Отдельно заслуживают внимания культуры бархата амурского (*Phellodendron amurense*) (амурское пробковое дерево). Посадки бархата амурского могут быть интересны как наиболее устойчивые к засухе климатипы.

Объект 7 – лесные культуры лиственницы сибирской (*Larix sibirica*) – расположен в квартале 166 выделе 36. Тип леса – листвяг кисличный, тип условий местопроизрастания – Д₂ (рисунок 4). Возраст 65 лет, состав насаждения – 8Л1Лп1Д+Кл. Класс бонитета I. Полнота насаждения – 0,7, запас – 320 м³/га. Состав подроста: 10Кл, высота 2,0 м, 2,0 тыс. шт./га. Подлесок редкий из крушины ломкой, рябины, лещины обыкновенной.

Лиственница крайне светолюбива и плохо возобновляется под пологом леса, оказывает аллелопатическое воздействие на собственный подрост. В культурах лиственницы отмечен микоризный вид гриба масленок лиственничный (*Suillus grevillei* (Klotzsch) Singer).



Рисунок 4 – Культуры лиственницы

Объект 8 – лесные культуры ясеня обыкновенного (*Fraxinus excelsior L.*) расположен в 167 квартале 21 выделе (рисунок 5). Состав насаждения – 5Я1Д3Б1Ос+Олч. Тип леса – ясеник кисличный, тип условий местопроизрастания – Д₂. Возраст – 42 года, класс бонитета I. Полнота насаждения – 0,8, запас – 170 м³/га. Подлесок редкий, представлен крушиной ломкой, рябина, лещина обыкновенная. Ясень – ценная твердолиственная порода, в благоприятных условиях обладает быстрым ростом. Широко используется в ландшафтном дизайне. В перспективе планируется значительное увеличение объемов создания лесных культур ясеня

обыкновенного в Беларуси.



Рисунок 6 – Культуры ясеня обыкновенного

Заключение. Вышеприведенные демонстрационные объекты по лесным культурам позволяют оценить искусственные культурценозы на разных фазах роста и развития в зависимости от породного состава, густоты посадки, условий местопроизрастаний. На маршруте можно ознакомиться с аборигенными и интродуцированными породами, сформировать представление о перспективности их выращивания в лесных культурах.

Литература

1. Ермолина, И. В. Научное обеспечение развития туризма в лесном хозяйстве / И. В. Ермолина, В. В. Зеленский, В. П. Клименков // Эко- и агротуризм : перспективы развития на локальных территориях : сб. науч. ст. ; редкол.: В. И. Кочурко (гл. ред.). – Минск : Четыре четверти, 2013. – С. 25–39.
2. ГЛХУ «Корневская экспериментальная лесная база ИЛ НАН Беларуси» [Электронный ресурс] // Официальный сайт ГЛХУ «Корневская экспериментальная лесная база ИЛ НАН Беларуси». – Режим доступа : <http://www.kelb.by>. – Дата доступа : 10.10.2021.
3. Лесоустроительный проект Государственного лесохозяйственного учреждения «Корневская экспериментальная лесная база Института леса Национальной академии наук Беларуси» на 2021–2030 г : пояснительная записка. – Минск : Белгослес, 2020. – 204 с.

Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 07.04.2022

Определение регенерационной способности междоузлий культуре *in vitro* рода *Betula* L.

И.И. КОНЦЕВАЯ

На основании выполненных исследований выявлена межвидовая, внутривидовая, межклоновая и внутриклоновая изменчивость по пролиферирующей и органогенной способности у отрезков междоузлий в культуре *in vitro* рода *Betula* L. Из органогенных процессов преобладал процесс побегообразования. Адвентивные почки и побеги формировались только на каллусной ткани. Ризогенез на отрезках междоузлий отмечали как напрямую из ткани экспланта, так и из каллусной ткани. Клон ч1 березы чернокорой проявил высокую побегообразующую способность на средах, дополненных 6-БАП и зеатином, и на безгормональной среде.

Ключевые слова: каллусогенез, органогенез *in vitro*, регенерационная активность, культура *in vitro*, 6-бензиламинопурин, зеатин, междоузлие, береза.

On the basis of the performed studies, interspecific, intraspecific, interclonal and intracolon variability in proliferating and organogenic capacity of internodes segments *in vitro* of the genus *Betula* L. was revealed. Of the organogenic processes, the shoot formation process prevailed. Adventive buds and shoots were formed only on callus tissue. Rhizogenesis in the internodes segments was noted both directly from the explant tissue and from the callus tissue. Clone ch1 of black birch showed a high shoot-forming ability on media supplemented with 6-BAP and zeatin, as well as on a hormone-free medium.

Keywords: callusogenesis, organogenesis *in vitro*, regenerative activity, culture *in vitro*, 6-benzylaminopurine, zeatin, internodes, birch.

Введение. Культура *in vitro* различных видов рода *Betula* L. вызывает у исследователей большой интерес и находит значительное практическое применение, поскольку позволяет размножать уникальные деревья и выдающиеся насаждения, отбирать ценные мутантные формы, гибридные генотипы [1], [2]. Без совершенствования данного метода нельзя представить развитие очень перспективного направления улучшения растений – генетической трансформации. Однако для получения трансгенных растений должна быть разработана эффективная система регенерации побегов из трансформированных клеток и тканей. Чаще всего для генноинженерных манипуляций в качестве эксплантов используют листья, в меньшей степени – черешки листьев, междоузлия. Усовершенствование знаний о пролиферирующей и органогенной способности культуры тканей растений также представляет интерес для получения организмов с измененной ploidy, соматоклональных вариантов и для микроклонального размножения.

Для различных видов березы имеются сведения о регенерационной способности листовых эксплантов [3]–[11]. Использование же отрезков междоузлий в качестве эксплантов отмечено в единичных работах [3], [12]–[14]. Поэтому целью наших исследований явилось оценка пролиферирующей и регенерационной способности отрезков междоузлий различных генотипов березы.

Материал и методы исследований. Объектами исследования явились клоны 3ф1 и 1б березы пушистой (*B. pubescens* Ehrh.), клоны 31 и 4б березы повислой (*B. pendula* Roth.), клоны 7б и 81 березы карельской (*B. pendula* Roth. var. *carelica* Merckl.) и клон ч1 березы чернокорой (*B. obscura* Kotula ex Fiek.) В качестве эксплантов использовали отрезки междоузлий, вычлененные у одномесячных микрорастений вышеперечисленных клонов.

Методика работы с эксплантами, прописи питательных сред, этап наблюдения за состоянием и ростом культур, критерии оценки изложены в работе [15]. По литературным данным, выбранные концентрации цитокининов – наиболее оптимальные для стимулирования побегообразующей способности на листьях [3]–[6], [9]–[11].

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

Результаты исследований и их обсуждение. В течение первых 10 дней культивирования не выявлено никаких визуальных изменений на эксплантах. Спустя 20 дней отмечали в большинстве опытных вариантов увеличение в той или иной степени размеров эксплантов и индукцию каллусогенеза. Формирование каллуса наблюдали по краям отрезков междуузлий, в местах срезов. В таблице 1 представлены результаты по влиянию гормонального состава среды и генотипа экспланта на процесс формирования каллусной ткани на отрезках междуузлий березы.

Таблица 1 – Влияние гормонального состава питательной среды и генотипа экспланта на каллусогенез в культуре тканей березы (возраст – 50 дней)

Гормоны, мг/л	Число эксплантов с каллусом, %	Интенсивность роста каллуса*	Морфологические особенности каллуса
клон 3ф1 березы пушистой			
б/г	0	–	–
Зеатин, 5,0	6,7	1	зеленый, блестящий, гранулированный
БАП, 2,0	100	1, 2, 3	коричневый, зеленый, блестящий, гранулированный
клон 1б березы пушистой			
б/г	0	–	–
Зеатин, 5,0	15,0	2	зеленый, блестящий, гранулированный
БАП, 2,0	90,0	1	кремовый, зеленый, блестящий
клон 31 березы повислой			
б/г	7,7	1	зеленый, блестящий
Зеатин, 5,0	30,0	1	кремовый, зеленый, блестящий, гранулированный
БАП, 2,0	100	2	зеленый, кремовый, блестящий
клон 4б березы повислой			
б/г	0	–	–
Зеатин, 5,0	100	1	темно-зеленый, блестящий
БАП, 2,0	100	2	кремовый, зеленый, коричневый, блестящий
клон ч1 березы чернокорой			
б/г	100	1	кремовый, зеленый, блестящий
Зеатин, 5,0	100	1	темно-зеленый, кремовый, блестящий, гранулированный
БАП, 2,0	100	3, 2	кремовый, зеленый, блестящий
клон 76 березы карельской			
б/г	35,0	1	кремовый, зеленый, блестящий
Зеатин, 5,0	100	1, 2	зеленый, блестящий
БАП, 2,0	100	1	кремовый, зеленый, блестящий
клон 81 березы карельской			
б/г	0	–	–
Зеатин, 5,0	0	–	–
БАП, 2,0	65,0	1	кремовый, зеленый, блестящий

Примечание: *рост каллуса оценен в баллах: 1 – плохой, 2 – хороший, 3 – очень хороший.

Клон 81 карельской березы отличался незначительной каллусогенной активностью, в то время как клоны ч1 березы чернокорой, 4б березы повислой, 76 березы карельской характеризовались 100 % каллусообразованием на обоих опытных средах. Все экспланты клона ч1 березы чернокорой на безгормональной среде проявляли способность к недифференцированному росту клеток. Рост каллуса варьировал от плохого до, реже, – очень хорошего. Более активный рост каллусной ткани у всех изученных генотипов выявлен на среде, содержащей БАП. Интенсивность каллусообразования существенно снижалась либо была равна нулю при культивировании эксплантов на средах, дополненных зеатином. Наблюдали обычно каллус кремово-зеленого цвета, блестящий, гранулированный по форме, плотный по консистенции. После субкультивирования эксплантов с гормональной на свежую среду, без гормонов, отмечали в ряде вариантов опыта появление каллуса коричневого цвета. Наиболее интенсивно каллус такого цвета развивался на междуузлиях 3ф1 березы пушистой и 4б березы повислой.

Каллусные культуры характеризовались большой гетерогенностью по морфологическим характеристикам. На одной и той же среде можно было наблюдать несколько морфотипов первичных каллусов по цвету и интенсивности роста. Они возникали как в пределах одного экспланта,

так и у разных эксплантов. Интенсивность роста каллуса и его окраска в большей степени зависели от генотипа экспланта и в меньшей степени – от изученного гормонального состава среды. Полученные данные согласуются с результатами, установленными на березе повислой Н. Glock с соавт. [16], которые предположили, что влияние среды сильно модифицируется генотипом каллуса, в то время как генотипические эффекты слабо взаимодействуют с эффектами среды.

При визуальной оценке эксплантов с новообразованиями констатировали сильный некроз первичных эксплантов у некоторых клонов. От 70 до 100 % некротизированных эксплантов было выявлено на безгормональной среде у клона 3ф1 березы пушистой, клона 31 березы повислой, клонов 81 и 76 березы карельской. Также гибель междоузлий отмечали у клона 3ф1 березы пушистой в 50–80 % на среде с БАП. При изменении окраски тканей отрезков междоузлий с кремового цвета на коричневый, сформированные на них каллус и органогенные структуры обычно сохраняли жизнеспособность.

Органогенную способность эксплантов оценивали спустя 30 культивирования на средах с гормонами, и спустя еще 20 дней, после дополнительного субкультивирования на среде без гормонов во втором пассаже (таблица 2). В первом пассаже на отрезках междоузлий наблюдали формирование адвентивных почек, дальнейший рост и развитие которых отмечали после субкультивирования на свежую среду. Такая тенденция установлена почти для всех изученных генотипов, кроме клона 31 березы повислой. У данного генотипа наблюдали в конце первого пассажа каллус, по основным морфологическим параметрам – органогенный, но, тем не менее, визуально практически не идентифицировали зоны меристем (обычно на это указывает, помимо салатно-зеленой окраски, наличие характерных зеленых точек). Только во втором пассаже проходил процесс дифференциации тканей.

Помимо каллусогенеза, на отрезках междоузлий отмечали формирование двух типов органогенных структур: адвентивных почек и побегов, и, значительно реже, адвентивных корней. Индукцию корней наблюдали как из ткани эксплантов, так и на каллусе. На междоузлиях, культивированных на среде без гормонов, формирования корней не установлено. Небольшое корнеобразование было выявлено у клонов ч1 березы чернокорой и клона 76 березы карельской на обоих изученных средах, и у клона 3ф1 березы пушистой на среде, дополненной БАП (таблица 2).

Регенерацию побегов определяли только из недифференцированной ткани. Аналогичные процессы выявлены другими исследователями на листьях березы повислой [4]–[6].

У клона ч1 березы чернокорой побегообразующая способность каллуса была равна 100 %, независимо от наличия гормонов в среде культивирования. На безгормональной среде число почек на экспланте колебалось от 1 до 8, среднее значение составляло 6,8. На средах с цитокининами среднее число почек достигало 29–30. Для клона 81 березы карельской наблюдали совершенно противоположную картину: междоузлия не проявляли органогенной способности при культивировании на апробированных гормональных средах (таблица 2). Регенерационная активность у остальных изученных генотипов в той или иной степени зависела от гормонального состава среды.

Определена межклоновая изменчивость по показателю «побегообразующая способность эксплантов». У всех изученных видов березы между клонами отмечали существенные различия. У березы повислой клон 4б, а у березы карельской клон 76 оказались более отзывчивы на апробированные гормональные среды, они обладали хорошими показателями побегообразующей способности по сравнению с другими клонами своего вида.

Несомненно, БАП оказался более эффективным цитокинином, стимулирующим побегообразование на отрезках междоузлий, чем зеатин (таблица 2).

Таблица 2 – Влияние гормонального состава питательной среды и генотипа эксплантов березы на органогенез в культуре тканей (возраст – 50 дней)

Гормоны, мг/л	Число эксплантов, %		Среднее число на эксплант		Min–max	
	с корнями	почками	почек ¹	корней ²	число почек на эксплант	длина корней, см
клон 3ф1 березы пушистой						
б/г	0	0	–	–	–	–
Зеатин, 5,0	0	0	–	–	–	–
БАП, 2,0	33,3	70,0	5,9 ± 1,2***	2,6 ± 0,8**	5–10	0,1–0,9

Окончание таблицы 2

клон 1б березы пушистой						
б/г	0	0	–	–	–	–
Зеатин, 5,0	0	7,5	0,3 ± 0,29	–	2–3	–
БАП, 2,0	0	90,0	1,7 ± 0,5**	–	1–3	–
клон 31 березы повислой						
б/г	0	0	–	–	–	–
Зеатин, 5,0	0	26,7	0,27 ± 0,1	–	1–2	–
БАП, 2,0	0	90,0	4,0 ± 0,8***	–	1–7	–
клон 4б березы повислой						
б/г	0	0	–	–	–	–
Зеатин, 5,0	0	80,0	3,3 ± 0,6***	–	1–7	–
БАП, 2,0	0	100	7,2 ± 0,6***	–	1–15	–
клон ч1 березы чернокорой						
б/г	0	95,0	6,8 ± 1,7***	–	1–8	–
Зеатин, 5,0	40,0	100	30,1 ± 3,3***	2,4 ± 0,2***	5–40	1,0–4,0
БАП, 2,0	15,0	100	29,0 ± 1,2***	1,3 ± 0,6	5–40	0,1–0,5
клон 7б березы карельской						
б/г	0	0	–	–	–	–
Зеатин, 5,0	26,7	100	12,7 ± 1,4***	3,0 ± 1,4*	8–30	0,5–1,0
БАП, 2,0	5,0	100	15,1 ± 1,7***	1,0 ± 0,6	7–30	0,1–0,5
клон 81 березы карельской						
б/г	0	0	–	–	–	–
Зеатин, 5,0	0	0	–	–	–	–
БАП, 2,0	0	0	–	–	–	–

Примечание – ¹ от всех эксплантов, ² от эксплантов с корнями; отличия от контроля значимы при *P < 0,5, **0,1, ***0,01.

Кроме клона 81 березы карельской, у остальных тестируемых клонов при культивировании междуузлий на среде, дополненной БАП, частота побегообразования равнялась 70–100 %, среднее число почек на экспланте составляло от 2 до 30. В то же время на среде с зеатином эффективность побегообразования из каллусной ткани была существенно ниже у большинства изученных клонов.

По литературным данным, органогенез на каллусе отрезков междуузлий березы повислой был получен на среде, содержащей 1–2 мг/л БАП и 0,5–8,0 мг/л НУК [17]. При тестировании способности к побегообразованию на листовых эксплантах, междуузлиях и 1-почечных сегментах, культивированных на среде WPM, дополненной 1,0 мг/л БАП, у 12 раннецветущих клонов березы повислой отмечали варьирование частоты индукции между клонами и по типам эксплантов: у листьев – 80–100 %, у междуузлий – 13–90 %, у узловых сегментов – 17–97 % [18]. У тополя при сравнительном изучении эффективности регенерации почек из различных органов микроклонированных растений лучшие результаты были получены при использовании междуузлий в качестве эксплантов [19].

Анализ литературных данных показывает, что разработка технологии и протоколов размножения in vitro для каждого конкретного объекта требует творческого поиска, поскольку способы размножения могут быть специфичными не только для отдельных видов, но и генотипов лесных древесных пород [19]–[22], а также зависят от типа экспланта [19], [22]. Несомненно, это связано, во-первых, с тем, что в описаниях разработок отсутствуют существенные детали условий культивирования, во-вторых, с недостаточной изученностью процессов органогенеза в контролируемых условиях в зависимости от факторов среды. Вероятно, знание эндогенного статуса донорских растений в годичном цикле их развития позволило бы реализовать морфогенетические процессы в культуре тканей. В литературе отмечено, что развитие древесных культур in vitro определяется в большой мере взаимодействием двух факторов: генотипа и гормонального состава питательной среды [23]–[26]. На основании исследований с ювенильным материалом дуба черешчатого и сосны обыкновенной авторы высказали предположение, что дальнейшие исследования целесообразно проводить в 2-х направлениях: с одной стороны, выявлять генотипы, обладающие высокой морфогенной реге-

нерациональной способностью, с другой – подбирать условия (в частности, гормональные воздействия) для тех клонов, которые представляют определенный селекционный интерес, но трудно поддаются культивированию [23].

Учитывая вышесказанное, по нашему мнению, не корректно интерпретировать полученные результаты категорично и однозначно. Имеется большая вероятность того, что, подбирая гормоны в разных сочетаниях и количествах, можно получить положительные результаты. В своей работе мы изучали только возможность использования отрезков междоузлий в качестве эксплантов при работе с культурой тканей березы.

Выводы. На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Выявлена межвидовая, внутривидовая, межклоновая и внутрикловная изменчивость по пролиферирующей и органогенной способности у отрезков междоузлий.

2. Из органогенных процессов преобладал процесс побегообразования. Адвентивные почки и побеги формировались только на каллусной ткани. Ризогенез на отрезках междоузлий отмечали как прямую из ткани экспланта, так и из каллусной ткани.

3. Клон ч1 березы чернокорой проявил высокую побегообразующую способность на средах, дополненных цитокининами (6-БАП в концентрации 2,0 мг/л и зеатином в концентрации 5,0 мг/л), и на безгормональной среде (соответственно, 29–30 почек/на эксплант, и 6–7 почек/на эксплант).

Литература

1. Rathwell, R. In vitro propagation of cherry birch (*Betula lenta* L.) [Electronic resource] / R. Rathwell [et al.] // Canadian Journal of Plant Science. – Mode of access : <https://doi.org/10.1139/cjps-2015-0331>. – Date of access : 12.10.2020.
2. Sarvašová, I. Differences in survival and phenotypic traits of curly birch preserved by heterovegetative propagation: a case study from Central-East Europe [Electronic resource] / I. Sarvašová [et al.] // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11, № 8079. – Mode of access : <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87508-0>. – Date of access : 12.12.2021.
3. Chalupa, V. In vitro propagation of Birch (*Betula verrucosa* Ehrh.) / V. Chalupa // Biologia plantarum (Praha). – 1981. – Vol. 23, № 6. – P. 472–474.
4. Srivastava, P. S. Plantlet differentiation in leaf and root cultures of birch (*Betula pendula* Roth.) / P. S. Srivastava [et al.] // Plant Science. – 1985. – Vol. 42. – P. 209–214.
5. Симола, Л. К. Каллусные культуры и размножение березы in vitro / Л. К. Симола // Культура клеток растений и биотехнология. – М., 1986. – С. 102–106.
6. Valobra, C. In vitro shoot regeneration from leaf disks of *Betula pendula* «Dalecarlica» EM 85 / C. Valobra [et al.] // Plant cell, Tissue and Organ Cult. – 1990. – Vol. 21, № 1. – P. 51–54.
7. Takeshi, M. Agrobacterium tumefaciens-mediated transformation of Japanese white birch (*Betula platyphylla* var. Japonica) / M. Takeshi [et al.] // Plant Science. – 1997. – Vol. 127. – P. 53–60.
8. Pappinen, A. Transgenic silver birch (*Betula pendula*) expressing sugarbeet chitinase 4 shows enhanced resistance to *Pyrenopeziza betulicola* / A. Pappinen [et al.] // Plant Cell Rep. – 2002. – Vol. 20. – P. 1046–1051.
9. Концевая, И. И. Каллусообразование и органогенез на листовых эксплантах березы / И. И. Концевая, А. А. Яцына // Проблемы лесоведения и лесоводства. – Гомель, 2000. – Вып. 51. – С. 193–201.
10. Яцына, А. А. Регенерация побегов на листьях березы / А. А. Яцына, И. И. Концевая // Селекция, генетические ресурсы и сохранение генофонда лесных древесных растений : сб. науч. тр. – Гомель, 2003. – Вып. 59. – С. 258–262.
11. Концевая, И. И. Изучение морфогенеза в культуре тканей листьев *Betula obscura* Kotula ex Fiek / И. И. Концевая, А. А. Яцына // Проблемы лесоведения и лесоводства : сб. науч. тр. – Гомель, 2005. – Вып. 64. – С. 219–227.
12. Galoch, E. Growth and Organogenesis of Callus from Juvenile and Adult Plants of *Betula verrucosa* Ehrh. / E. Galoch, J. Czalewska // Bul. Of the Polish Academy of Sci. Biol. Sci. – 1991. – Vol. 39, № 3. – P. 275–280.
13. Lemmetyinen, J. Activity of the CaMV35S promoter in various parts of transgenic early flowering birch clones / J. Lemmetyinen [et al.] // Plant cell Reports. – 1998. – Vol. 18. – P. 243–248.
14. Mashkina, O. S. In vitro selection of birch for tolerance to salinity stress [Electronic resource] / O. S. Mashkina, T. M. Tabatskaya, O. M. Korchagin // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 875 (1). – Mode of access : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/875/1/012082/pdf>. – Date of access : 14.12.2021.

15. Концевая, И. И. Изучение морфогенетического потенциала сегментов междоузлий в культуре тканей березы повислой / И. И. Концевая, С. В. Жадько // Интернаука : научный журнал. – 2017. – № 8 (12), ч. 1. – С. 15–17.
16. Glock, H. Genotype – environment interaction in tissue cultures of birch / H. Glock, H.-R. Gregorius // TAG. – 1986. – Vol. 72, № 4. – P. 477–482.
17. Galoch, E. Growth and Organogenesis of Callus from Juvenile and Adult Plants of *Betula verrucosa* Ehrh. / E. Galoch, J. Czalewska // Bul. Of the Polish Academy of Sci. Biol. Sci. – 1991. – Vol. 39, № 3. – P. 275–280.
18. Lemmetyinen, J. Activity of the CaMV35S promoter in various parts of transgenic early flowering birch clones / J. Lemmetyinen [et al.] // Plant cell Reports. – 1998. – Vol. 18. – P. 243–248.
19. Jehan, H. Ontogenesis and ploidy level of plantlets regenerated from *Populus trichorarpa* × *deltoids* cv. Hunnegem root, leaf and stem explants / H. Jehan [et al.] // J. Plant Physiol. – 1994. – Vol. 144, № 4–5. – P. 576–585.
20. Fosker, D. E. Hormonal control of morphogenesis in cultured tissue / D. E. Fosker // Plant Growth Substances. – Berlin e. a., 1979–1980. – P. 362–369.
21. Бутова, Г. П. Клональное микроразмножение лесных древесных растений / Г. П. Бутова // Лесоводство, лесоведение, лесные пользования. Экспресс-информ. – М. : ЦБНТИ Гослесхоза СССР, 1987. – Вып. 7. – С. 1–24.
22. Payamnoor, V. Effects of explant type on callogenesis and the amount of betulin and betulinic acid produced under *in vitro* conditions in two birch species (*Betula* spp.) / V. Payamnoor, J. Nazari, R. Jafari Hajati // Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research. – 2019. – Vol. 35, is. 4. – P. 577–587.
23. Алексеева, Л. Л. Роль генотипа при размножении дуба черешчатого и сосны обыкновенной методом культуры тканей / Л. Л. Алексеева, М. Ю. Нечаева, Г. П. Бутова // Генет. и экол. основы повышения продуктивности лесов / НИИ лес. генет. и селекции. – Воронеж, 1993. – С. 65–73.
24. Станис, В. А. Влияние фитогормонов на морфогенез семядолей яблони в культуре ткани / В. А. Станис, Г. В. Станене, Б. С. Гялвонаускис // Физиол. раст. – 1991. – Т. 38, № 2. – С. 392–398.
25. Бутова, Г. П. Морфогенез и регенерация растений дуба черешчатого в культуре *in vitro* / Г. П. Бутова, Л. Л. Скробова // Физиология растений. – 1988. – Т. 35, вып. 5. – С. 1023–1029.
26. Хмара, К. А. Влияние генотипа материнского растения и веществ цитокининового типа действия на способность тканей зародыша ели обыкновенной (*Picea abies* L.) к органогенезу *in vitro* / К. А. Хмара, Н. В. Катаева // Физиол. раст. – 1993. – Т. 40, № 5. – С. 802–805.

УДК 595.76:591.524.21:504.5(476.2-21 Гомель)

Биотопический преферендум герпетобионтных жесткокрылых – обитателей отвалов ОАО «Гомельский химический завод»

А.Н. Крицкая, Н.Г. Галиновский

Наше исследование позволило определить экологические группы по биотопическому преферендуму почвенных жесткокрылых, обитающих на отвалах фосфогипса ОАО «Гомельского химического завода». В ходе исследования было установлено, что на стационарах, обитающих вблизи отвалов фосфогипса, доминируют полевые виды и луговые. Структура контрольного участка представлена преимущественно лесными, полевыми и луговыми видами.

Ключевые слова: биопреферендум, герпетобионтные жесткокрылые, отвалы фосфогипса, дисперсионный анализ.

Our study made it possible to determine the ecological groups according to the biotopic peripherendum of soil beetles inhabiting the phosphogypsum dumps of the JSC Gomel Chemical Plant. In the course of the study, it was found that field and meadow species dominate at the stations living near phosphogypsum dumps. The structure of the control plot is represented mainly by forest, field and meadow species.

Keywords: biopreferendum, herpetobiont beetles, phosphogypsum dumps, analysis of variance.

Введение. Почвенная мезофауна привлекает все больше и больше внимания для её изучения. В связи с развитием техногенных ландшафтов возникают различные экологические проблемы, которые требуют решения [1]. Для понимания возникшей ситуации и изучаются экосистемы, благодаря которым можно отследить изменения. Отвалы фосфогипса на ОАО «Гомельский химический завод» могут служить моделью для изучения процесса восстановления экосистем. Имеется опыт изучения лесной рекультивации отвалов горно-добывающей промышленности в качестве моделей, на которых определяются скорость и направления восстановительных сукцессий [2]. Систематическое изучение таких отвалов позволяет фиксировать закономерности формирующихся биоценозов. В такого рода исследованиях большую роль играют карабидокомплексы, которые встречаются на различных ландшафтах и очень чувствительны к изменениям. Жужелицы как представители жесткокрылых часто выступают в роли биоиндикаторов [3].

Изучение энтомофауны вблизи отвалов фосфогипса ОАО «Гомельский химический завод» проводились в период с 2011 по 2013 гг. Было выбрано 3 площадки, находящиеся непосредственно на отвалах фосфогипса, с разной степенью зарастания и контрольный стационар в лесной экосистеме. Для сбора насекомых был выбран пассивный лов при помощи почвенных ловушек. Всего за три года на отвалах было собрано 2784 экземпляров почвенных жесткокрылых и 1141 экземпляр на контрольном участке. Статистическая обработка проводилась при помощи пакета RStudio (<https://www.R-project.org>).

Результаты и обсуждение. В результате проведенных исследований на стационаре «Отвал 1» были выявлены жесткокрылые, предпочитающие обитать в пяти группах местообитаний (таблица 1). Отмеченный нами в почвенных ловушках только в 2011 г. типичный обитатель водоемов *Rhantus frontalis*, по всей видимости, случайно попал в сборы, что может быть связано с расположенным рядом обводным каналом.

Характеризуя биотопическую приуроченность на стационаре «Отвал 1», следует отметить, что на нем встречались следующие экологические группы: береговые, водные, лесные, луговые и полевые.

Предварительно нами был проведен однофакторный дисперсионный анализ, который с определенной долей достоверности подтверждает выявленные различия по видовому богатству и численности рассмотренных экологических групп жесткокрылых по биопреферендуму (рисунок 1). При этом следует отметить, что достоверных различий по видовому богатству жесткокрылых на стационаре зафиксировано не было ($F = 1,83$ при $p = 0,2$). В то же время были выявлены статистически достоверные различия в численности жесткокрылых по отношению к тому или иному местообитанию ($F = 5,6$ при $p = 0,012$).

Таблица 1 – Группы жесткокрылых-герпетобионтов по биотопическому преферендуму, обитавших на стационаре «Отвал 1»

Биопреферендум, виды	2011 год		2012 год		2013 год	
	Число видов	Обилие особей, %	Число видов	Обилие особей, %	Число видов	Обилие особей, %
Береговые	0	0	2	38,88	2	6,9
Водные	1	12,5	0	0	0	0
Лесные	0	0	1	5,56	1	3,45
Луговые	1	12,5	1	16,68	4	24,14
Полевые	1	75	3	38,88	7	65,51
<i>Всего видов</i>	3		7		14	
<i>Всего экземпляров</i>		8		18		29

Полевые виды за три года сборов были представлены 10 видами, что составляет 50 % от всего видового богатства (таблица 1). Полученные нами данные указывают на увеличение видового состава с каждым годом. В 2011 г. данная экологическая группа была представлена всего одним видом – жукелицей *Brosicus cephalotes*, который практически монодоминировал (75 % от всех коллектированных особей).

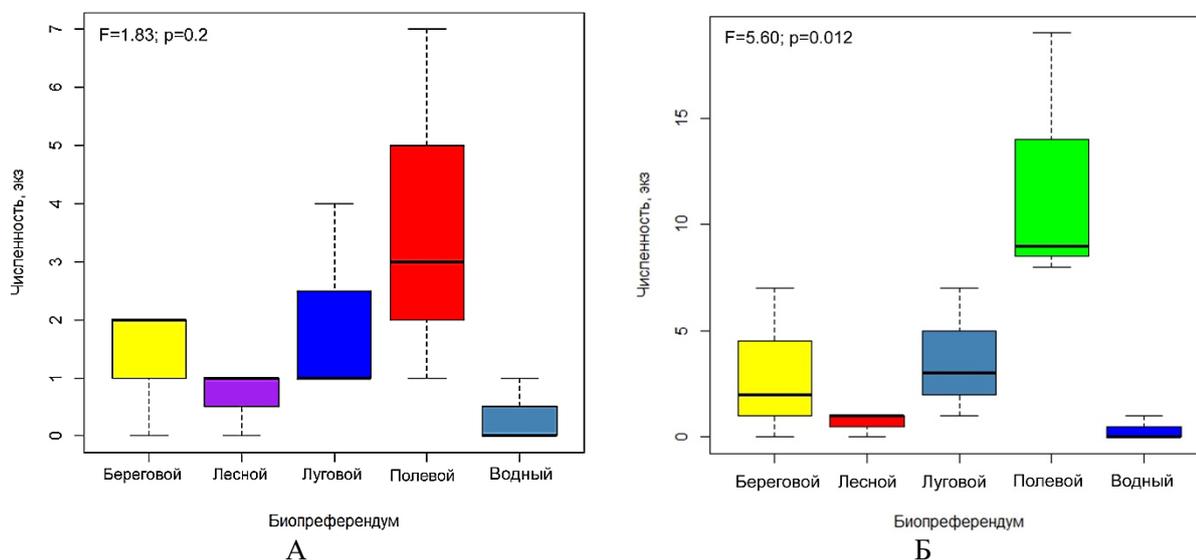


Рисунок 1 – Результаты дисперсионного анализа различий групп биопреферендумов жесткокрылых по видовому богатству и численности на стационаре «Отвал 1» (А – видовое богатство; Б – численность особей)

Следующий 2012 г. характеризуется тремя полевыми видами (жукелицы *Amara aenea*, *Bembidion femoratum*, *Bembidion quadripustulatum*) с общим относительным обилием 38,88 %. В 2013 г. были отмечены уже 7 полевых видов с совокупным относительным обилием особей группы 65,51 %.

Представителей луговых видов (жукелицы *Cicindela hybrida*, пилюльщик *Morychus aeneus*, листоед *Chaetocnema concinna*, долгоносик *Sitona lineatus*) было выявлено в 2,5 раза меньше, нежели полевых – всего 4 вида (относительное обилие особей – 20 %). Береговые виды (пилюльщик *Syncalecta spinosa*, жукелица *Omphron limbatum*, стафилинида *Oxytelus rugosus*) встречались незначительно (3 вида с относительным обилием – 15 %). Лесная группа видов характеризовалась крайне низким видовым богатством (2 вида), что составило всего 10% от всего видового состава жесткокрылых этого исследованного участка. Такое минимальное присутствие лесных видов в наших ловушках можно объяснить неподходящими условиями для их существования – как крайне низкая общая площадь проективного покрытия травянистой растительности, так и полное отсутствие древесной.

Для стационара «Отвал 2» с более высокой площадью проективного покрытия растительностью и присутствием редких кустарников были зафиксированы представители уже

семи групп биотопической приуроченности: к выявленным ранее пяти группам добавились болотные виды, заменившие собой водных, а также синантропные виды и виды, обитающие во всех местообитаниях – убиквисты (таблица 2).

Таблица 2 – Группы жесткокрылых-герпетобионтов по биотопическому предпочтению, обитающих на стационаре «Отвал 2»

Биопреферendum, виды	2011 год		2012 год		2013 год	
	Число видов	Обилие особей, %	Число видов	Обилие особей, %	Число видов	Обилие особей, %
Береговые	1	8,11	1	11,03	2	19
Болотные	1	0,68	0	0	1	0,5
Лесные	8	37,16	6	53,8	11	53,5
Луговые	10	38,51	8	17,93	6	6,5
Полевые	12	15,54	14	17,24	12	19,5
Синантропные	0	0	0	0	1	0,5
Убиквисты	0	0	0	0	1	0,5
<i>Всего видов</i>	<i>32</i>		<i>29</i>		<i>34</i>	
<i>Всего экземпляров</i>		<i>148</i>		<i>145</i>		<i>200</i>

Нами был проведен однофакторный дисперсионный анализ для выявления возможных различий по этим показателям у жесткокрылых исследованного сообщества. Результаты анализа свидетельствуют об очень высоких различиях как по видовому богатству, так и по численности выявленных экологических групп жесткокрылых с абсолютной статистической достоверностью – уровень значимости значительно ниже, чем 0,001 (рисунок 2).

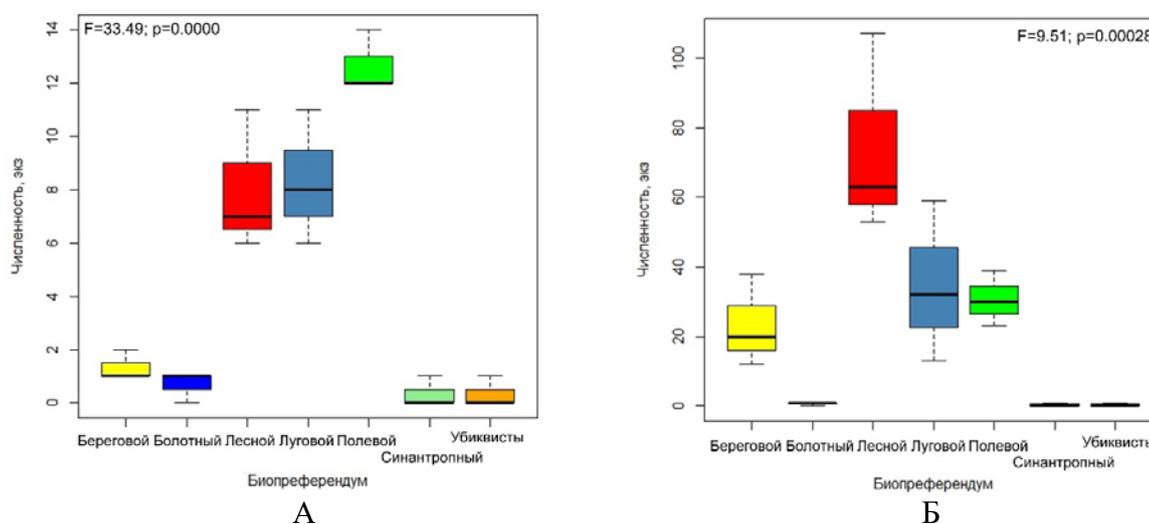


Рисунок 2 – Результаты дисперсионного анализа различий групп биопреферендумов жесткокрылых по видовому богатству и численности на стационаре «Отвал 2» (А – видовое богатство; Б – численность особей)

В результате исследований для данного стационара по видовому богатству преобладали, как и на предыдущем рассмотренном стационаре «Отвал 1», полевые виды – 26, но в то же время их численность значительно снизилась (относительное обилие составило всего 17,65 %). Следует также отметить видовое богатство лесных и луговых видов, которое значительно выросло в сравнении со стационаром с бедным проективным покрытием растительности – 19 и 18 видов соответственно. При этом лесные и луговые виды обладали наибольшим относительным обилием особей – 48,68 % и 19,47 % от всех выявленных на участке жесткокрылых соответственно.

Связанные с обводным каналом влаголюбивые береговые и болотные виды (жужелицы *Leistus rufescens*, *Carabus granulatus*) представлены в меньшем видовом богатстве – всего по 2 вида. Наличие береговых видов (жужелица *Bembidion azurescens*, пилюльщик *Syncalypta spinosa*)

с долей особей 13,4 % характеризовалось наличием хорошо сформированной береговой линией обводного канала. Такие виды, как синантропная чернотелка *Tenebrio molitor* и божья коровка – убиквист *Propylea quattuordecimpunctata*, были встречены в наименьшем количестве – по 1 виду и представлены единичными экземплярами, что может говорить о нетипичности условий обитания для этих видов на отвалах фосфогипса и случайности их попадания в ловушки.

Сообщество жесткокрылых стационара «Отвал 2» сложено преимущественно лесными, полевыми и луговыми видами при высоком видовом богатстве полевых видов, но при более высокой численности лесных и луговых жесткокрылых. Увеличение присутствия лесных и луговых видов на стационаре «Отвал 2» можно объяснить его зарастанием травяным покровом, а также появлением кустарников и молодых деревьев.

Структура спектра биопреферендума стационара 3 наиболее сильно заросшего и с наибольшей площадью проективного покрытия растительности, в том числе и древесной схожа с таковой на стационаре «Отвал 2». Как единственное отличие следует отметить наличие в ловушках водных жесткокрылых (таблица 3).

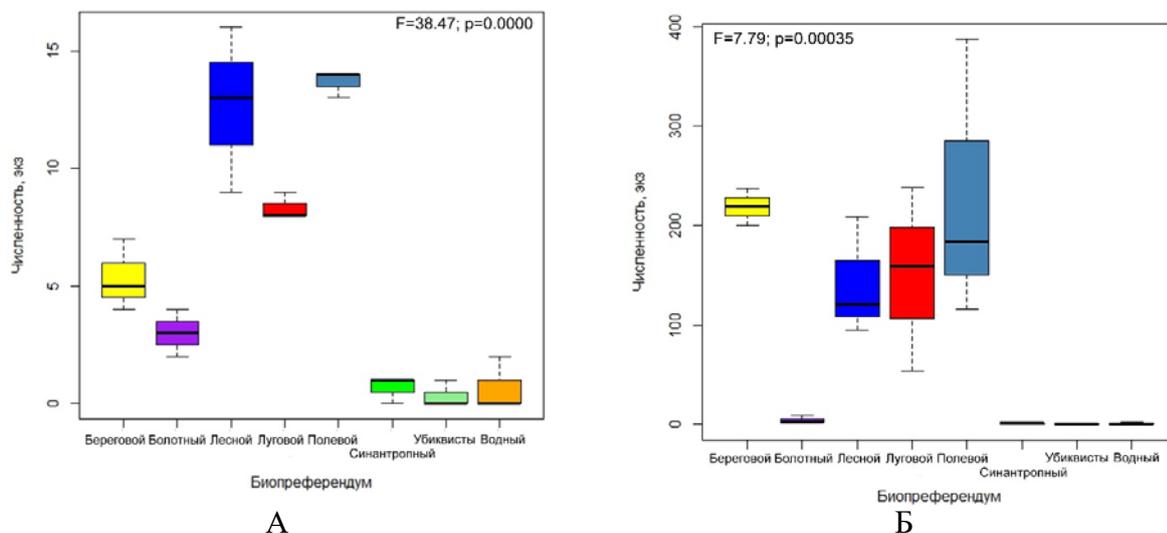


Рисунок 3 – Результаты дисперсионного анализа различий групп биопреферендумов жесткокрылых по видовому богатству и численности на стационаре «Отвал 3» (А – видовое богатство; Б – численность особей)

Перед проведением подробного анализа нами был проведен однофакторный дисперсионный анализ, который подтвердил с высокой степенью достоверности количественные различия как в видовом богатстве ($F = 38,44$ при $p = 0,0000$), так и в численности ($F = 7,79$ при $p = 0,00035$) среди предпочтений жуков к тому или иному типу местообитаний (рисунок 3). То есть существует возможность поподробнее рассмотреть детали встречаемости представителей той или иной группы биопреферендума на этом стационаре.

На стационаре «Отвал 3» присутствовало две доминирующие по видовому богатству группы – лесные (25) и полевые (24) виды. Необходимо также отметить высокое видовое богатство влаголюбивых береговых видов – было отмечено в ловушках 11 видов. При этом береговые виды являлись самыми многочисленными по обилию – 799 экземпляров, что являлось 35,73 % от всех коллектированных экземпляров жесткокрылых на данном участке. Также значительны по численности полевые, луговые и лесные виды – 24,2 %, 20,21 % и 18,96 % соответственно.

Таблица 3 – Группы жесткокрылых-герпетобионтов по биотопическому преферендуму, обитающих на стационаре «Отвал 3»

Биопреферендум, виды	2011 год		2012 год		2013 год	
	Число видов	Обилие особей, %	Число видов	Обилие особей, %	Число видов	Обилие особей, %
Береговые	4	28,2	5	39,36	7	40,4
Болотные	3	0,65	4	0,93	2	0,4

Окончание таблицы 3

Водные	0	0	2	0,21	0	0
Лесные	16	26,91	13	24,79	9	24,44
Луговые	8	20,44	9	9,81	9	10,91
Полевые	13	23,8	14	24,9	14	23,43
Синантропные	0	0	0	0	1	0,2
Убиквисты	0	0	0	0	1	0,2
<i>Всего видов</i>	<i>44</i>		<i>47</i>		<i>43</i>	
<i>Всего экземпляров</i>		<i>773</i>		<i>968</i>		<i>495</i>

Некоторое сокращение численности лесных видов на фоне роста луговых и полевых, тяготеющих к открытым местообитаниям можно объяснить более разнообразным травянистым покровом при достаточно разреженной древесной растительности, что расширяет количество ниш и кормовую базу представителей этих экологических групп.

Синантропный вид (долгоносик *Sitophilus oryzae*) и убиквист (божья коровка *Psyllobora vigintiduopunctata*) встречались в единичных экземплярах.

Полевые виды (жужелицы *Harpalus rufipes*, *Microlestes minitilus* и др.) доминировали на всех трёх стационарах, и это можно объяснить расположенным рядом ежегодно обрабатываемым сельскохозяйственным полем. Лесные виды (сильванида *Silvanus bidentatus*, стафилиниды *Aleochara brevipennis*, *Xantholinus tricolor*) незначительно преобладали на данной изученной территории в связи с большим количеством деревьев, нежели на предыдущих двух стационарах.

Таким образом, можно сказать, что при дальнейшем увеличении площади проективного покрытия и видового разнообразия травянистой растительности, а также на фоне увеличения площади встречаемости древесных пород наблюдается дальнейшая концентрация лесных видов наряду с луговыми и полевыми, а также и береговыми видами, связанными непосредственно с обводным каналом вокруг отвалов.

Спектр биопреферендумов на контрольном участке состоял из восьми следующих экологических групп: береговые, болотные, водные, лесные, луговые, полевые, синантропные виды и виды – убиквисты.

Предварительно проведенный дисперсионный анализ подтвердил с высокой степенью достоверности количественные различия как в видовом богатстве ($F = 27,06$ при $p = 0,0000$), так и в численности ($F = 5,68$ при $p = 0,0019$) в предпочтениях жесткокрылых к определенному типу местообитаний (рисунок 4). То есть существует возможность поподробнее рассмотреть детали встречаемости представителей той или иной группы биопреферендума на этом стационаре.

При сравнительном анализе полученных данных преобладавшими как по видовому богатству, так и по численности видами были лесные (жужелицы *Carabus hortensis*, *Pterostichus niger*, *Calathus micropterus*, *Cychnus caraboides* и др.) – всего 46 видов за период 2011–2013 гг. с относительным обилием особей 57,4 %.

Также достаточно широко были отмечены луговые (жужелица *Amara communis*, долгоносик *Otiorhynchus ovatus*, эуцинетида *Eucinetus haemorrhoidalis* и др.) и полевые виды (жужелицы *Amara aenea*, *Bembidion lampros* и др.) в равной степени по 27 видам с долей особей 13,5 % и 23,66 % соответственно. Преобладание лесных видов в типично лесном сообществе вполне объяснимо. Наличие луговых и полевых видов связано с хорошо развитым травянистым ярусом в молодом по возрасту лесу контрольного участка.

Таблица 4 – Группы жесткокрылых-герпетобионтов по биотопическому преферендуму, обитающих на контрольном стационаре

Биопреферендум, виды	2011 год		2012 год		2013 год	
	Число видов	Обилие особей, %	Число видов	Обилие особей, %	Число видов	Обилие особей, %
Береговые	4	7,83	2	1,63	4	1,1
Болотные	4	3,91	3	1,36	4	1,84
Водные	0	0	1	0,27	0	0
Лесные	19	34,78	32	51,63	27	70,9
Луговые	13	23,04	17	13,32	14	9,58
Полевые	18	30	18	31,25	9	15,84
Синантропные	0	0	1	0,27	0	0

Окончание таблицы 4

Убиквисты	1	0,44	1	0,27	3	0,74
Всего видов	59		75		61	
Всего экземпляров		230		368		543

На контрольном стационаре были также зафиксированы представители достаточно влаголюбивых семи береговых видов (стафилиниды *Aleochara brevipennis*, *Stenus boops*, жужелица *Oxypselaphus obscurus* и др.) с долей особей 2,63 % и 6 болотных видов (жужелицы *Carabus granulatus*, *Leistus rufescens*, листоед *Oulema erichsonii* и др.) с долей особей 2,1 %.

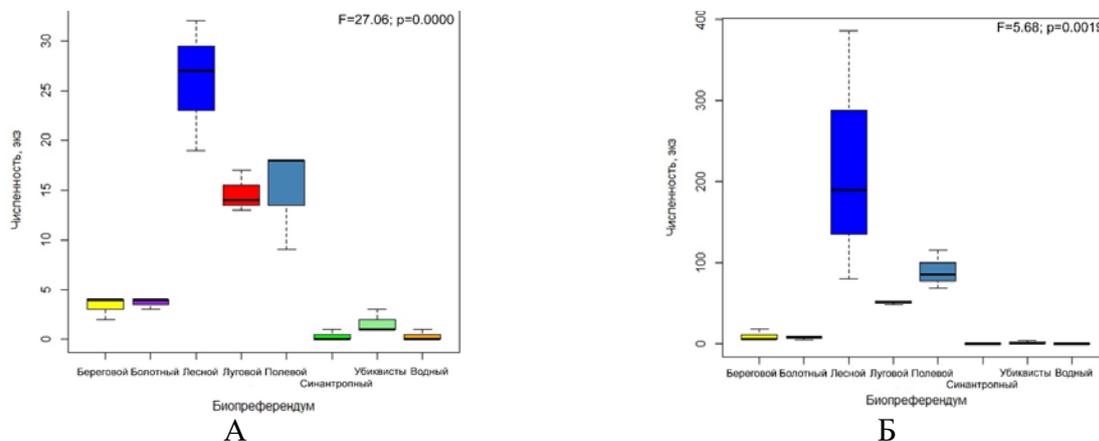


Рисунок 4 – Результаты дисперсионного анализа различий групп биопреферендумов жесткокрылых по видовому богатству и численности на контрольном стационаре (А – видовое богатство; Б – численность особей)

Виды-убиквисты могут обитать на различных стационарах и так же присутствуют и на контрольном участке в количестве 5 видов (карапузик *Hister quadrimaculatus*, мертвоед *Nicrophorus vespillo*, стафилиниды *Atheta fungi*, скрытноед *Atomaria fuscata* и навозничек *Aphodius rufipes*) с долей особей всего 0,53 %. Синантропный притворяшка *Ptinus fur* и водный халипфида *Haliphus ruficollis* виды встречались единично только в 2012 г. Такая частота их встречаемости может говорить о случайном попадании в наши ловушки.

Таким образом, можно сказать, что структура биопреферендумов контрольного участка сложена преимущественно лесными, полевыми и луговыми видами.

Заключение. В целом, сообщества жесткокрылых наименее заросшего отвала сложены преимущественно полевыми и луговыми видами с добавлением прибрежных видов, связанных с наличием водных обводных каналов. Если проследивать изменения в спектре биопреферендумов в исследованных стационарах по мере увеличения проективного покрытия травянистой и древесной растительности и в сравнении с контрольным участком лесной территории, на которой были заложены отвалы фосфогипса, наблюдается постепенное увеличение роли лесных видов на фоне снижения луговых и особенно, полевых видов, приуроченных к открытым местообитаниям. В качестве сопутствующих видов следует отметить береговых, связанных с обводными каналами, окружающими отвалы.

Литература

1. Кулагин, А. Ю. Лесная рекультивация отвалов Кумертауского буроугольного разреза / А. Ю. Кулагин [и др.] // Труды Стерлитамакского филиала АН РБ. – Уфа : Гилем, 2001. – Вып. 1. – С. 45.
2. Кулагин, А. А. Роль лесовосстановления антропогенно нарушенных территорий для повышения биоразнообразия (на примере отвалов Кумертауского буроугольного бассейна) / А. А. Кулагин // Проблемы сохранения биоразнообразия на Южном Урале : тез. докл. науч.-практ. конф., Уфа, 13–14 мая 2004 г. / Мин-во образ. Республики Башкортостан, Всемирный фонд дикой природы. – Уфа, 2004. – С. 58–59.
3. Еремеева, Н. И. Герпетобионты как индикаторы чистоты городской среды / Н. И. Еремеева // Изв. Таганрог. гос. радиотехн. ун-та. – 2002. – № 6 (29). – С. 145–148.

УДК 546.74:546.76:594.1:556.5(476.2-21Гомель)

Мониторинг содержания никеля и хрома в мягких тканях перловицы обыкновенной в водоемах города Гомеля и прилегающих территорий

Т.В. МАКАРЕНКО, О.В. ПЫРХ, А.В. ХАДАНОВИЧ, А.С. ПАРФЕНКОВА

Перловица обыкновенная (*Unio pictorum* L.) может выступать в качестве биоиндикатора, позволяющего установить степень влияния городской агломерации на загрязнение компонентов водной экосистемы, не имеющих видимой антропогенной нагрузки, соединениями тяжелых металлов. В статье рассматриваются вопросы, посвященные анализу содержания соединений никеля и хрома в мягких тканях моллюсков. Максимальное содержание никеля зафиксировано в образцах, отобранных в 2021 г. на участке р. Сож ниже административной черты г. Гомеля и в оз. Шапор. Максимум соединений хрома отмечен в моллюсках, обитающих в оз. У-образное (городская среда), что может свидетельствовать, с одной стороны, о разных источниках поступления тяжелых металлов в водоемы, с другой – о различной доступности соединений металлов из донных отложений одного и того же водоема для особей данного вида.

Ключевые слова: тяжелые металлы, перловица обыкновенная, водные экосистемы, тяжелые металлы, никель, хром, медь.

Pearl barley (*Unio pictorum* L.) can act as a bioindicator that allows to establish the degree of influence of urban agglomeration on contamination of components of the aquatic ecosystem that do not have a visible anthropogenic load with heavy metal compounds. The article examines issues related to the analysis of the content of nickel and chromium compounds in the soft tissues of molluscs. The maximum nickel content was recorded in the samples taken in 2021 at the river Sozh site below the administrative line of Gomeľ and in Shapor Lake. The maximum of chromium compounds is noted in mollusks living in U-shaped lake (city environment), which may indicate, on the one hand, the different sources of heavy metals entering water bodies, on the other hand, the different availability of metal compounds from bottom sediments of the same reservoir for individuals of this species.

Keywords: heavy metals, common pearl barley, water ecosystems, heavy metals, nickel, chromium, copper.

Введение. В комплексе проблем экологического мониторинга одно из приоритетных мест занимает исследование окружающей среды городов и близлежащих к ним территорий, так как интенсивное функционирование промышленно-индустриальных центров приводит к деградации, а зачастую и к полному уничтожению природных экосистем и слагающих их компонентов [1], [2]. В последние десятилетия в водных экосистемах наблюдаются достаточно интенсивные изменения, которые происходят под влиянием естественных условий среды и деятельности человека. Именно поэтому становятся актуальными мониторинговые исследования состояния водоемов, закономерностей реакции гидробионтов на меняющиеся условия среды. Угрозу для водных экосистем представляют высокие концентрации тяжелых металлов и их соединений, которые с каждым годом накапливаются в водоемах [3]. Среди водных беспозвоночных моллюски характеризуются наибольшей способностью к накоплению тяжелых металлов, легкостью определения до вида, широким распространением и простотой препарирования, а, следовательно, достаточными преимуществами использования в качестве биоиндикаторов [4]. Это связано со способностью последних аккумулировать загрязняющие вещества в тканях, в том числе тяжелые металлы, что позволяет использовать их при биомониторинге, определяя непосредственно содержание тяжелых металлов в их тканях и раковинах [5].

Целью исследований явились мониторинговые исследования содержания соединений никеля и хрома в мягких тканях перловицы обыкновенной (*Unio pictorum* L.).

Объект исследований – представители перловицы обыкновенной, отобранные в водоемах и водотоках г. Гомеля и прилегающих территорий, реки Сож. Выбор водоемов обусловлен близкими физико-географическими условиями (географическое положение, климат, почвы, геологическое строение, растительность), с существенным различием в степени и специфике хозяйственного освоения и техногенной нагрузки. На территории города распола-

гаются водоемы: Дедно, Шапор, Любенское, У-образное. В пригородной зоне отдыха находятся озера Володькино и Гребной канал. Озера Любенское, Дедно, Шапор и старица вблизи д. Поляновка – это пойменные водоемы, не утратившие связь с коренным руслом р. Сож. Оз. Володькино – русловой водоем, возникший в результате расширения коренного русла р. Сож в месте впадения в него р. Ипуть. Озеро У-образное некоторое время имело связь с р. Сож и осталось после осушительной мелиорации в виде отдельных водоемов. Для оценки влияния Гомельской городской агломерации на качество воды р. Сож и способности реки к самоочищению выполнялся отбор проб моллюсков из реки выше города в районе д. Кленки, в городской черте в районе парковой набережной и ниже административной черты города по течению в районе Гомельского объездного моста. Старица у д. Поляновка расположена на 10 км выше по течению от точки отбора проб на р. Сож у д. Кленки.

Отлов моллюсков производился в апреле-ноябре с помощью дночерпателя Петерсена, также дополнительно применялся и ручной сбор [6], [7]. Мягкие ткани отделялись от раковин, доводились до сухого состояния в сушильном шкафу при температуре 105°C и далее анализировались отдельно. Определение количественного содержания никеля и хрома в отобранных образцах проводилось на базе Государственного научного учреждения «Институт радиобиологии НАН Беларуси» на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой с пробоподготовкой образцов в системе микроволнового вскрытия.

Результаты и их обсуждение. Характер варьирования содержания исследуемых тяжелых металлов в гидробионтах отражен на рисунке 1.

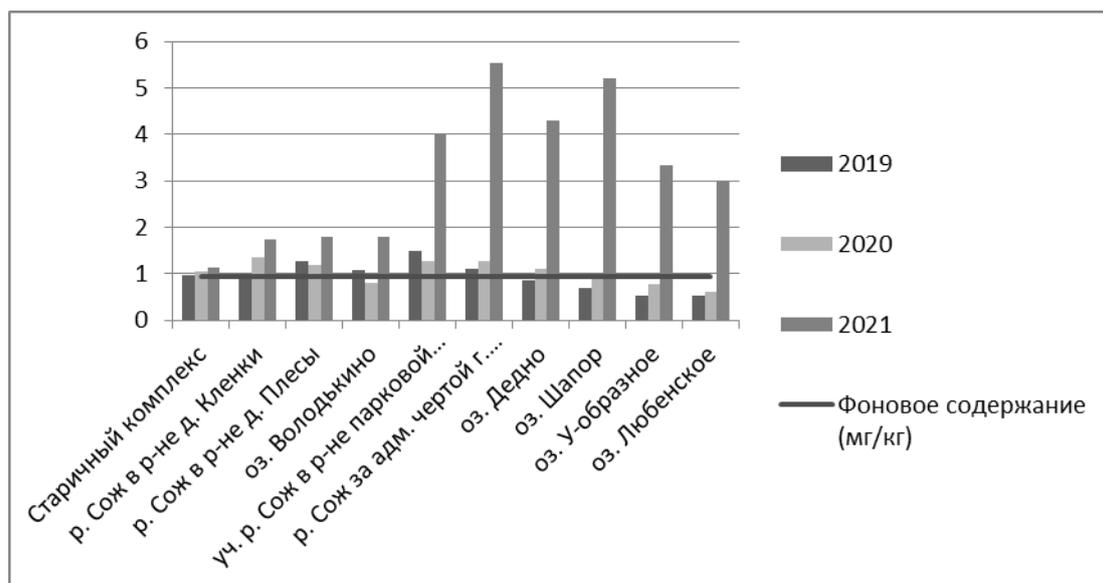


Рисунок 1 – Содержание соединений никеля в мягких тканях перловицы в водоемах г. Гомеля

За период исследований с 2019 по 2021 гг. отмечается снижение содержания никеля в мягких тканях перловицы обыкновенной во всех исследуемых водоемах за исключением оз. Дедно. В моллюсках, отобранных в старичном комплексе р. Сож в районе д. Поляновка, который не испытывает видимой антропогенной нагрузки, отмечается монотонный характер изменений концентраций соединений никеля. Незначительные колебания могут свидетельствовать об отсутствии поступления в водную экосистему загрязнителей, содержащих никель. Это свидетельствует о нахождении соединений никеля в донных отложениях старицы в малодоступных для биологических объектов формах. Даже при изменившихся физико-химических условиях состояния водных экосистем в 2021 г. содержание исследуемого металла в мягких тканях перловицы старичного комплекса изменилось незначительно, в то время как в большинстве водоемов концентрация элемента в организме моллюска возросла до уровня, превышающего содержание в 2019 г. При сравнительном анализе содержания никеля у моллюсков, обитающих в старичном комплексе с фоновой концентрацией, на протяжении периода иссле-

дований отмечено незначительное превышение только в 2021 г. В литературе описаны факты накопления токсикантов в живых организмах в чистых зонах в более значительных концентрациях в сравнении с загрязненными участками, что является следствием работы механизма блокировки поступления токсикантов в органы и ткани живых организмов [8].

Значительные изменения в содержании никеля отмечены у моллюсков водоемов, подвергающихся значительной антропогенной нагрузке (озера Шапор и У-образное), а также у особей, обитающих на участке р. Сож в центре города, где река принимает поверхностные стоки с центральной части г. Гомеля. Максимальное превышение концентрации никеля в мягких тканях моллюсков в 2021 г. отмечено для особей, обитающих в оз. Шапор. Данный водоем длительное время принимал поверхностные стоки с территорий предприятий ОАО «Гомельдрев», «Гомельобой» и ЧПУП «Фанерно-спичечный комбинат», что также могло вызвать накопление тяжелых металлов в донных отложениях и переход их в дальнейшем в доступные для живых организмов формы. Озеро У-образное на протяжении значительного периода времени принимало стоки промышленных объектов Северного промузла г. Гомеля. В настоящее время в озеро поступают стоки с крупных автомагистралей, расположенных по берегам озера, с территории Прудковского рынка и автостоянки. Все перечисленные факторы способствуют накоплению в донных отложениях различных токсикантов, которые могут переходить в доступные для биологических объектов формы. Стоит отметить высокое содержание никеля в мягких тканях моллюсков в 2021 г. в оз. Любенское, принимающее поверхностные стоки с территорий микрорайона Любенский, с огородов частного сектора, а также поверхностный сток с крупной объездной магистрали г. Гомеля. На протяжении 2019–2020 гг. содержание соединений никеля у особей, обитающих в оз. Любенское, было ниже фоновой величины в 1,7 раза и имело незначительные колебания. Возможно, поверхностные стоки с территорий города оказали значительное влияние на концентрацию изучаемого металла в донных отложениях, и накопившееся количество его перешло в биологически доступные формы, что послужило значительным увеличением его содержания в мягких тканях перловицы в 2021 г. (содержание металла увеличилось в сравнении с 2019 г.).

Максимальное увеличение содержания соединений никеля в 2021 г. в 5,8 раза по сравнению с фоновыми значениями отмечено для особей, обитающих на участке р. Сож ниже черты города по течению. Это может свидетельствовать не только о вторичном загрязнении водных экосистем тяжелыми металлами, но и о влиянии поверхностного стока г. Гомеля на накопление соединений никеля в водной системе р. Сож. Как указано в литературе, в относительно чистой среде биологические объекты накапливают токсиканты до более высоких уровней, чем загрязненные [9]. Однако на данном участке р. Сож, расположенном в парковой зоне, содержание металла в мягких тканях перловицы, отобранной в 2020 г., было ниже в сравнении с 2019 г., что может свидетельствовать о снижении антропогенной нагрузки на участок реки. На участке р. Сож за чертой города содержание никеля в мягких тканях моллюсков незначительно увеличилось в 2020 г. Разнонаправленное изменение содержания исследуемого металла в моллюсках на разных участках реки свидетельствует о разных источниках поступления его в р. Сож.

В 2019 г. у перловиц, обитающих в четырех водоемах, расположенных на территории города (озера Дедно, Шапор, У-образное, Любенское), отмечено содержание никеля ниже фоновых значений в среднем в 1,4 раза, причем первые три водоема подвергаются значительной антропогенной нагрузке. Минимальное содержание металла (0,54 мг/кг) отмечено в 2019 г. у моллюсков, отобранных в оз. Любенское и оз. У-образное, что, вероятно, связано с работой механизма блокировки поступления токсикантов в живые организмы и малой биологической доступности никеля. В 2020 г. содержание металла в мягких тканях моллюсков четырех вышеперечисленных водоемов увеличилось в 1,3 раза, но оставалось ниже фона (исключение оз. Дедно). Однонаправленное, хоть и незначительное увеличение содержания металла в моллюсках изучаемых водных экосистем в 2020 г. может быть следствием как внешнего поступления тяжелых металлов в водную систему с поверхностным стоком с территорий города, так и признаком вторичного загрязнения водоемов. Одним из источников поступления тяжелых металлов в водоемы являются сухие и влажные осаждения газопылевых частиц, поступающие в воздушный бассейн города при работе промышленных предприятий. У перловиц на участке р. Сож в р-не д. Плесы и оз. Володькино содержание металла сни-

зилось в 2020 г. по сравнению с 2019 г. в 1,1 раза, что свидетельствует о снижении антропогенной нагрузки на экосистему р. Сож. Резкое увеличение концентрации никеля в мягких тканях моллюсков в 2021 г. является следствием изменения физико-химического состава водных экосистем ввиду изменения погодных условий и указывает на необходимость проведения мероприятий по очищению (оздоровлению) водных экосистем с использованием погруженных водных растений для снижения содержания доступных форм металла в донных отложениях.

За период исследования содержание хрома в мягких тканях перловицы в период с 2019 по 2021 гг. увеличилось, за исключением особей, на отобранных участках р. Сож, расположенных выше административной черты города по течению (р-н д. Плесы и д. Кленки) (рисунок 2).

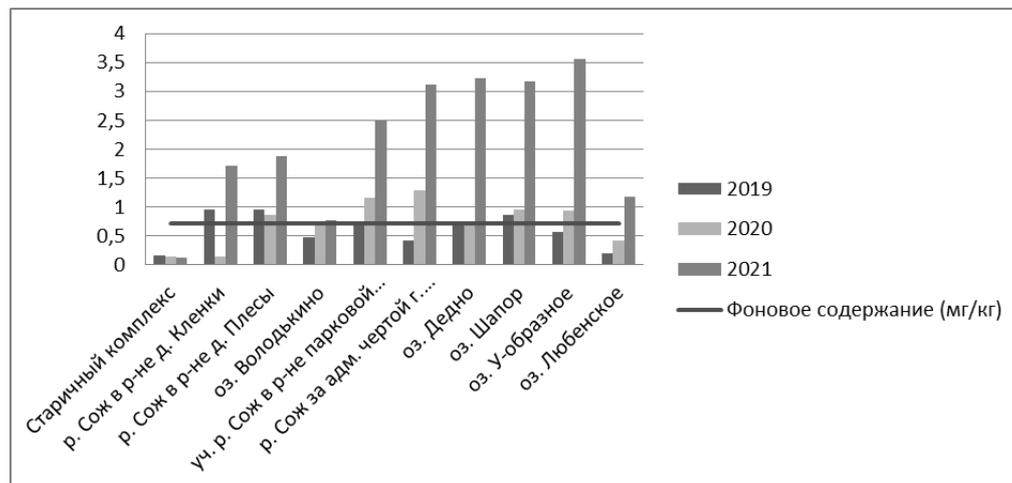


Рисунок 2 – Содержание соединений хрома в мягких тканях перловицы в водоемах г. Гомеля

Динамика изменения содержания изучаемого металла в мягких тканях перловицы схожа с таковой для соединений никеля и увеличивается на протяжении всего периода исследований (с 2019 по 2021 гг.). Повышение содержания соединений хрома может быть связано не только с антропогенным поступлением металла в водные экосистемы, но и с изменением доступности металла из донных отложений водоемов. Незначительные изменения в содержании металла характерны для особей старичного комплекса, где определено низкое содержание хрома (в среднем 0,14 мг/кг) в тканях перловицы, которое практически не изменялось на протяжении всего периода исследования, и было ниже фонового значения (0,71 мг/кг). Определенное низкое содержание хрома в тканях перловицы исследуемого водоема можно в дальнейшем использовать как фоновое содержание для проведения экологических исследований.

Для водоемов, принимающих поверхностные стоки с территорий близлежащих предприятий (озера У-образное и Шапор), отмечено повышение содержания хрома в тканях исследуемых моллюсков в 6,0 раз в 2021 г. Можно предположить, что в донных отложениях данных водоемов накопилось значительное количество тяжелых металлов, которые могут оказывать влияние на загрязнение водных экосистем.

В образцах моллюсков, отобранных в оз. Володькино в 2021 г., содержание металла не изменилось в сравнении с 2020 г., что может быть связано с работой механизма блокировки поступления токсикантов в ткани перловицы. Можно предположить, что в донных отложениях оз. Володькино соединения хрома не содержатся в количествах, которые могут представлять угрозу для дальнейшего загрязнения биологических объектов водоема. Объяснить значительное увеличение содержания металла в мягких тканях перловицы в 2021 г. на участке р. Сож выше города по течению довольно сложно. В 2020 г. содержание металла снизилось в 6,4 раза в сравнении с 2019 г., но в 2021 г. концентрация соединений хрома резко увеличилась. Данный факт требует более длительного и детального изучения.

Содержание соединений хрома в особях, обитающих в оз. Дедно, в 2020 и 2021 гг. находилось практически на одном уровне. Можно предположить, что сточные воды, поступающие в водоем, контактирующий напрямую с оз. Дедно, не загрязнены соединениями изучаемого металла, либо он находится в недоступных для моллюсков формах.

Озеро Любенское подвергалось реконструкции по соединению водоема с р. Сож, про-

водимые работы незначительно изменили структуру донных отложений водоема, появилось много каменистых включений, дно стало более песчаным с малым содержанием органического вещества. Значительное увеличение хрома в мягких тканях особей данного водоема свидетельствует о внешнем источнике поступления металла с поверхностным стоком.

Тенденция к увеличению содержания изучаемых металлов в мягких тканях перловицы в большинстве изучаемых водоемов может свидетельствовать не только о вторичном загрязнении, но и о поступлении, пусть и в незначительных количествах, их соединений в водные экосистемы в результате контакта с загрязненными воздушными массами города и поверхностным стоком с городских территорий. Значительные колебания в содержании хрома и никеля в период с 2019 по 2021 гг. отмечены у моллюсков, обитающих в разных водоемах.

Заключение. На протяжении всего периода исследования (2019–2021 гг.) выделить наиболее загрязненные и чистые водоемы по содержанию исследуемых металлов в тканях моллюсков достаточно сложно, так как в одном и том же водоеме содержание одного металла в тканях особей перловицы было максимальным, а другого металла было низким или минимальным. Так, например, максимальное содержание никеля в 2021 г. отмечено на участке р. Сож ниже административной черты г. Гомеля и в оз. Шапор, для соединений хрома максимум отмечен в оз. У-образное. Это может свидетельствовать, с одной стороны, о разных источниках поступления тяжелых металлов в мягкие ткани моллюсков; с другой, можно предположить о различной доступности соединений металлов из абиотических компонентов водоема для особей данного вида.

Литература

1. Кадацкая, О. В. Гидрографическая сеть урбанизированных территорий как элемент формирования природного каркаса города / О. В. Кадацкая, Е. В. Санец, Е. П. Овчарова // Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии : материалы VI Междунар. науч. конф. (к 110-летию со дня рождения профессора В. А. Дементьева), Минск, 13–16 нояб. 2018 г. / редкол.: А. Н. Витченко (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2018. – С. 194–196.
2. Постевая, М. А. Анализ атмосферных выбросов в г. Мурманске и их связь с загрязнением городских озер / М. А. Постевая, З. И. Слуковский // Вестник МГТУ. – 2021. – Т. 24, № 2. – С. 190–201.
3. Безматерных, Д. М. Моллюски прудовик обыкновенный и прудовик яйцевидный как аккумулятивные индикаторы загрязнения пресных вод тяжелыми металлами / Д. М. Безматерных // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. – 2018. – № 1 (5). – С. 112–117.
4. Макаренко, Т. В. Изучение содержания тяжелых металлов в мягких тканях моллюсков и водоемах г. Гомеля / Т. В. Макаренко, А. И. Штанько, А. О. Иванов // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2018. – Вып. 11 (43), ч. 6. – С. 79–85.
5. Бурдин, К. С. Основы биологического мониторинга / К. С. Бурдин. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1985. – 275 с.
6. Абакумов, В. А. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / В. А. Абакумов. – Л. : Гидрометеиздат, 1983. – 240 с.
7. Абакумов, В. А. Научные основы контроля качества поверхностных вод по гидробиологическим показателям / В. А. Абакумов. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1977. – 229 с.
8. Силкина, Е. Н. Влияние тяжелых металлов на функциональные и биохимические показатели морских гидробионтов как биоиндикаторов экологического состояния среды / Е. Н. Силкина [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2016. – № 6. – С. 11.
9. Скупченко, В. Б. Биоиндикация окружающей среды : учебное пособие / В. Б. Скупченко, Л. О. Соколова. – Санкт-Петербург : СПбГЛТУ, 2009. – 72 с.

Антиоксидантная активность экстрактов из пяти видов лишайников

О.М. ХРАМЧЕНКОВА

Изучали антиоксидантные свойства ацетонового, бензольного, гексанового, метанольного, хлорформного, этанольного и этилацетатного экстрактов из лишайников *Cladonia arbuscula*, *Evernia prunastri*, *Hypogymnia physodes*, *Ramalina pollinaria* и *Xanthoria parietina*. Применяли методики PFRAP (potassium ferricyanide reducing power), CUPRAC (Cupric Reducing Antioxidant Capacity) и фосфомолибденовый метод (Phosphomolybdenum Assay). В качестве веществ позитивного контроля использовали тролокс и аскорбиновую кислоту. Показано, что все проанализированные экстракты демонстрируют слабую антиоксидантную активность, несмотря на различия между видами лишайников и экстрагентами.

Ключевые слова: экстракты из лишайников; антиоксидантная активность, методы анализа, тролокс, аскорбиновая кислота, спектрофотометрия.

The antioxidant properties of acetone, benzene, hexane, methanol, chloroform, ethanol, and ethyl acetate extracts from the lichens *Cladonia arbuscula*, *Evernia prunastri*, *Hypogymnia physodes*, *Ramalina pollinaria* and *Xanthoria parietina* were studied. PFRAP (potassium ferricyanide reducing power), CUPRAC (Cupric Reducing Antioxidant Capacity), and phosphomolybdenum assay (Phosphomolybdenum Assay) were used. Trolox and ascorbic acid were used as positive controls. It was shown that all the analyzed extracts show weak antioxidant activity, despite the differences between lichen species and extractants.

Keywords: lichen extracts; antioxidant activity, methods of analysis, trolox, ascorbic acid, spectrophotometry.

Введение. В настоящее время научным сообществом осознана необходимость широкого скрининга субстанций, выделяемых из организмов различных царств живого мира, поиска путей противостояния негативным для человека тенденциям современности, связанных с разнообразием сценариев воздействия окружающей среды на человека, мультифакторностью развития патологий, небезупречностью используемых лекарственных средств. Бурное развитие физико-химических методов исследования в сочетании с возможностями компьютерного моделирования как самих патологических процессов, так и возможностей противостояния им, обусловили всплеск научного интереса к «лишайниковым» веществам, большая часть из которых является уникальными, и никакими другими организмами в природе не синтезируется.

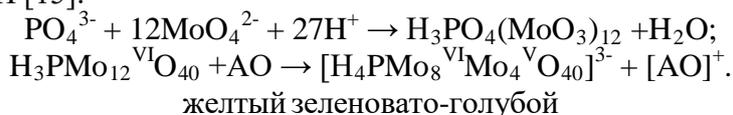
Образование свободных радикалов и возникающие вследствие этого негативные процессы непрерывно сопровождают любые живые организмы на протяжении их жизни. Следовательно, в процессе биохимической эволюции живых существ у них сформировались системы, противостоящие свободнорадикальным процессам, в том числе – вещества, являющиеся антиоксидантами. Антиоксидантность лишайников манифестируется тем, что в них содержатся соединения, способные улавливать свободные радикалы [1], [2]. Антиоксидантные свойства экстрактов, в отличие от входящих в них индивидуальных соединений, в известной степени являются интегральным показателем активности всего набора веществ в образце, включая редко встречающиеся, минорные и пока неизвестные [3].

Сведения об антиоксидантных свойствах экстрактов из лишайников и выделенных из них вторичных метаболитов в последние десятилетия включаются в обзоры, посвященные биологической активности лишайников вообще [4]–[9], лишайников различных мест обитания [10], или определенных таксономических единиц лишайнизированных грибов [11]–[14]. Последнее является наиболее короткоживущим в связи с активной трансформацией номенклатуры лишайников, основанной на достижениях молекулярной генетики этих организмов.

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

Методы исследований. Для исследования были выбраны: *Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot., *Evernia prunastri* (L.) Ach., *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., *Ramalina pollinaria* (Westr.) Ach. и *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr. Биомассу лишайников отбирали на территории ГЛХУ «Гомель-

Фосфомолибденовый метод основан на восстановлении антиоксидантами Mo(VI) до Mo(V) и последующем образовании зеленовато-голубого фосфомолибденового комплекса при кислых значениях pH [15]:



Процедура анализа: фосфомолибденовый реактив готовили путем смешивания 0,6 М серной кислоты, 28 мМ фосфата натрия и 4 мМ молибдата аммония. Экстракты из лишайников растворяли в метаноле (растворы использовали также в качестве «холостой» пробы), смешивали с фосфомолибденовым реактивом в соотношении 1:10, и инкубировали при 95 °С в течение 100 мин. Оптическую плотность образца измеряли при 695 нм. Результаты выражали в мг-эквивалентах аскорбиновой кислоты на грамм экстракта.

При выполнении анализов PFRAP и CUPRAC в качестве положительного контроля использовали тролокс – водорастворимый аналог витамина Е – стандартный антиоксидант. Для фосфомолибденового метода использовали аскорбиновую кислоту в качестве положительного контроля. Все спектрофотометрические измерения производили на УФ-спектрофотометре Solar PB 2201, измерительные кюветы – кварцевые.

Анализ результатов исследования производили с помощью программного продукта MicrosoftExcel.

Результаты и их обсуждение. Результаты определения антиоксидантной активности экстрактов из лишайников методом PFRAP выражают в единицах оптической плотности растворов при 700 нм, в силу чего они могут быть сопоставлены только с результатами других исследователей – таблица 1.

Полученные данные частично согласуются с таковыми, приведенными в [19]–[21]. Установлено, что антиоксидантная активность семи видов экстрактов из пяти видов лишайников существенно ниже таковой, оцененной нами для тролокса как $1,574 \pm 0,049$. Поскольку разница между антиоксидантной активностью экстрактов из лишайников и тролокса составляет от 6,5 до 60 раз сравнения экстрактов между собой представляются излишними.

Таблица 1 – Антиоксидантные свойства экстрактов из лишайников, определенные методом PFRAP

В Беллах

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	0,054 ± 0,002	0,066 ± 0,003	0,052 ± 0,001	0,039 ± 0,007	0,026 ± 0,009
бензол	0,121 ± 0,015	0,138 ± 0,019	0,107 ± 0,015	0,137 ± 0,025	0,079 ± 0,009
гексан	0,029 ± 0,001	0,036 ± 0,004	0,045 ± 0,008	0,068 ± 0,009	0,022 ± 0,005
метанол	0,115 ± 0,011	0,149 ± 0,018	0,126 ± 0,012	0,236 ± 0,034	0,094 ± 0,019
хлороформ	0,094 ± 0,012	0,127 ± 0,023	0,139 ± 0,018	0,238 ± 0,025	0,065 ± 0,008
этанол	0,139 ± 0,018	0,185 ± 0,027	0,143 ± 0,021	0,198 ± 0,045	0,086 ± 0,011
этилацетат	0,092 ± 0,009	0,084 ± 0,010	0,097 ± 0,008	0,102 ± 0,014	0,067 ± 0,007

В таблице 2 приведены результаты определения антиоксидантной активности экстрактов из лишайников методом CUPRAC.

Таблица 2 – Антиоксидантные свойства экстрактов из лишайников, определенные методом CUPRAC

В процентах ингибирования

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	21,2 ± 0,15	31,2 ± 0,23	29,2 ± 0,12	41,7 ± 0,25	18,7 ± 0,11
бензол	27,6 ± 0,18	39,4 ± 0,27	28,6 ± 0,17	42,4 ± 0,29	19,2 ± 0,25
гексан	12,5 ± 0,09	24,5 ± 0,18	18,4 ± 0,11	25,9 ± 0,21	10,9 ± 0,10
метанол	18,9 ± 0,21	41,2 ± 0,34	31,5 ± 0,24	44,8 ± 0,37	14,5 ± 0,12
хлороформ	19,2 ± 0,17	40,8 ± 0,31	27,5 ± 0,32	42,6 ± 0,39	23,8 ± 0,18
этанол	15,7 ± 0,11	35,5 ± 0,29	25,6 ± 0,15	39,9 ± 0,31	15,7 ± 0,15
этилацетат	22,4 ± 0,14	37,2 ± 0,25	24,4 ± 0,17	40,1 ± 0,49	16,5 ± 0,21

Приведенные значения не с чем сравнивать, так как данные по анализируемым видам экстрактов из изучаемых видов лишайников отсутствуют. Методом CUPRAC антиоксидантная активность тролокса в процентах ингибирования оценена нами как $95,2 \pm 0,56$. Дальнейшее очевидно – анализируемые экстракты из лишайников проявляли существенно худшие антиоксидантные свойства.

В таблице 3 приведены результаты определения антиоксидантной активности экстрактов из лишайников фосфомолибденовым методом.

Таблица 3 – Антиоксидантные свойства экстрактов из лишайников, определенные фосфомолибденовым методом

Используемый экстрагент	В миллиграмм-эквивалентах аскорбиновой кислоты на грамм экстракта				
	Вид лишайника				
	<i>C. arbuscula</i>	<i>E. prunastri</i>	<i>H. physodes</i>	<i>R. pollinaria</i>	<i>X. parietina</i>
ацетон	$64,8 \pm 2,28$	$67,4 \pm 3,43$	$32,4 \pm 2,15$	$87,2 \pm 4,12$	$42,5 \pm 3,18$
бензол	$75,2 \pm 3,45$	$73,2 \pm 3,94$	$37,5 \pm 2,09$	$85,4 \pm 4,43$	$37,2 \pm 2,95$
гексан	$49,5 \pm 1,98$	$56,5 \pm 2,86$	$19,8 \pm 1,85$	$61,5 \pm 3,86$	$31,4 \pm 2,64$
метанол	$72,8 \pm 2,96$	$78,9 \pm 2,49$	$26,7 \pm 2,21$	$89,1 \pm 5,12$	$39,6 \pm 3,98$
хлороформ	$77,6 \pm 3,06$	$65,2 \pm 2,95$	$29,6 \pm 2,44$	$78,9 \pm 4,21$	$43,3 \pm 4,57$
этанол	$62,4 \pm 2,77$	$61,7 \pm 3,07$	$22,4 \pm 2,18$	$74,6 \pm 4,11$	$35,2 \pm 3,41$
этилацетат	$59,9 \pm 2,12$	$70,4 \pm 3,35$	$32,5 \pm 2,83$	$80,4 \pm 4,65$	$39,2 \pm 3,54$

Полученные результаты частично согласуются с таковыми, изложенными в [22], и свидетельствуют о слабой антиоксидантной активности изучаемых экстрактов из лишайников.

Обращает на себя внимание межвидовые отличия антиоксидантных свойств экстрактов: экстракты из *Ramalina pollinaria* активнее других вне зависимости от вида анализа, природы растворителя, при помощи которого они были получены.

Заключение. Оценивали антиоксидантные свойства экстрактов из лишайников *Cladonia arbuscula*, *Evernia prunastri*, *Hypogymnia physodes*, *Ramalina pollinaria* и *Xanthoria parietina*, полученных методом экстракции по Сокслету с использованием ацетона, бензола, гексана, метанола, хлороформа, этанола и этилацетата в качестве экстрагентов. Применяли методики PFRAP, CUPRAC и фосфомолибденовый метод. Показано, что все проанализированные экстракты обладают слабой антиоксидантной активностью.

Литература

1. Huneck, S. Identification of lichen substances / S. Huneck, I. Yoshimura. – Berlin : Springer, 1996. – 493 p.
2. Ranković, B. Lichen secondary metabolites: bioactive properties and pharmaceutical potential / B. Ranković. – Cham : Springer International Publishing, 2015. – 202 p.
3. Физико-химические методы изучения антиоксидантной активности растительного сырья и продуктов его переработки / С. П. Завадский [и др.] // Разработка и регистрация лекарственных средств. – 2017. – №. 2. – С. 214–221.
4. Lichen secondary metabolites and its biological activity / S. Bhattacharyya [et al.] // Am. J. PharmTech Res. – 2016. – Vol. 6 (6). – P. 1–7.
5. 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.
6. Gokilavani, R. Biological properties of lichens – a review / R. Gokilavani, H. Rehana // Plant Arch. – 2020. – Vol. 20. – P. 3777–3783.
7. Lichens are the next promising candidates for medicinally active compounds / I. Shukla [et al.] // Int. J. Phytopharm. – 2018. – Vol. 8 (4). – P. 31–38.
8. Antioxidant activity and mechanisms of action of natural compounds isolated from lichens: a systematic review / P. A. S. White [et al.] // Molecules. – 2014. – Vol. 19 (9). – P. 14496–14527.
9. Zambare, V. P. Biopharmaceutical potential of lichens / V. P. Zambare, L. P. Christopher // Pharmaceutical Biology. – 2012. – Vol. 50 (6). – P. 778–798.
10. Boustie, J. Bioactive lichen metabolites : alpine habitats as an untapped source / J. Boustie, S. Tomasi, M. Grube // Phytochemistry Reviews. – 2011. – Vol. 10 (3). – P. 287–307.

11. Parmeliaceae family : phytochemistry, pharmacological potential and phylogenetic features / M. P. Gómez-Serranillos [et al.] // RSC Advances. – 2014. – Vol. 4 (103). – P. 59017–59047.
12. Kekuda, T. R. P. Chemistry, ethnobotanical uses and biological activities of the lichen genus *Heterodermia* Trevis. (Physciaceae; Lecanorales; Ascomycota) : a comprehensive review / T. R. P. Kekuda, K. S. Vinayaka, M. B. Sachin // Journal of Applied Pharmaceutical Science. – 2018. – Vol. 8 (05). – P. 148–155.
13. Chemistry and biological activity of *Ramalina* lichenized fungi / A. S. N. Moreira [et al.] // Molecules. – 2015. – Vol. 20 (5). – P. 8952–8987.
14. Chemical composition and biological activities of the extracts and secondary metabolites of lichens belonging to the genus *Usnea*, Parmeliaceae / A. Žugić [et al.] // Lekovite sirovine. – 2018. – Vol. 38. – P. 68–80.
15. 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.
16. A comprehensive review of CUPRAC methodology / M. Özyürek [et al.] // Analytical methods. – 2011. – Vol. 3 (11). – P. 2439–2453.
17. Guidelines for antioxidant assays for food components / F. Xiao [et al.] // Food Frontiers. – 2020. – Vol. 1 (1). – P. 60–69.
18. 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.
19. Chemical composition and antioxidant activity of two lichens species (*Pseudevernia furfuracea* L. and *Evernia prunastri* L.) collected from Morocco / N. Aoussar [et al.] // JMES. – 2017. – Vol. 8 (6). – P. 1968–1976.
20. 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 (6). – P. 1628–1633.
21. *Evernia prunastri* and *Pseudevernia furfuracea* lichens and their major metabolites as antioxidant, antimicrobial and anticancer agents / M. Kosanić [et al.] // Food and chemical toxicology. – 2013. – Vol. 53. – P. 112–118.
22. 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.

Информатика

УДК 004.932

Реализация системы определения эмоций студентов по мимике лица

Н.А. АКСЁНОВА, О.М. ДЕМИДЕНКО, А.В. ВОРУЕВ

В данной статье описывается разработка системы распознавания когнитивного поведения для определения заинтересованности у обучаемых по мимике лица. Представлены алгоритмы определения эмоций, позволяющие организовать эффективный контроль за качеством учебного процесса в режиме реального времени.

Ключевые слова: распознавание лиц, метод Виолы-Джонса, компьютерное зрение, машинное обучение.

This article describes the development of a cognitive behavior recognition system to determine the interest of trainees by their facial expressions. The algorithms for determining emotions are presented that allow organizing effective control over the quality of the educational process in real time.

Keywords: face recognition, Viola-Jones method, computer vision, machine learning.

Введение. Целью исследования является поиск подходящих технологий для реализации системы определения эмоций у обучающихся по мимике лица. Определение эмоций позволит организовать контроль за качеством учебного процесса, провести статистику когнитивного поведения студентов во время проведения занятий и показать уровень заинтересованности обучаемых в излагаемом материале.

В процессе работы авторы столкнулись с проблемой отсутствия обучающего набора для каждой определяемой эмоции: злость, радость, нейтральность, грусть, удивление. Для решения данного вопроса проводились записи лекций по предмету «Системный анализ и исследование операций» для студентов третьего курса. Была создана база данных учащихся с определяемыми эмоциями для последующего обучения разрабатываемой системы.

Авторами статьи была разработана программа на *Python* с использованием его библиотек *NumPy*, *TensorFlow* и *OpenCV*. Данное приложение обрабатывает видеопоток (или выбранный файл) с веб-камеры в реальном времени и выдаёт в результате графики с коэффициентами каждой эмоции. В качестве платформы для работы была использована операционная система *Windows 10*. Для работы с кодом использовался *PyCharm*.

Программа использует нейронную сеть, которая способна различать пять видов эмоций.

Структура проекта. В данном проекте прецедентами являются разработчик и пользователь. На рисунке 1 представлена детализированная диаграмма прецедентов. Запуск приложения включает в себя проверку наличия камеры. Если камера есть, то приложение будет работать корректно. В противном случае приложение не запустится. Приложение так же будет работать корректно, если лицо пользователя находится в поле зрения камеры. Далее рассмотрим подробнее роль разработчика. Главная задача разработчика – это создание модели и разработка приложения.

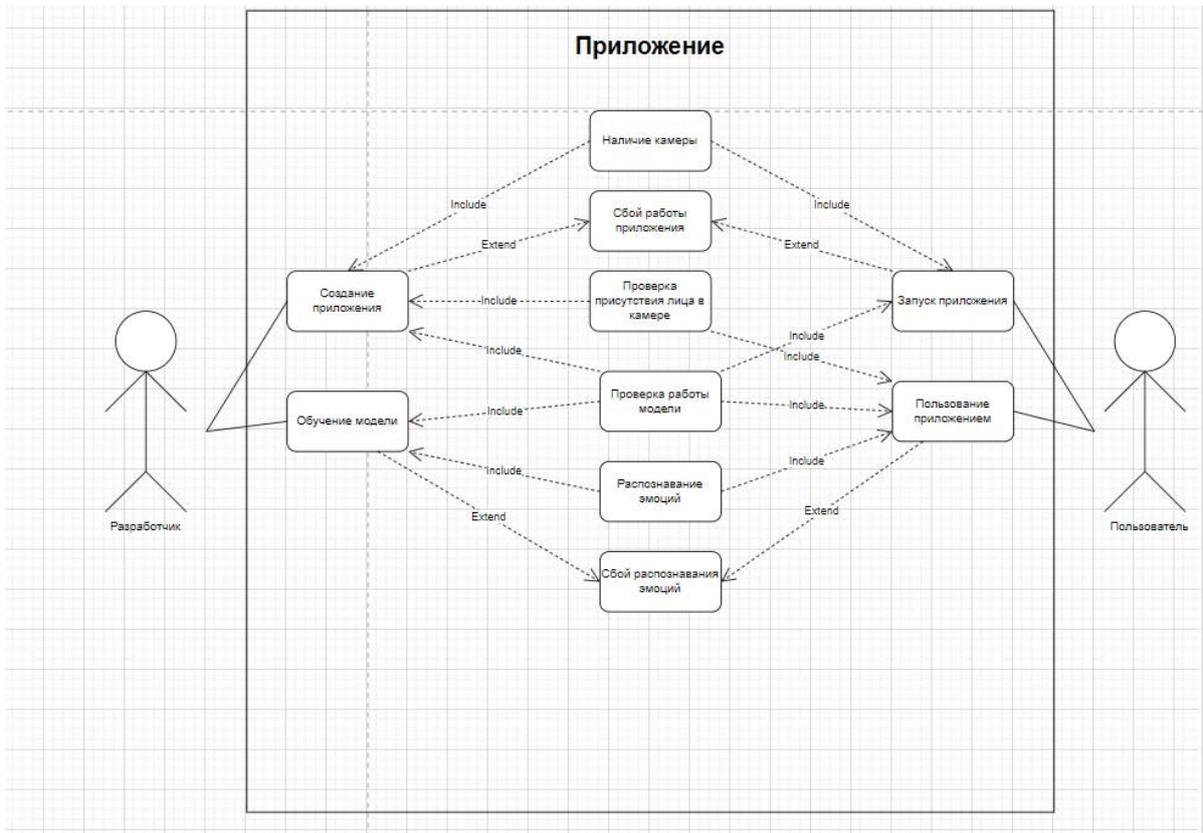


Рисунок 1 – Детализированная диаграмма прецедентов

На рисунке 2 представлено взаимодействие компонентов разработанной системы. При запуске приложения сначала происходит загрузка из файлов *CascadeClassifier* с помощью *OpenCV* и уже готовой модели модулем *keras*, который импортируется из библиотеки *TensorFlow*. После этого *OpenCV* ищет веб-камеру и начинает запись, а также создаёт окно приложения. После этого каждую итерацию внутреннего цикла происходит обработка кадра с помощью *CascadeClassifier* и поиск лица. После этого на изображение наноситься фрейм показывающий лицо. Далее через библиотеку *NumPy* происходит конвертация изображения в двоичный массив, который уже подаётся на готовую модель, а результат выводится в виде текста, как и само обработанное изображение на экран (рисунок 3).

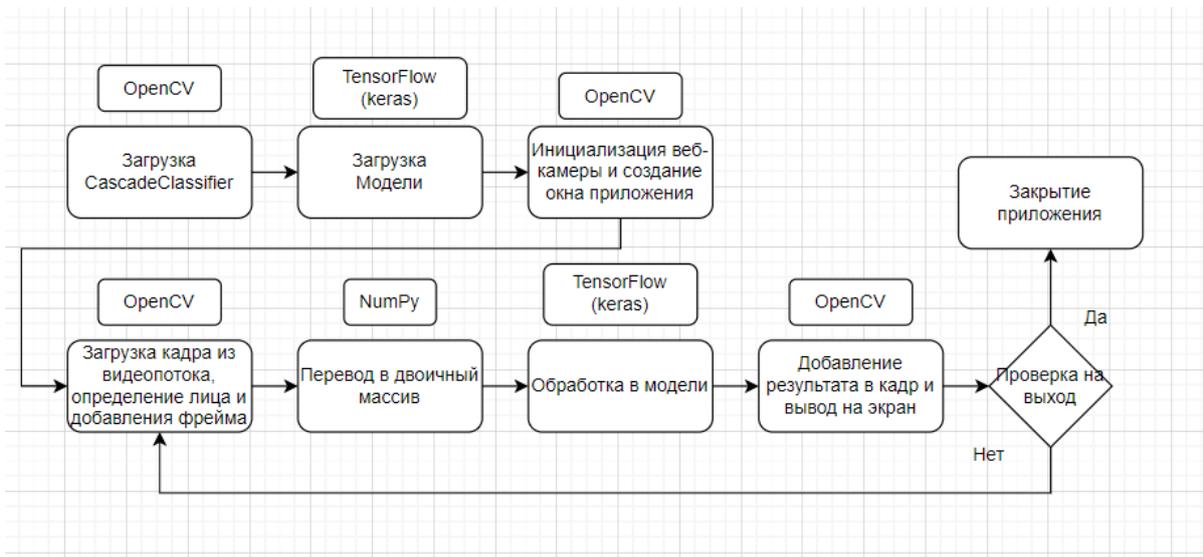


Рисунок 2 – Взаимодействие компонентов

Создание основных конструкций. Проект состоит из двух классов: основной класс *App* и вспомогательный класс *VideoCapture*.

Класс *App* – основной, в нём происходит инициализация GUI, виджетов, основных компонентов и методов. Переменные класса:

- *class_labels* содержит кортеж всех эмоций, которые определяются в программе;
- *preds* является списком, который содержит значения эмоций в активном кадре и обновляется по мере работы программы, значение этой переменной используется для построения графика активного кадра;
- *count* содержит количество кадров, которое будет отображаться на графике эмоций за *count* кадров (рисунок 3);



Рисунок 3 – График активного кадра

- *file* содержит путь и имя файла, в который сохраняется результат работы программы;
- *lines* является списком, в котором содержатся данные за *count* кадров о каждой эмоции, используется для построения графика эмоций за *count* кадров (рисунок 4);

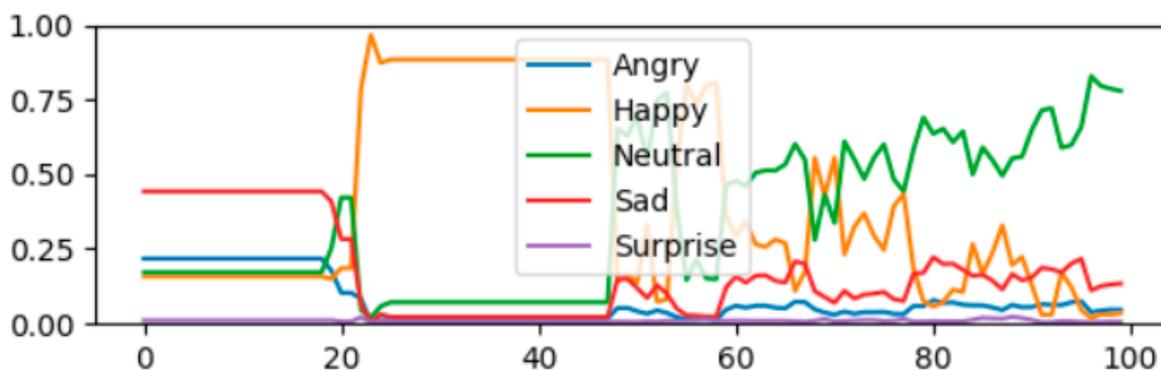


Рисунок 4 – График за *count* кадров

– *face_classifier* содержит модель для определения лиц на кадре методом Виолы-Джонсона.

– *classifier* содержит готовую модель свёрточной нейронной сети для определения эмоций.

Также в данном классе создадим необходимые методы:

Конструктор *__init__* служит для инициализации основных переменных экземпляра класса, а также для создания меню выбора с тремя кнопками: «Dynamic recognition», «Ststic recognition», «Exit».

При вызове необходимо передать такие параметры:

- *window* является классом *Tk* из библиотеки *Tkinter*, создаёт основное рабочее окно;

- *window_name* – это строковая переменная для создания имя в заголовке окна;
- *window_logo_path* – это строковая переменная, которая указывает путь к логотипу в заголовке программы;
- *fps* – ограничивающий параметр, указывает желаемое количество кадров в секунду, но из-за возможного ограничения мощности устройства позволяет только уменьшить нагрузку;
- *video_source* – параметр со значением по умолчанию, в котором определяется режим работы программы: если равен нулю, то определение происходит по видеопотоку с веб-камеры.

Метод *video_recognise* служит для инициализации основных графических виджетов, а так же вызов метода *update*. На вход подаётся один параметр *video_source*, в котором передаётся режим работы программы. Далее происходит удаление кнопок, которые были созданы в конструкторе и перенастройка главного окна. После этого происходит создание экземпляра класса *VideoCapture* и создание основных виджетов:

- *image_frame* – является экземпляром класса *Frame* и нужен для вёрстки виджетов. Занимает верхнюю половину окна и в нём будут созданы два виджета, в которых будут показываться кадры;
- *canvas* – является экземпляром класса *Canvas* и нужен для отображения главного кадра и занимает левую часть *image_frame*;
- *canvas_grey* – является экземпляром класса *Canvas* и нужен для отображения главного кадра в серых тонах, для понимания того, как видит этот же кадр нейронная сеть и занимает правую часть *image_frame*;
- *diagram_frame* – является экземпляром класса *Frame* и нужен для вёрстки виджетов, занимает нижнюю половину окна и в нём будут созданы два виджета, в которых будут показываться графики эмоций;
- *bar1* – является экземпляром класса *FigureCanvasTkAgg* и нужен для отображения графика эмоций главного кадра и занимает правую часть *image_frame*;
- *bar2* – является экземпляром класса *FigureCanvasTkAgg* и нужен для отображения графика эмоций за *count* кадров и занимает левую часть *image_frame*.

Класс *VideoCapture* является вспомогательным, в этом классе происходит инициализация считывания видеопотока с веб-камеры или загрузка видео и раздел на кадры. Содержит конструктор *__init__*, в котором происходит считывание видеопотока или загрузка и раскадровка видео, проверка на открытие видеопотока и инициализация переменных экземпляра длины и ширины кадров.

Апробация системы. Разработанная система была протестирована в различных условиях освещённости и с разных ракурсов расположения лица. На рисунке 5а показана апробация модели для затемненных изображений лиц в видеопотоке, а на рисунке 5б – для нормальных.

Программа успешно сохраняет результаты работы в отдельных для каждого запуска файлах. Осуществляется автоматический поиск, использование и работа веб-камеры.



а) Апробация системы для затемненных изображений

б) Апробация системы для нормальных изображений

Рисунок 5 – Апробация системы определения эмоций

Заключение. В результате проведенных исследований разработаны и созданы подходящие технологии для реализации системы распознавания эмоций. Проведенное тестирование показало 82 % точность определения, что позволяет использовать данную систему в процессе обучения студентов и определять эффективность преподаваемого материала.

Литература

1. Viola, P. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features / P. Viola, M. Jones // CVPR. – 2001. – P. 511–518.
2. Badrinarayanan, V. SegNet: a deep convolutional en-coder-decoder architecture for image segmentation / V. Badrinarayanan, A. Kendall, R. Cipolla // Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2017. – № 39. – P. 2481–2495.
3. Шапиро, Л. Компьютерное зрение : учеб. пособие / Л. Шапиро, Д. Стокман ; пер с англ. – М. : Бином ; [Б. м.] : Лаб. знаний, 2006. – 752 с.

Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 06.05.2022

Подготовка изображений отпечатков пальцев к хранению в базе данных дактилоскопических изображений

Е.И. КОЗЛОВА, В.Н. СИВЕНКОВА, А.И. ГОЛОВАТЫЙ, В.А. ЧУЙКО

В работе представлены результаты решения задачи подготовки изображений для организации их хранения в базах данных. В качестве объекта исследования рассматривались дактилоскопические изображения. Предложен полный цикл операций для подготовки к хранению отпечатков пальцев в базе данных и их последующей идентификации.

Ключевые слова: изображение, признак, особая точка, преобразование, база данных.

The paper presents the results of solving the problem of preparing images for organizing their storage in databases. Fingerprint images were considered as an object of study. A full cycle of operations is proposed to prepare fingerprints' images for the storage in the database and their further identification.

Keywords: image, feature, singular point, transformation, database.

Защита любого объекта включает в себя много этапов. Одним из важнейших является система контроля и управления доступом (СКУД) на объект. Для верификации и идентификации используются биометрические системы. В любой биометрической системе должна быть база данных, в которой хранится необходимый набор биометрических характеристик. При решении задачи идентификации роль системы состоит в том, чтобы сравнить входные данные с записями в базе данных и проверить, есть ли совпадение. Таким образом, определяется присутствие характеристик конкретного человека в базе данных. В задаче аутентификации алгоритм проверяет, является ли человек тем, за кого себя выдает. Для сравнения любых биометрических характеристик необходимо представить их в определенном виде. Например, невозможно напрямую сравнивать изображения двух отпечатков пальца, так как приложить палец к сканеру в двух одинаковых положениях в разных случаях практически невозможно. Таким образом, возникает задача сравнения немного отличающихся друг от друга изображений одного и того же объекта. Решение этой задачи можно разделить на две части: во-первых, представить характерные черты отпечатка в воспроизводимой и стабильной форме; во-вторых, решить задачу сравнения отпечатков, чтобы объект можно было распознать с достаточной точностью. Решение двух частей этой задачи лежат в основе любой биометрической системы и сейчас очень активно исследуются. В данной работе рассматривается первая задача – представление характерных черт отпечатка пальца в воспроизводимой и стабильной форме [1].

Характерные черты всех отпечатков пальцев имеют два уровня признаков – глобальные и локальные.

Глобальные признаки – это зрительно видимые признаки, которые присущи всем отпечаткам пальцев, и включают в себя основные характеристики отпечатков. К таким характеристикам можно отнести: область, представляющую интерес при идентификации отпечатков пальцев; центр отпечатка пальца, так называемое ядро, вокруг которого формируются папиллярные линии; точки разветвления или соединения папиллярных линий и количество папиллярных линий [2].

Локальные признаки, которые называют минуциями, являются более мелкими, но в то же время неповторимыми для поверхностей различных пальцев. Папиллярные линии не являются прямыми, они образуют на поверхности пальцев рук изломы и изгибы, соединения и разрывы. В этих местах образуются различные узоры папиллярных линий. В современной дактилоскопии узоры отпечатков пальцев подразделяют на типы по виду рисунков папиллярных линий: дуговые, петлевые, завитковые. Можно классифицировать и большее количество типов с учетом направлений загибов или расположения петель относительно направления поверхно-

сти пальца. Количество и расположение узоров каждого типа являются неповторимыми и уникальными для поверхности каждого пальца. Точки нахождения узоров папиллярных линий могут быть определены в отпечатке пальца как особые, по которым можно с достаточно высокой точностью идентифицировать принадлежность отпечатка тому или иному человеку.

При получении изображения отпечатка пальца на качество изображения влияет множество различных факторов, таких как шрамы на пальце, возраст человека, паразитические вещества (вода, жир, грязь и т. д.), температура (расширение, сжатие), влажность. Эти факторы снижают качество получаемого изображения и увеличивают количество ошибок. Следовательно, для надежного и правильного распознавания отпечатка пальца входное изображение должно быть максимально четким, что достигается на этапе предварительной обработки. Данный этап включает в себя ряд математических операций: преобразование в оттенки серого, нормализация, бинаризация, получение карты направлений, выделение зоны интереса, скелетизация, выделение особых точек. Для каждой из этих операций в ходе работы были разработаны алгоритмы на языке Matlab. Далее рассмотрим подробнее каждый из этапов.

Преобразование в оттенки серого. Данное преобразование из цветного в серое позволяет уменьшить объём памяти, занимаемый изображением. В данной работе для сбора отпечатков пальцев с целью их последующей обработки и хранения в базе данных использовался оптический сканер BioMini Plus 2. Его основные характеристики: интерфейс USB, работает при прямом солнечном свете до 100000 лк, разрешение 500 dpi, область считывания 16 × 18 мм, диапазон рабочих температур -10...+50 °С [3]. Настольные сканеры BioMini Plus 2 относятся к биометрическим устройствам Suprema нового поколения и оснащены усовершенствованным оптическим сенсором. Изображения отпечатков пальцев имеют высокое качество и представлены сразу в оттенках серого, поэтому необходимости в применении описанного выше преобразования не возникло (рисунок 1а).



Рисунок 1 – Изображения отпечатка пальца на разных этапах получения и обработки
а – изображение, полученное со сканера, б – изображение после нормализации,
в – бинаризованное изображение

Нормализация. Операция нормализации позволяет увеличить контрастность полученного со сканера изображения с помощью определенного изменения уровней серого [4]. При проведении этой операции не искажается полезная информация, которая содержится в изображении отпечатка пальца (рисунок 1б).

Бинаризация. Зашумленные области и края изображения отпечатка пальца не являются информативными, их использование может привести к ложным результатам. Для удаления этих областей применяются операции бинаризации и выделения зоны интереса. Операция выделения зоны интереса направлена также на центрирование полезной информации, которая будет использоваться на этапе сравнения. Информация, которую необходимо извлечь из отпечатка, является двоичной: выступы папиллярных линий и впадины. Поэтому, на данном этапе происходит преобразование изображения из 256-уровневого в двухуровневое, которое несет в себе ту же информацию. Обычно пикселю папиллярной линии присваивается значе-

ние «1», а пикселю впадины значение «0» [4]. Таким образом, двоичное изображение создается путем «закрашивания» каждого пикселя в белый или черный цвет в зависимости от метки пикселя (черный для впадин, белый для выступов папиллярных линий) (рисунок 1в).

Получение карты направлений. Карта направлений показывает направления гребней папиллярных линий в различных точках отпечатка пальца. Процесс получения такой карты состоит из двух этапов: оценка ориентации и сглаживание карты направлений. На этапе оценки ориентации определяется ориентация каждого пикселя папиллярной линии, содержащегося в отпечатке пальца. На этом этапе в работе использовался метод, основанный на наименьшем квадратичном приближении. В том случае, когда входное изображение слишком зашумленное, полученные результаты окажутся ложными. Для устранения влияния шумов применяется фильтр нижних частот к карте направлений.

Выделение зоны интереса. После получения карты направлений можно получить изображение зоны интереса, в которой черным цветом выделены границы изображения, белым – края зоны интереса отпечатка пальца, а внутри – сама зона интереса (рисунок 1в).

Скелетизация. Процедура выделения скелета представляет собой утончение папиллярных линий для устранения лишних пикселей до того момента, пока линии не будут иметь ширину равную одному пикселю (рисунок 2а).

Для выполнения этой процедуры использовался интерактивный параллельный алгоритм прореживания. При каждом сканировании полного изображения отпечатка пальца алгоритм утончения областей отмечает избыточные пиксели в каждом маленьком окне изображения (3×3) и удаляет все отмеченные пиксели после нескольких сканирований.

Выделение особых точек. Существует ряд методов выделения особых точек. Особые точки можно выделять как с бинаризованных скелетизированных изображений, так и с бинаризованных изображений, в которых не выделялся скелет изображения. Существуют методы выделения особых точек из изображений отпечатков пальцев в оттенках серого. В данной работе использовался метод выделения особых точек из бинаризованного скелетизированного изображения, основанный на количестве пересечений (Crossing Number Based) [5]. Особые точки извлекаются путем сканирования локальной окрестности каждого пикселя гребня папиллярной линии окном 3×3 . Определяется количество перепадов уровней между соседними наружными пикселями окна. Значения количества перепадов уровней соответствуют определённому типу особых точек. Поэтому после определения количества пересечений каждый пиксель может быть классифицирован на соответствие нахождения в этом месте особой точки и типу этой точки. Каждая особая точка представляется вектором, описываемым двумя координатами и направлением гребня папиллярной линии для этой точки. Предварительные оценки показали, что объем памяти, необходимый для хранения характеристик отпечатка пальца в таком виде, значительно уменьшается по сравнению с хранением исходного изображения.

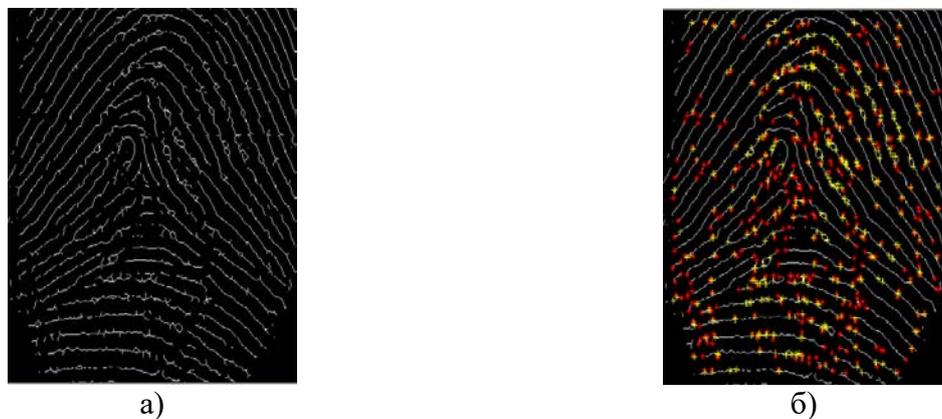


Рисунок 2 –Изображения отпечатка пальца после процедуры скелетизации и с выделенными особыми точками: а) – вид отпечатка пальца после процедуры скелетизации, б) – с выделенными особыми точками

Преобразование абсолютных параметров особых точек в относительные. Если в базе данных хранить координаты особых точек, полученных в пункте выше, то чтобы определить находится ли отпечаток в базе данных, необходимо на вход системы подавать изображение отпечатка пальца, абсолютно совпадающее с тем, что хранится в базе данных. Такая система не будет иметь практического применения, т. к. невозможно абсолютно одинаково приложить палец к сканеру, в любом случае будет какое-то смещение или поворот относительно изображения, хранящегося в базе данных.

Для того, чтобы не хранить в базе данных по несколько десятков образцов отпечатков одного и то же пальца, необходимо провести некоторые преобразования. Скорректировать направление изображения отпечатка можно рассмотрев структуру области ядра (центральной части отпечатка), учитывая структурные особенности направления папиллярных линий снизу и сверху этой области. Однако, результат поворота изображения в этом случае не будет полностью однозначным, так как не будет учтен наклон и сдвиг пальца при получении его отпечатка. Более точный результат дает преобразование абсолютных параметров, полученное в результате выделения особых точек отпечатка пальца, в относительные параметры и дальнейшее хранение относительных параметров. Данное преобразование осуществляется для каждой обнаруженной минуции относительно всех других. Для такого преобразования разрабатывается алгоритм, в результате выполнения которого получается матрица размерностью ($\mathbf{n} \times \mathbf{n}$), где координатами матрицы (от $\mathbf{0}$ до \mathbf{n}) являются номера выделенных особых точек. Элементы матрицы содержат информацию о взаимном расположении особых точек. Каждый элемент является трехмерным вектором, координатами которого будут: расстояние между особыми точками \mathbf{i} и \mathbf{j} – r_{ij} ; угол между собственным направлением точки \mathbf{i} и направлением вектора $\mathbf{i}\mathbf{j}$ – α_{ij} ; а также угол между собственными направлениями особых точек \mathbf{i} и \mathbf{j} – β_{ij} (рисунок 3). Эти характеристики отпечатка пальца являются сравнительно независимыми относительно поворота картины отпечатка и степени прижатия пальца при получении отпечатка.

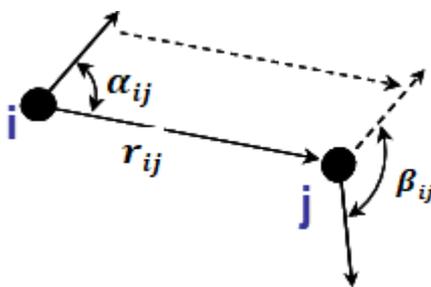


Рисунок 3 – Взаимное расположение точек \mathbf{i} и \mathbf{j}

Надо отметить, что в результате обработки изображений отпечатков и подготовки данных для хранения значительно уменьшается необходимый объем памяти. Если исходные изображения отпечатков пальцев, полученные со сканера, занимают от 121 кбайт до 144 кбайт, то для хранения массива, содержащего характеристики 50 особых точек, необходимое количество памяти находится в районе 1200 байт.

Сравнение отпечатка, полученного со сканера, с отпечатком из базы данных. Для того, чтобы устранить малые отклонения в характеристиках двух отпечатков одного и того же пальца, необходимо использовать систему допусков относительных характеристик. Для этого задаются допустимые отклонения относительных характеристик особых точек отпечатка пальца: Δr_{ij} , $\Delta \alpha_{ij}$, $\Delta \beta_{ij}$. Тогда особая точка отпечатков, полученных со сканера и хранящихся в базе, считается совпавшей в том случае, если отклонения относительных характеристик этой особой точки относительно других точек не превышают заданные.

Чтобы вычислить степень сходства двух отпечатков, необходимо сравнить наборы минуций на обоих отпечатках. Отпечатки считаются схожими, если количество совпавших точек превышает определенный порог сходства. В результате выполнения данного алгоритма создается список отпечатков из базы данных, структурное представление которых совпадает

с исследуемым отпечатком или схоже с ним на определенное количество процентов. Каждый элемент будет состоять из следующих полей: имя отпечатка, количество совпавших минуций, степень сходства отпечатков в процентах.

В соответствии с вышесказанным для хранения данных об изображениях отпечатков пальцев необходимо разработать базу данных. Для этого формируется таблица со следующими полями: «Идентификатор отпечатка» (тип int), «Вектор особых точек» (тип double []). Каждая запись должна соответствовать одному отпечатку. Каждая запись в поле «Вектор особых точек» хранит вектор следующего вида: $T_i = \{r_{i1}, \alpha_{i1}, \beta_{i1}, r_{i2}, \alpha_{i2}, \beta_{i2}, \dots, r_{iN}, \alpha_{iN}, \beta_{iN}\}$, где $r_{i1}, \alpha_{i1}, \beta_{i1}$ – относительные параметры особых точек, описанные выше, N – целое число в интервале от 30 до 50. Одно из полей является массивом, поэтому для реализации такой базы данных нельзя использовать SQL базы данных, так как будет нарушена нормализация данных. Для реализации хранилища таких данных необходимо использовать NoSQL базы данных, например такую документоориентированную систему управления базами данных, не требующую описания схемы таблиц, как MongoDB [6].

Заключение. В представленной работе предложен полный цикл операций для подготовки к хранению отпечатков пальцев в базе данных и их идентификации. Во-первых, в работе предложен алгоритм предварительной обработки изображений отпечатков пальцев, полученных со сканера. Во-вторых, представлен алгоритм выделения особых точек и преобразования их параметров к виду, пригодному для хранения в базе данных дактилоскопических изображений. И наконец, предложен алгоритм сравнения отпечатка, полученного со сканера с отпечатком, хранящимся в базе данных.

Литература

1. Задорожный, В. В. Идентификация по отпечаткам пальцев. Часть 1 [Электронный ресурс] / В. В. Задорожный // PC Magazine/Russian Edition. – 2004. – № 1. – Режим доступа : <http://bre.ru/security/20994.html>. – Дата доступа : 20.01.2022.
2. Ларина, Е. А. Сканирующие методы получения отпечатков пальцев / Е. А. Ларина, А. А. Глушко // Молодой ученый. – 2016. – № 27 (131). – С. 97–107.
3. Характеристики сканера BioMini Plus 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://supremainc.ru/media/support/2018-07-23/files/BioMini%20Plus%202.pdf>. – Дата доступа : 20.01.2022.
4. Farah, Dhib Tatar. Preprocessing algorithm for digital fingerprint image / Farah Dhib Tatar, M. Machhout // International Journal of Computational Science and Information Technology (IJCSITY). – 2018. – Vol. 6, № 1/2/3. – DOI: 10.5121/ijccity.2018.6301.
5. Bansal, R. Minutiae extraction from fingerprint images / R. Bansal, P. Sehgal, Punam Bedi // International Journal of Computer Science Issues. – 2011. – Vol. 8, issue 5, № 3. – P. 74–85.
6. Phaltankar, A. MongoDB fundamentals : a hands-on guide to using MongoDB and atlas in the real world / A. Phaltankar, J. Ahsan, M. Harrison, L. Nedov. – Birmingham, United Kingdom : Packt Publishing, 2020. – 748 p.

Об опыте получения, хранения и анализа Big Data с удаленных сайтов

Е.И. СУКАЧ, В.Ю. БУРИКИН, А.А. КОНЧИЦ

Рассматриваются практические вопросы применения современных информационных технологий для извлечения, систематизации и обработки Big Data. Описываются подходы к созданию автоматизированной системы по получению и обработке статистической информации с использованием инструментов API и StreamSets. Приводятся результаты использования Big Data для восстановления действующих значений показателей смертности, не искаженных влиянием других причин смертности. Подход демонстрируется на примере восстановления действующих значений показателей смертности от внешних причин.

Ключевые слова: большие данные, статистика, вероятностное моделирование, биология продолжительности жизни, возрастная динамика общей смертности, интенсивность смертности, согласованность причин смертности, действующие показатели смертности.

The practical issues of applying modern information technologies for extracting, systematizing and processing Big Data are considered. The approaches to the creation of an automated system for receiving and processing statistical information using the API and StreamSets tools are described. The results of using Big Data to restore the current values of mortality rates, not distorted by the influence of other causes of death, are presented. The approach is demonstrated on the example of restoring the current values of mortality rates from external causes.

Keywords: Big Data, statistics, probabilistic modeling, biology of life expectancy, age dynamics of total mortality, intensity of mortality, consistency of causes of death, current mortality rates.

Введение. Современный уровень развития информационных технологий позволяет фиксировать и накапливать большой объем статистических данных, которые используются для управления процессами в различных предметных областях, моделирования и прогнозирования возможных вариантов развития исследуемых объектов. Быстрый рост объема данных, их плохая структурированность и различные форматы хранения требуют применения современных методов и средств их автоматизации, позволяющих справиться с задачами получения, систематизации, обработки и интерпретации имеющейся информации. Одновременно с совершенствованием средств для работы с Big Data изменяется и сам смысл термина Big Data. Все чаще он связан со значением, которое можно извлечь из наборов данных с помощью расширенной аналитики, а не определяется только объемом данных. Поэтому была предпринята попытка применения существующих программных средств извлечения Big Data, характеризующих динамику процесса смертности, с целью их использования в качестве параметров вероятностного моделирования [1] для восстановления действующих значений повозрастных показателей смертности.

Для сбора статистических данных, необходимых для проведения анализа медико-демографических данных, были использованы доступные базы данных Datasets сайтов WHO (World Health Organization) и CDC (Center for Disease Control and Prevention), которые предоставляют два способа получения информации. Во-первых, можно воспользоваться средствами ETL для получения с данных в нужном формате и дальнейшей их обработки и структуризации. Во-вторых, можно использовать встроенные средства API (Application Programming Interface) [2] сайта для автоматизации процесса извлечения данных и далее реализовать веб-сайт, предоставляющий доступ к базе данных со структурированными там данными и средствами их обработки. В процессе работы по сбору и систематизации исходных данных были опробованы два способа работы с Big Data.

В статье излагаются результаты двух вариантов извлечения и обработки данных с сайта CDC. Обработка, структурирование данных в формате CSV реализовано с использованием ETL-платформы в виде системы StreamSets [3]. Системный подход был реализован с использованием API, с помощью которого было автоматизировано получение данных с удалённого

сервера в форматах CSV, JSON или XML. Результат обработки данных оформлен в виде базы данных, содержащей сведения о показателях по возрастной смертности по различным причинам для разных стран и временных интервалов.

Обработка и систематизация данных с использованием StreamSets. StreamSets – система управления потоком данных, имеющая визуальный интерфейс. Она позволяет в режиме реального времени обрабатывать, преобразовывать и сортировать данные. Состоит из двух элементов: SDC – система, которая выполняет собственно саму обработку данных и StreamSets Control Hub – центр управления несколькими SDC, который имеет дополнительные возможности по разработке пайплайнов.

С использованием StreamSets была разработана система, автоматизирующая получение, фильтрацию и хранение данных в формате CSV с сайта WHO. Для работы с ними в StreamSets был создан пайплайн и в него были добавлены необходимые инструменты (рисунок 1).

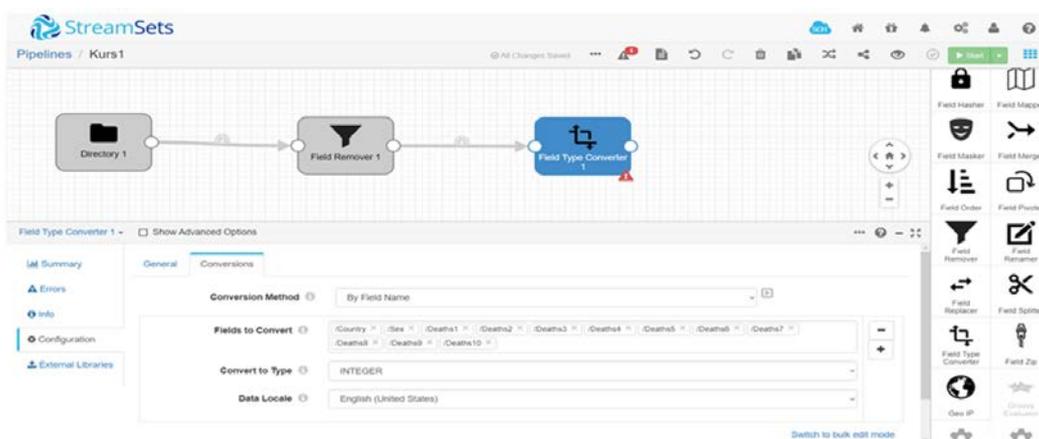


Рисунок 1 – Окно настройки параметров фильтрации и преобразования типа данных

Далее полученные данные (рисунок 2), оформленные с помощью Microsoft SQL Server Management Studio в виде базы данных, были отсортированы по выбранным критериям, отредактированы и дополнены возможностью пополнения новыми данными.

ID	Country	Admin	SubDiv	Year	List	Cause	Sex	Fformat	IM_Fformat	Death1	Death2	Death3	Death4	Death5	Death6	Death7	Death8	Death9	Death10
"1"	"4012"	--	--	"2001"	"101"	"1000"	"1"	"01"	"08"	4012	2001	1	23725	769	349	203	114	74	285
"2"	"4012"	--	--	"2001"	"101"	"1000"	"2"	"01"	"08"	4012	2001	2	21559	613	300	163	81	68	221
"3"	"4012"	--	--	"2001"	"101"	"1001"	"1"	"01"	"08"	4012	2001	1	1069	75	41	8	13	3	7
"4"	"4012"	--	--	"2001"	"101"	"1001"	"2"	"01"	"08"	4012	2001	2	463	74	36	9	3	2	16
"5"	"4012"	--	--	"2001"	"101"	"1002"	"1"	"01"	"08"	4012	2001	1	0	0	0	0	0	0	0
"6"	"4012"	--	--	"2001"	"101"	"1002"	"2"	"01"	"08"	4012	2001	2	0	0	0	0	0	0	0
"7"	"4012"	--	--	"2001"	"101"	"1003"	"1"	"01"	"08"	4012	2001	1	80	51	25	2	1	0	0
"8"	"4012"	--	--	"2001"	"101"	"1003"	"2"	"01"	"08"	4012	2001	2	87	50	27	1	1	1	4
"9"	"4012"	--	--	"2001"	"101"	"1004"	"1"	"01"	"08"	4012	2001	1	30	3	3	3	5	0	2
"10"	"4012"	--	--	"2001"	"101"	"1004"	"2"	"01"	"08"	4012	2001	2	21	4	1	3	0	0	1

Рисунок 2 – Окно с полученными и структурированными данными

Ввиду больших объемов данных, необходимых для проведения анализа медико-демографической информации, использование представленного способа получения данных трудоемко и не исключает ошибки на стадии формирования исходных данных. Поэтому актуально применение API.

Использование API для автоматизации процесса получения данных с сайта. API– интерфейс программирования приложений, который позволяет различным сервисам кооперироваться, обмениваться данными, получая к ним доступ. С его помощью был автоматизиро-

ван процесс извлечения данных с сайта CDC и организована их передача её для обработки в StreamSets. Для правильного использования средств API была изучена справочная информация, представленная на сайте CDC (рисунок 3).

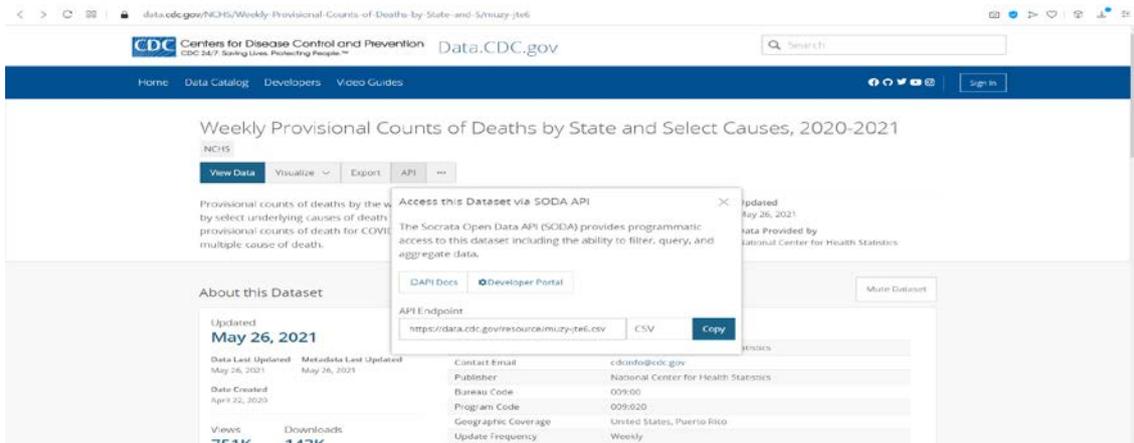


Рисунок 3 – Окно помощи по API для разработчиков

Для автоматизации работ по извлечению и систематизации данных использовался язык программирования Python. Был создан новый проект, выбрана версия Python, указано место хранения и некоторые другие параметры. Были скачаны и импортированы библиотеки, необходимые для выполнения поставленной задачи.

Выполнение Get-запроса по ссылке, которая была получена от API сайта, позволило получить нужные данные в формате JSON. Далее эти данные были занесены в переменную. В модуле JSON были использованы функции load() и loads() для превращения кодированных данных JSON в объекты Python. Затем полученные данные были занесены в базу данных. Для этого был получен к ней доступ и запущен процесс подключения: указан хост, имя пользователя, пароль и название базы данных, к которой запланировано подключение.

Организация цикла позволила просмотреть данные и выбрать необходимые значения из соответствующих столбцов, которые были записаны в соответствующие переменные для каждого столбца спроектированной базы данных. Наконец, было реализовано перемещение готовых данных в подключённую базу данных. Просмотр содержимого базы данных позволяет убедиться в наличии обработанных структурированных данных, которые просты для понимания и готовы для анализа, моделирования и прогнозирования (рисунок 4).

Date_Abs_Of	Jurisdiction_of_Occurrence	MMWR_Year	MMWR_Week	Week_Ending_Date	All_Cause	Natural_Cause	Septicemia	Malignant_neoplasms	Diabetes_mellitus	Alzheimer
2022-01-12T00:00:00.000	United States	2020	1	2020-01-04	60173	55007	843	11569	1829	2537
2022-01-12T00:00:00.000	United States	2020	2	2020-01-11	60743	55759	861	11963	1941	2566
2022-01-12T00:00:00.000	United States	2020	3	2020-01-18	59359	54514	829	11701	1819	2491
2022-01-12T00:00:00.000	United States	2020	4	2020-01-25	59158	54396	828	11879	1864	2517
2022-01-12T00:00:00.000	United States	2020	5	2020-02-01	58826	53996	811	11963	1828	2480
2022-01-12T00:00:00.000	United States	2020	6	2020-02-08	59478	54409	806	11704	1957	2515
2022-01-12T00:00:00.000	United States	2020	7	2020-02-15	58808	53966	792	11806	1848	2537
2022-01-12T00:00:00.000	United States	2020	8	2020-02-22	59006	53983	779	11780	1880	2515
2022-01-12T00:00:00.000	United States	2020	9	2020-02-29	59339	54318	813	11790	1831	2519

Рисунок 4 – Окно с данными в базе данных

Пример восстановления действующих повозрастных показателей смертности. Статистические данные смертности, классифицированные по разным причинам для различных стран и временных интервалов, являются результатом взаимного влияния эндогенных

(обусловленных естественным старением человеческого организма) и экзогенных факторов (порожденных влиянием внешней среды), которые конкурируют между собой в случайном процессе смертности. Л.А. Гаврилов в результате своих исследований установил компенсационный эффект смертности: ликвидация причин смерти по отдельной причине не отражается на общем показателе смертности, поскольку её место занимают другие причины смертности [4]. Для определения вероятностей действующих значений повозрастных показателей смертности был разработан метод, основанный на вероятностно-алгебраическом моделировании и точном алгоритме, использующем вероятностные значения наблюдаемых показателей смертности, полученных с использованием описанных способов работы с Big Data. Применение разработанного метода к полученным с сайта CDC данным, отражающим процесс смертности для мужчин в 1999 г. в США позволило найти единственное решение задачи восстановления действующих векторов вероятностей показателей смертности, обусловленных внешними причинами и всеми остальными причинами, исключая внешние.

На рисунке 5 представлены прологарифмированные значения векторов вероятностей повозрастных показателей смертности для анализируемых данных, а именно: наблюдаемые значения повозрастного показателя общей смертности (1); наблюдаемая повозрастная смертность по внешним причинам (2); действующая повозрастная смертность по внешним причинам (2'); действующая повозрастная смертность по другим причинам (1').

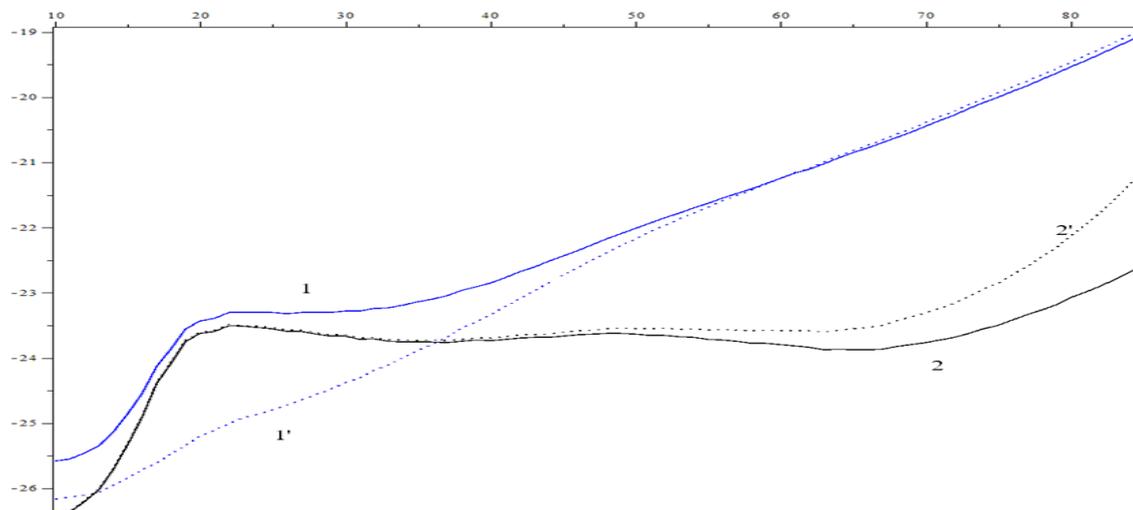


Рисунок 5 – Логарифмы значений векторов вероятностей наблюдаемых и действующих смертностей

Литература

1. Сукач, Е. И. Вероятностно-алгебраическое моделирование сложных систем графовой структуры / Е. И. Сукач ; М-во образования РБ, Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2012. – 224 с.
2. Арно, Лоре. Проектирование веб-API / Лоре Арно. – М. : ДМК-Пресс, 2020. – 440 с.
3. Система управления потоком данных StreamSets [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://streamsets.com>. – Дата доступа : 27.04.2022.
4. Гаврилов, Л. А. Биология продолжительности жизни / Л. А. Гаврилов, Н. С. Гаврилова – М. : Наука, 1991. – 280 с.

УДК 512.542

О пересечении A -допустимых абнормальных подгрупп, не содержащих подгруппу Фиттинга

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

В представленной работе исследовано строение подгруппы, равной пересечению ядер ненильпотентных максимальных A -допустимых подгрупп, не содержащих подгруппу Фиттинга. Установлены свойства соответствующей обобщенной подгруппы Фраттини.

Ключевые слова: разрешимая группа, подгруппа Фиттинга, абнормальная подгруппа.

In the present work, the structure of the subgroup equal to the intersection of the nuclei non-nilpotent maximal A -admissible subgroups not containing a Fitting subgroup is studied. The properties of the corresponding generalized Frattini subgroup are established.

Keywords: solvable group, Fitting subgroup, abnormal subgroup.

1. Введение. Все группы, которые будут рассматриваться в статье, предполагаются конечными. Объекты, экстремально расположенные в группе, всегда занимали одно из центральных мест в теории конечных групп. К таким объектам, начиная с истоков зарождения данной теории, относятся максимальные подгруппы. Задача об определении свойств пересечений определенных максимальных подгрупп и исследовании влияния этих свойств на строение самой группы является центральным направлением теории пересечений максимальных подгрупп. Основопологающей работой этого направления является результат Фраттини [1] 1885 г., в котором была установлена нильпотентность пересечения всех максимальных подгрупп конечной группы G (подгруппа Фраттини $\Phi(G)$). Его результаты породили различные интерпретации обобщённых подгрупп Фраттини, включая арифметические, формационные, функторные и многие другие (см. монографии [2] и [3]).

Одним из принципов отбора максимальных подгрупп, которые предполагают вхождение в пересечение, часто выступает выбор максимальных подгрупп, которые не содержат некоторую нормальную подгруппу конечной группы, например, подгруппу Фиттинга [4] или \mathfrak{F} -корадикала [2].

Данная работа развивает указанное направление в группах с операторами.

2. Определения и обозначения. Напомним, что подгруппа M_G , равная пересечению всех подгрупп из G , сопряженных с подгруппой M , называется ядром подгруппы M в группе G .

Рассмотрим такие максимальные подгруппы, которые обладают заранее определенными свойствами. В качестве таких свойств в данном обзоре будут выступать: допустимость относительно некоторой группы операторов, свойство содержать или не содержать подгруппу Фиттинга, а также свойство не принадлежать заданному классу групп.

Следует напомнить, что классом групп называют некоторое множество групп, которое включает вместе с каждой своей группой G и все группы, изоморфные ей.

Рассмотрим группу G , некоторое множество A и отображение $g : A \mapsto \text{End}(G)$, где $\text{End}(G)$ – гомоморфизм группы G в себя или эндоморфизм группы G . Подгруппу M называют A -допустимой относительно группы операторов A , если она выдерживает действие всех операторов из A .

Стоит заметить, что каждая характеристическая подгруппа будет являться A -допустимой для произвольной группы операторов, так как операторы действуют как соответствующие им эндоморфизмы. В дальнейшем для каждой группы G будем фиксировать некоторую ее группу операторов.

Максимальной A -допустимой подгруппой в G называют подгруппу L группы G , если из того, что L является A -допустимой и каждая собственная A -допустимая подгруппа из G , содержащая L , совпадает с L .

Введем следующие обозначения:

- 1) $\bar{\Delta}_F(G, A) = \cap \{M_G \mid M \not\cong F(G), M \notin \mathfrak{N}, M \text{ — абнормальная максимальная } A\text{-допустимая подгруппа}\};$
- 2) $\Delta_{\bar{F}}(G, A) = \cap \{M_G \mid M \not\cong F(G), M \text{ — абнормальная максимальная } A\text{-допустимая подгруппа}\};$
- 3) $\Delta_F(G, A) = \cap \{M_G \mid M \cong F(G), M \text{ — абнормальная максимальная } A\text{-допустимая подгруппа}\};$
- 4) $\Delta(G, A) = \cap \{M_G \mid M \text{ — абнормальная максимальная } A\text{-допустимая подгруппа}\}.$

При пересечении пустого множества подгрупп из G будем считать, что данное пересечение совпадает с самой группой G .

Стоит обратить внимание, что если группа операторов тривиальна, то введенная выше подгруппа $\Delta(G, A)$ будет совпадать с подгруппой Гашюца $\Delta(G)$, равной пересечению всех инвариантных подгрупп группы G .

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 [9].

3. Вспомогательные результаты.

3.1. Лемма [6, с. 64]. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$. Если G обладает свойством C_π , то G содержит A -допустимую S_π -подгруппу.

3.2. Лемма [7, с. 26]. Пусть группа G имеет группу операторов A . Если K — A -допустимая подгруппа группы G , то $N_G(K)$ является A -допустимой подгруппой группы G .

3.3. Лемма [2, с. 179]. Если подгруппа H пронормальна в G , то подгруппа $N_G(H)$ абнормальна в G .

3.4. Лемма. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$. Тогда в произвольной группе подгруппа $\Delta(G, A)$ нильпотентна.

Доказательство. Допустим, что простое число $p \in \pi(\Delta(G, A))$. По лемме 3.1 в подгруппе $\Delta(G, A)$ должна существовать A -допустимая p -силовская подгруппа P . По лемме Фраттини

$$G = N_G(P)\Delta(G, A).$$

На основании леммы 3.2 нормализатор $N_G(P)$ является A -допустимой подгруппой. Если допустить, что $N_G(P) = G$, то P нормальна в G , а это будет означать, что нормальна и в подгруппе $\Delta(G, A)$. Предположим, что $N_G(P) \neq G$, тогда по лемме 3.3 $N_G(P)$, являясь абнормальной подгруппой, будет содержаться в некоторой абнормальной максимальной A -допустимой подгруппе M . Из леммы Фраттини и определения $\Delta(G, A)$ будет однозначно вытекать, что $\Delta(G, A) \subseteq M$, что означает, что $M = G$, а это противоречит предположению. Из вышперечисленного заключаем, что любая силовская подгруппа из подгруппы $\Delta(G, A)$ нормальна в ней. Откуда окончательно следует, что рассматриваемая подгруппа $\Delta(G, A)$ будет нильпотентна. Лемма доказана.

3.5. Лемма. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, $K \subseteq N \triangleleft G$, $K \triangleleft G$, N и K – A -допустимые подгруппы группы G и $K \subseteq \Delta(G, A)$. Тогда справедливы следующие утверждения:

1) $F_p(N/K) = F_p(N)/K$;

2) $F(N/K) = F(N)/K$.

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

1) $\Delta(G, A) \subseteq F(G)$;

2) если G – разрешимая неединичная группа, то $\Delta(G, A) \subset F(G)$.

Доказательство. На основании леммы 3.4 заключаем, что $\Delta(G, A)$ – нильпотентная подгруппа. Откуда следует следующее включение $\Delta(G, A) \subseteq F(G)$. Пусть группа G является разрешимой, тогда факторгруппа $G/\Delta(G, A)$ также разрешима и неединична. Пусть в $G/\Delta(G, A)$ факторгруппа $B/\Delta(G, A)$ является минимальной нормальной. Из того, что $B/\Delta(G, A)$ является p -группой для некоторого простого p , то по лемме 3.5 подгруппа B является нильпотентной, а это будет означать, что $B \subseteq F(G)$. Остается заключить, что $\Delta(G, A) \subset F(G)$.

3.7. Лемма [6, с. 43]. Пусть p простое нечётное число. 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.

4. Основные результаты.

4.1. Теорема. Если произвольная неразрешимая группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, то в этой группе G будут существовать абнормальные нильпотентные A -допустимые подгруппы, к тому же пересечение ядер всех соответствующих подгрупп нильпотентно.

Доказательство. Будем считать, что \mathfrak{F} является формацией всех p -нильпотентных групп. Исходя из условий теоремы группа G не p -разрешима, то $K = G^{\mathfrak{F}} \notin \mathfrak{F}$. Не ограничивая общности можно полагать, что $O_p(G) = 1$. Обозначим силовскую p -подгруппу из K через P . На основании леммы 3.7 в P будет существовать такая характеристическая и, как следствие, A -допустимая подгруппа $R \neq 1$ такая, что нормализатор $N_K(R)$ не принадлежит формации \mathfrak{F} . Так как R является A -допустимой подгруппой, то на основании леммы 3.2 нормализатор $N_G(R)$ также является A -допустимой подгруппой. Из $N_K(R) \subseteq N_G(R)$ следует, что $N_G(R) \notin \mathfrak{F}$. На основании того, что $O_p(G) = 1$, имеем $N_G(P) \neq G$. Из леммы 3.3 заключаем, что нормализатор $N_G(P)$ – абнормальная подгруппа. Учитывая включение $N_G(P) \subseteq N_G(R)$, получаем, что нормализатор $N_G(R)$ является абнормальной подгруппой. Учитывая тот факт, что любая подгруппа, которая содержит нормализатор $N_G(R)$, сама будет являться нильпотентной и абнормальной, то в качестве абнормальной нильпотентной максимальной A -допустимой подгруппы возьмем наибольшую из абнормальных A -допустимых подгрупп, которые содержат $N_G(R)$.

Обозначим через D подгруппу, которая совпадает с пересечением ядер всех абнормальных нильпотентных A -допустимых подгрупп. Допустим, что $D \subset \Delta(G, A)$. Тогда будет существовать нильпотентная абнормальная A -допустимая подгруппа M , не содержащая D , что влечет $G = DM$. Откуда будет следовать, что $G/D \simeq M/M \cap D$ нильпотентна, в частности, разрешимая группа.

Обозначим через P силовскую A -допустимую p -подгруппу из D . На основании обобщенной леммы Фраттини $G = DN_G(P)$. Если допустить, что $N_G(P) = G$, то $P \triangleleft G$. Из этого факта и разрешимости G/D будет следовать разрешимость и самой группы G , что противоречит условию.

В дальнейшем будем считать, что нормализатор $N_G(P)$ отличен от самой группы G . Пусть R такая, что $N_G(P) \subseteq R$ и при этом она является максимальной A -допустимой подгруппой группы G . Из абнормальности нормализатора $N_G(P)$ будет следовать, что и подгруппа R также является абнормальной подгруппой. Из равенства $G = DR$ вытекает, что R нильпотентная подгруппа, а это означает, что $N_G(P)$ является нильпотентной подгруппой.

Если допустить, что подгруппа D нильпотентна, то это приведет к тому, что группа G – разрешима. Получили противоречие с условием теоремы.

В дальнейшем будем полагать, что D – ненильпотентная подгруппа. Тогда в ней будет существовать силовская p -подгруппа P^* , которая не инвариантна в G . Используя обобщенную лемму Фраттини получаем $G = DN_G(P^*)$.

Остаются два варианта: $N_G(P^*)$ нильпотентна либо $N_G(P^*) = G$. Первый случай невозможен. Остаётся принять, что $P^* \triangleleft G$, что противоречит выбору подгруппы P^* . Остаётся заключить, что $D = \Delta(G, A) \in \mathfrak{N}$.

4.2. Теорема. *Если группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, то будут справедливы следующие утверждения:*

- 1) в разрешимой неединичной группе справедливо равенство $\Delta_{\bar{F}}(G, A) = \Delta(G, A)$;
- 2) в разрешимой ненильпотентной группе выполняется условие $\Delta_F(G, A) \in \mathfrak{N}^2$.

Доказательство. Подгруппы $\Delta_F(G, A)$ и $\Delta_{\bar{F}}(G, A)$ являются характеристическими в группе G и, очевидно,

$$\Delta_{\bar{F}}(G, A) \cap \Delta_F(G, A) = \Delta(G, A).$$

Для группы $G / \Delta(G, A)$ на основании свойств подгруппы Фиттинга выполняется равенство

$$F(G / \Delta(G, A)) = F(G) / \Delta(G, A).$$

Откуда следует

$$\Delta_{\bar{F}}(G / \Delta(G, A)) = \Delta_{\bar{F}}(G, A) / \Delta(G, A).$$

Допустим, что $\Delta_{\bar{F}}(G, A) / \Delta(G, A) \neq 1$ и пусть $K / \Delta(G, A)$ является минимальной нормальной подгруппой в $G / \Delta(G, A)$, содержащейся в $\Delta_{\bar{F}}(G, A) / \Delta(G, A)$. Так как факторгруппа $K / \Delta(G, A)$ является нильпотентной, то по лемме 3.5 подгруппа K также будет являться нильпотентной. Откуда следует, что $K \subseteq F(G)$ и

$$K \subseteq \Delta_{\bar{F}}(G, A) \cap \Delta_F(G, A),$$

что противоречит выбору K . Следовательно, предположение не верно и $\Delta_{\bar{F}}(G, A) / \Delta(G, A) = 1$, а, это означает, что $\Delta_{\bar{F}}(G, A) = \Delta(G, A)$.

Допустим, что G является разрешимой ненильпотентной группой. На основании включения $F(G) \subseteq \Delta_F(G, A)F(G)$ и следующего равенства

$$\Delta_F(G, A) / F(G) = \Delta(G / F(G), A),$$

остаётся заключить, что подгруппа $\Delta_F(G, A)$ является метанильпотентной.

4.2.1. Следствие. *Если группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, то в разрешимой неединичной группе подгруппа $\Delta_{\bar{F}}(G, A)$ будет нильпотентной подгруппой.*

В случае тривиальности группы операторов A будет иметь место следующее

4.2.2. Следствие. *Для разрешимой группы будут справедливы следующие высказывания:*

- 1) в неединичной группе $\Delta_{\bar{F}}(G) = \Delta(G) \in \mathfrak{N}$;
- 2) в ненильпотентной группе подгруппа $\Delta_F(G) \in \mathfrak{N}^2$.

4.3. Теорема. *Пусть G является разрешимой группой с группой операторов A такой, что $(|G|, |A|) = 1$. Если $\Delta_{\bar{F}}(G, A) \neq G$, то $\Delta_{\bar{F}}(G, A) = \Delta(G, A)$.*

Доказательство. Допустим, что в группе G существуют ненильпотентные абнормальные максимальные A -допустимые подгруппы, не содержащие подгруппу Фиттинга $F(G)$. Заметим, что

$$\Delta(G, A) \subseteq \bar{\Delta}(G, A) \subseteq \bar{\Delta}_F(G, A)$$

и на основании теоремы 4.1 $\Delta(G) = \bar{\Delta}(G, A)$.

Предположим, что подгруппа $\bar{\Delta}_F(G, A)$ отлична от подгруппы $\bar{\Delta}(G, A)$, тогда $\bar{\Delta}_F(G, A) / \bar{\Delta}(G, A) \neq 1$ и, вместе с тем, $K / \bar{\Delta}(G, A)$ является минимальной нормальной подгруппой в $G / \bar{\Delta}(G, A)$, содержащейся в $\bar{\Delta}_F(G, A) / \bar{\Delta}(G, A)$. Так как факторгруппа $K / \bar{\Delta}(G, A)$ нильпотентна, то на основании леммы 3.5 заключаем, что K является p -нильпотентной подгруппой. Откуда следует, что $K \subseteq F(G)$. Но тогда

$$K \subseteq \bar{\Delta}_F(G, A) \cap \bar{\Delta}_F(G, A),$$

что противоречит выбору подгруппы K . Следовательно, предположение не верно и $\bar{\Delta}_F(G, A) / \bar{\Delta}(G, A) = 1$, а, это влечет $\bar{\Delta}_F(G, A) = \Delta(G, A)$.

Из теоремы 4.3 на основании леммы 3.4 получаем

4.3.1. Следствие. Пусть G – разрешимая группа с группой операторов A такой, что $(|G|, |A|) = 1$. Если $\bar{\Delta}_F(G, A) \neq G$, то $\bar{\Delta}_F(G, A)$ является нильпотентной подгруппой группы G .

В случае тривиальности группы операторов A из теоремы 4.3 получаем

4.3.2. Следствие. Если в разрешимой группе G существуют ненильпотентные абнормальные максимальные подгруппы, не содержащие подгруппу Фиттинга, то их пересечение совпадает с подгруппой $\Delta(G)$.

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. – Минск : Беларуская навука, 1997. – 144 с.
4. Монахов, В. С. Замечания о максимальных подгруппах конечных групп / В. С. Монахов // Доклады НАН Беларуси. – 2003. – Т. 47, № 4. – С. 31–33.
5. Скиба, А. Н. Алгебра формаций / А. Н. Скиба. – Минск : Беларуская навука, 1997. – 240 с.
6. Thompson, J. G. Normal p -complements for finite groups / J. G. Thompson // J. Algebra. – 1964. – № 1. – P. 43–46.
7. Gorenshstein, D. Finite groups / D. Gorenshstein. – New York : Harper and Row, 1968. – 572 p.
8. Бородич, Р. В. О пересечении максимальных подгрупп конечных групп / Р. В. Бородич // Укр. мат. журн. – 2019. – Т. 71, № 11. – С. 1455–1465.
9. Borodich, R. V. A generalized Frattini subgroup / R. V. Borodich // Asian-European Journal of Mathematics. – 2019. – № 14 (02). – DOI: 10.1142 / S1793557121500261.

Симметричная маркерная кольцевая локальная сеть с одноместными буферами

В.В. БУРАКОВСКИЙ

Рассматривается симметричная кольцевая локальная сеть с протоколом маркерного доступа с N абонентскими станциями, на каждой из которых имеется одноместный буфер. При поступлении маркера подключается ординарная дисциплина обслуживания сообщений. Потoki поступающих сообщений предполагаются пуассоновскими, независимыми, одинаковой интенсивности λ . Получены уравнения, позволяющая вычислить стационарные вероятности, а также основные вероятностно-временные характеристики рассматриваемой локальной сети.

Ключевые слова: маркерная кольцевая локальная сеть, станция, сообщение, одноместный буфер, ординарная дисциплина обслуживания, стационарные вероятности состояний.

The symmetric token-passing ring local area network with N stations in which each station has a single buffer is studied. When a token arrives, the ordinary discipline is on. The message arrival streams are assumed to be independent Poisson processes with rates λ . Equations for the steady-state probabilities and main characteristics of the considered network are obtained.

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

Введение. Среди различных классов компьютерных сетей в настоящее время большой интерес для автоматизации производства, функционирования фирм и учрежденческой деятельности представляют локальные вычислительные сети (ЛВС). Применение ЛВС с кольцевой топологией происходит во многих наукоемких отраслях машиностроения, к которым в частности относятся авиаприборостроение, ракетостроение и другие. Поэтому интерес представляет проблема повышения эффективности их применения.

Протокол маркерного доступа [1, с. 101] является одной из самых эффективных схем, обеспечивающих связь между станциями в кольцевой сети передачи данных. При помощи этого протокола происходит подключение подавляющего числа пользователей высокоскоростного, беспроводного и телефонного Интернета. Кольцевая ЛВС (КЛВС) [2, с. 121] с маркерным доступом относится к протоколам детерминированного множественного доступа циклического типа. Она представляет собой совокупность абонентских станций (АС), соединенных последовательно двухточечными линиями. АС получают право на передачу данных при получении специального служебного кадра – маркера, циркулирующего по кольцу. Функционирование сети происходит в соответствии со стандартом ANSI/IEEE 802.5 [3, с. 23]. При поступлении маркера на АС случайным образом подключается ординарная (ordinary) дисциплина обслуживания сообщений [4, с. 10]. Математическими моделями КЛВС с маркерным доступом являются системы массового обслуживания [5, с. 64]. Адекватность математических моделей, описывающих КЛВС с ординарной дисциплиной обслуживания стоящих в буфере АС сообщений, проверялась при помощи разработанных имитационных моделей [6, с. 19]. Основные вероятностно-временные характеристики, полученные с помощью стационарных вероятностей состояний рассматриваемой сети, необходимы для анализа эффективности и оптимизации функционирования КЛВС [7, с. 9]. Приводится процедура определения стационарных вероятностей состояний для ординарной (ordinary) дисциплины обслуживания на АС [8, с. 39].

Описание математической модели. Рассмотрим симметричную КЛВС с протоколом маркерного доступа (стандарт ANSI/IEEE 802.5). На каждой из абонентских станций (АС) КЛВС имеется одноместный буфер. Дисциплина обслуживания сообщений на каждой АС – ординарная. Данная дисциплина предусматривает, что маркер уходит с АС после обслуживания не более 1 сообщения, находящегося в буфере на момент поступления маркера на АС.

Всего в сети имеется конечное число N АС. Поступающие на каждую станцию сообщения образуют простейший поток интенсивности λ . Обозначим через a время приема сообщения на АС – адресате, $\Delta = N\delta + a$ – время передачи сообщения по кольцу. Если с АС передаются l сообщений, то время передачи маркера на следующую АС – $\delta + l\Delta$, $0 \leq l \leq 1$.

С момента прихода маркера на АС и до окончания обслуживания (до момента ухода маркера) в буфер станции не могут поступать сообщения, поскольку он занят. При поступлении сообщения на АС, буфер которой полностью занят, или на АС, где уже находится маркер, происходит его потеря. Будем изучать процесс передачи сообщений для произвольной АС, поскольку имеется очевидная симметрия этих процессов на всех АС КЛВС.

Стационарные вероятности и вероятностно-временные характеристики. В момент поступления маркера на АС она может находиться всегда в одном из 2 состояний: свободном, когда на АС нет сообщений, с вероятностью p_0 и занятом с вероятностью p_1 в противном случае. Будем рассматривать поведение КЛВС в моменты поступления маркера на АС.

Обозначим через v_k число сообщений, имеющих на АС в момент t_k получения этой станцией k -го маркера, $k \in N$; ξ_k – число сообщений, поступивших в рассматриваемую АС за время $\theta_k = t_{k+1} - t_k$. Тогда имеет место соотношение $v_{k+1} = \xi_k$, где $v_k, \xi_k \in \{0,1\}$. Рассмотрим времена обращения маркера по кольцу. Если $v_k = 1$, то $\theta_k = \Delta + T_k$, где T_k – интервал времени между моментом отправки k -го маркера на очередную АС и моментом t_{k+1} получения следующего маркера; $\Delta = N\delta + a$ – интервал времени между моментом отправки сообщения и моментом получения квитанции о приеме сообщения. T_k – случайная величина, равная $N\delta + \eta_k\Delta$, где η_k – количество сообщений, которые передавались в КЛВС за время обращения k -го маркера по кольцу. Если $v_k = 0$, то $\theta_k = T_k$.

Пусть $F_k(T)$ – функция распределения случайной величины T_k . Тогда

$$\begin{aligned} P(\xi_k = 0 | v_k = 0) &= P(\xi_k = 0 | v_k = 1) = q_0^k; \\ P(\xi_k = 1 | v_k = 0) &= P(\xi_k = 1 | v_k = 1) = q_1^k; \\ q_0^k &= \int_{N\delta}^{N\delta + (N-1)\Delta} e^{-\lambda T} dF_k(T); q_1^k = 1 - q_0^k. \end{aligned}$$

Полагая случайные величины $\xi_k, k \in N$, независимыми в совокупности, получаем, что процесс изменения состояний АС в моменты поступления маркера является марковским и

$$p_0 = q_0; p_1 = 1 - p_0,$$

где

$$\begin{aligned} p_u &= \lim_{k \rightarrow \infty} P(v_k = u), \lim_{k \rightarrow \infty} F_k(T) = F(T), \\ q_u &= \lim_{k \rightarrow \infty} q_u^k, u \in \{0,1\}. \end{aligned}$$

Пусть α_j – случайная величина, принимающая значение 0, если в момент поступления маркера на j -ую по счету от рассматриваемой АС там нет сообщений, и значение 1 в противном случае. Тогда $\eta = \sum_{j=1}^{N-1} \alpha_j$ – количество сообщений, которые передавались за время обращения маркера по кольцу. Поскольку все АС в КЛВС имеют одинаковые параметры, будем считать, что вероятности p_0 для всех АС одинаковы. Предполагая независимость α_j в совокупности, получим, что η – биномиальная случайная величина, причем

$$P(\eta = m) = C_{N-1}^m (1 - p_0)^m p_0^{N-m-1}.$$

Отсюда следует, что

$$P(T = N\delta + m\Delta) = C_{N-1}^m (1 - p_0)^m p_0^{N-m-1}, 0 \leq m \leq N - 1.$$

Таким образом, по формуле полной вероятности имеем

$$q_0 = \sum_{m=0}^{N-1} e^{-\lambda(N\delta + m\Delta)} C_{N-1}^m (1 - p_0)^m p_0^{N-m-1}.$$

Применяя формулу бинома Ньютона, получим

$$q_o = e^{-\lambda N \delta} (p_o + e^{-\lambda \Delta} (1 - p_o))^{N-1}.$$

Так как $p_o = q_o$, то получим уравнение $p_o = e^{-\lambda N \delta} (p_o + e^{-\lambda \Delta} (1 - p_o))^{N-1}$ для определения вероятности p_o , которая является единственным корнем, находящимся в пределах

$$e^{-\lambda(N\delta+(N-1)\Delta)} < p_o < e^{-\lambda N \Delta}.$$

Время обращения маркера по кольцу является случайной величиной, которая принимает значения $N\delta + m\Delta$ с вероятностями g_m , которые вычисляются по формулам:

$$g_o = p_o^N; g_m = g_{om} + g_{1m} = C_N^m (1 - p_o)^m p_o^{N-m}, 1 \leq m \leq N,$$

$$g_{om} = p_o C_{N-1}^m (1 - p_o)^m p_o^{N-m-1} = C_{N-1}^m (1 - p_o)^m p_o^{N-m},$$

$$g_{1m} = (1 - p_o) C_{N-1}^m (1 - p_o)^{m-1} p_o^{N-m} = C_{N-1}^{m-1} (1 - p_o)^m p_o^{N-m}.$$

Получены следующие основные вероятностно-временные характеристики функционирования рассматриваемой КЛВС:

1. Среднее время задержки сообщения на АС

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

2. Вероятность потери сообщения на АС

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

где

$$U = g_o e^{-\lambda N \delta} + \sum_{m=1}^N (g_{om} e^{-\lambda (N \delta + m \Delta)} + g_{1m} e^{-\lambda (N \delta + (m-1) \Delta)}),$$

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

Здесь TL – среднее время обращения маркера по кольцу.

3. Коэффициент загрузки АС

$$\rho = 1 - p_o.$$

4. Среднее число сообщений, обслуженных за время обращения маркера по кольцу

$$ES = \sum_{m=1}^N m g_m.$$

5. Среднее время обращения маркера по кольцу

$$TL = N \delta + \Delta ES.$$

6. Пропускная способность КЛВС

$$PRS = N \lambda.$$

7. Вероятность того, что все АС свободны

$$P_o = p_o^N.$$

8. Вероятность того, что все АС заняты

$$PZ = p_1^N.$$

9. Среднее время передачи маркера между соседними АС

$$TM = p_o \delta + p_1 (\delta + \Delta).$$

Заключение. В результате проведенных исследований разработана математическая модель симметричной кольцевой локальной сети с протоколом маркерного доступа, на каждой станции которой имеется односторонний буфер. Обслуживание сообщений происходит по ординарной дисциплине. Предложенная модель основана на описании процесса функционирования симметричной маркерной кольцевой ЛВС при помощи систем $M|G|1|1$. Показано, что ста-

ционные вероятности состояний рассматриваемой сети определяются из уравнений, которые зависят от числа АС в КЛВС и исходных параметров сети, а также ординарной дисциплины обслуживания сообщений. На основе анализа периодов занятости получены формулы для вычисления основных характеристик функционирования сети. Разработаны программы и проведены расчеты, позволяющие построить графики зависимости средних времен задержки сообщений на АС и их вероятностей потери от интенсивностей поступления сообщений. Локальные сети такого типа [9, с. 109], [10, с. 131] очень широко используются в настоящее время и проблемы их оптимизации, эффективности работы являются актуальными.

Литература

1. Takagi, H. Analysis of polling systems / H. Takagi. – Cambridge, M.A. : MIT Press, 1986. – 198 p.
2. Бакс, В. Кольцевые локальные сети с маркерным доступом и их производительность / В. Бакс // ТИИЭР. – 1989. – № 2. – С. 121–142.
3. Token-passing ring access method and physical layer specification : ANSI/IEEE 802.5 Standard-1985. – Superseding 802.5-1985 ; ANSI approved 25.01.1990 ; published 29.12.1989. – Cambridge : IEEE Press, 1985. – 89 p.
4. Бураковский, В. В. Локальные вычислительные сети: курс лекций / В. В. Бураковский, В. О. Родченко. – Гомель : УО «ГГУ им. Ф.Скорины», 2008. – 78 с.
5. Бураковский, В. В. Маркерная кольцевая локальная сеть с конечными буферами и ординарным обслуживанием сообщений / В. В. Бураковский // Сборник научных трудов. – 1998. – Вып. 1 : Аэрокосмическое приборостроение России. Сер. 2, Авионика. – С. 63–67.
6. Бураковский, В. В. Имитационная модель КЛВС с бесконечными буферами и вентильным обслуживанием / В. В. Бураковский // Materiály IX mezinárodní vědecko-praktická conference «Efektivní nástroje moderních věd–2013», Praha, 27 dubna – 05 květn 2013 roku. – Praha : Publishing House «Education and Science» s.r.o., 2013. – Díl 40 : Matematika. – P. 19–22.
7. Бураковский, В. В. Кольцевая локальная сеть с протоколом маркерного доступа / В. В. Бураковский, Г. А. Медведев // Техника средств связи. Сер. Системы связи. – 1990. – Вып. 7. – С. 9–16.
8. Бураковский, В. В. Симметричная маркерная кольцевая локальная сеть со случайным выбором дисциплины обслуживания / В. В. Бураковский // Проблемы физики, математики и техники. – 2016. – № 2 (27). – С. 39–41.
9. Бураковский, В. В. Маркерная кольцевая локальная сеть со случайным выбором дисциплины обслуживания с сокращением / В. В. Бураковский // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2017. – № 3 (102). – С. 109–113.
10. Бураковский, В. В. Симметричная маркерная кольцевая локальная сеть с конечными буферами и дисциплиной Бернулли обслуживания сообщений / В. В. Бураковский // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2020. – № 3 (120). – С. 131–134.

Идемпотенты в полиадических группах специального вида

А.М. ГАЛЬМАК¹, Ю.И. КУЛАЖЕНКО², М.В. СЕЛЬКИН³

В статье изучаются идемпотенты в полиадических группах специального вида, то есть в полиадических группах с l -арной операцией $\eta_{s, \sigma, k}$, которая называется полиадической операцией специального вида и определяется на декартовой степени A^k n -арной группы $\langle A, \eta \rangle$ с помощью подстановки $\sigma \in \mathbf{S}_k$, удовлетворяющей условию $\sigma^l = \sigma$, и n -арной операции η .

Ключевые слова: полиадическая операция, n -арная группа, идемпотент, подстановка.

The article focuses on idempotents in polyadic groups of a special form, i.e. in polyadic groups with l -ary operation $\eta_{s, \sigma, k}$, that is called polyadic operation of a special form and is defined on Cartesian power A^k of n -ary group $\langle A, \eta \rangle$ by substitution $\sigma \in \mathbf{S}_k$, satisfying the condition $\sigma^l = \sigma$, and n -ary operation η .

Keywords: polyadic operation, n -ary group, idempotent, substitution.

Введение. В данной статье изучаются идемпотенты в полиадических группах специального вида, то есть в полиадических группах вида $\langle A^k, \eta_{s, \sigma, k} \rangle$ с l -арной операцией $\eta_{s, \sigma, k}$, которая называется полиадической операцией специального вида и определяется на декартовой степени A^k n -арной группы $\langle A, \eta \rangle$ с помощью подстановки $\sigma \in \mathbf{S}_k$, удовлетворяющей условию $\sigma^l = \sigma$, и n -арной операции η . Равенство $\sigma^l = \sigma$ обеспечивает перенос ассоциативности с n -арной операции η на l -арную операцию $\eta_{s, \sigma, k}$. Первоначально операция $\eta_{s, \sigma, k}$ была определена в [1] на декартовой степени n -арного группоида без каких-либо ограничений на подстановку σ .

Изучавшаяся ранее [2] l -арная операция $[\]_{l, \sigma, k}$ также относится к полиадическим операциям специального вида, так как является частным случаем l -арной операции $\eta_{s, \sigma, k}$ при $l = s + 1$, в этом случае $n = 2$. Полиадическими операциями специального вида, соответствующими циклу $\sigma = (12 \dots k)$, являются и две полиадические операции Э. Поста [3], так как они совпадают с операцией $[\]_{l, (12 \dots k), k}$, которая в одном случае определяется на декартовой степени симметрической группы, а во втором – на декартовой степени полной линейной группы над полем комплексных чисел.

Определения и основные свойства n -арной группы, а также более подробную информацию о нейтральных и обратных последовательностях можно найти в [3], [4].

Множество всех идемпотентов полиадического группоида $\langle A, \eta \rangle$ будем обозначать символом $\mathbf{I}(A, \eta)$.

1. Предварительные сведения. Как показывает следующая теорема, равенство $\sigma^l = \sigma$ обеспечивает перенос свойства быть «полиадической группой» с n -арной группы $\langle A, \eta \rangle$ на l -арный группоид $\langle A^k, \eta_{s, \sigma, k} \rangle$.

Теорема 1.1 [5]. *Если $\langle A, \eta \rangle$ – n -арная группа, подстановка σ удовлетворяет условию $\sigma^l = \sigma$, то $\langle A^k, \eta_{s, \sigma, k} \rangle$ – l -арная группа.*

Согласно Э. Посту [3], последовательность $e_1 \dots e_{k(n-1)}$, где $k \geq 1$, элементов n -арной группы $\langle A, \eta \rangle$ называют её *нейтральной последовательностью*, если

$$\eta(e_1 \dots e_{k(n-1)}x) = x, \eta(xe_1 \dots e_{k(n-1)}) = x$$

для любого $x \in A$.

Нейтральные последовательности существуют в любой n -арной группе, но определяются они неоднозначно.

Предложение 1.1. *Если $\langle A, \eta \rangle$ – n -арная группа, $k \geq 1$, $e_1, \dots, e_{k(n-1)} \in A$, то следующие утверждения эквивалентны:*

- 1) последовательность $e_1 \dots e_{k(n-1)}$ – нейтральная;
- 2) существует элемент $a \in A$ такой, что $\eta(e_1 \dots e_{k(n-1)}a) = a$;
- 3) существует элемент $a \in A$ такой, что $\eta(ae_1 \dots e_{k(n-1)}) = a$.

В справедливости следующей леммы можно убедиться простой проверкой.

Лемма 1.1. Если $\langle A, \eta \rangle$ – n -арная группа, подстановка $\sigma \in \mathbf{S}_k$ удовлетворяет условию $\sigma^l = \sigma$, то элемент $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_k)$ является идемпотентом в l -арной группе $\langle A^k, \eta_{s, \sigma, k} \rangle$ тогда и только тогда, когда компоненты $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_k$ удовлетворяют условиям

$$\eta(\varepsilon_1 \varepsilon_{\sigma(1)} \varepsilon_{\sigma^2(1)} \dots \varepsilon_{\sigma^{l-2}(1)} \varepsilon_1) = \varepsilon_1, \dots, \eta(\varepsilon_k \varepsilon_{\sigma(k)} \varepsilon_{\sigma^2(k)} \dots \varepsilon_{\sigma^{l-2}(k)} \varepsilon_k) = \varepsilon_k.$$

Следующая лемма доказана в [6].

Лемма 1.2 [6]. Пусть $l \geq 2, k \geq 2, \sigma$ – цикл из \mathbf{S}_k длины $k, \sigma^l = \sigma, a_1, \dots, a_k$ – элементы n -арной группы $\langle A, \eta \rangle$. Если равенство $\eta(a_j a_{\sigma(j)} a_{\sigma^2(j)} \dots a_{\sigma^{l-2}(j)} a_j) = a_j$ верно для некоторого $j \in \{1, \dots, k\}$, то оно верно для любого $j \in \{1, \dots, k\}$.

Следующий результат был получен в [6] как следствие основного результата.

Лемма 1.3 [6]. Пусть $\langle A, \eta \rangle$ – n -арная группа, $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_k) \in A^k, \sigma$ – цикл длины k из $\mathbf{S}_k, l-1 = tk$ для некоторого $t \geq 1$. Тогда:

1) если элемент ε является идемпотентом в l -арной группе $\langle A^k, \eta_{s, \sigma, k} \rangle$, то

$$\underbrace{\eta(\varepsilon_j \varepsilon_{\sigma(j)} \varepsilon_{\sigma^2(j)} \dots \varepsilon_{\sigma^{k-1}(j)} \dots \varepsilon_j \varepsilon_{\sigma(j)} \varepsilon_{\sigma^2(j)} \dots \varepsilon_{\sigma^{k-1}(j)} \varepsilon_j)}_t = \varepsilon_j \quad (1.1)$$

для любого $j \in \{1, \dots, k\}$;

2) если для некоторого $j \in \{1, \dots, k\}$ верно (1.1), то элемент ε является идемпотентом в l -арной группе $\langle A^k, \eta_{s, \sigma, k} \rangle$.

2. Основной результат. Начнём с примера, который мы затем обобщим.

Пример 2.1. Пусть $A = \{e, a\}$ – группа второго порядка с единицей $e, \langle A, \eta \rangle$ – тернарная группа с тернарной операцией η , производной от групповой операции: $\eta(xyz) = xyz$. Ясно, что $\eta(eee) = e, \eta(aaa) = a$.

Так как цикл $\sigma = (12)$ удовлетворяет условию $(12)^3 = (12)$, то по теореме 1.1 $\langle A^2, \eta_{1, (12), 2} \rangle$ – тернарная группа, где $A^2 = \{(e, e), (e, a), (a, e), (a, a)\}$. А так как

$$\eta_{1, (12), 2}((e, e)(e, e)(e, e)) = (\eta(eee), \eta(eee)) = (e, e),$$

$$\eta_{1, (12), 2}((a, a)(a, a)(a, a)) = (\eta(aaa), \eta(aaa)) = (a, a),$$

$$\eta_{1, (12), 2}((e, a)(e, a)(e, a)) = (\eta(eae), \eta(aea)) = (a, e) \neq (e, a),$$

$$\eta_{1, (12), 2}((a, e)(a, e)(a, e)) = (\eta(aea), \eta(eae)) = (e, a) \neq (a, e),$$

то множество всех идемпотентов тернарной группы $\langle A^2, \eta_{1, (12), 2} \rangle$ четвёртого порядка совпадает с двухэлементным множеством $\{(e, e), (a, a)\}$:

$$\mathbf{I}(A^2, \eta_{1, (12), 2}) = \{(e, e), (a, a)\}.$$

Замечание 2.1. Если длина последовательности α элементов полиадической группы $\langle B, \mu \rangle$ арности m равна $s(m-1) - 1$ для некоторого $s \geq 1$, то любая обратная последовательность для последовательности α отождествляется с единственным элементом α^{-1} , который называется *обратным* для α , и является решением уравнения $\mu(x\alpha b) = b$, где b может быть любым элементом из B .

Предложение 2.1. Пусть $\langle A, \eta \rangle$ – n -арная группа, подстановка $\sigma \in \mathbf{S}_{l-1}$ удовлетворяет условию $\sigma^l = \sigma$, существует $j \in \{1, \dots, l-1\}$, для которого

$$j \notin \{\sigma(j), \sigma^2(j), \dots, \sigma^{l-2}(j)\}.$$

Тогда

$$\mathbf{I}(A^{l-1}, \eta_{s, \sigma, l-1}) \subseteq \{(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{l-1}) \mid \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{j-1}, \varepsilon_{j+1}, \dots, \varepsilon_{l-1} \in A, \varepsilon_j = (\varepsilon_{\sigma(j)} \varepsilon_{\sigma^2(j)} \dots \varepsilon_{\sigma^{l-2}(j)})^{-1}\}.$$

Если множество A конечно ($|A| = r$), то $|\mathbf{I}(A^{l-1}, \eta_{s, \sigma, l-1})| \leq r^{l-2}$.

Доказательство. Так как $j \notin \{\sigma(j), \sigma^2(j), \dots, \sigma^{l-2}(j)\}$, то множество

$$\{\sigma(j), \sigma^2(j), \dots, \sigma^{l-2}(j)\}$$

является подмножеством множества $\{1, \dots, j-1, j+1, \dots, l-1\}$. Поэтому правая часть в доказываемом включении определена корректно.

Для сокращения записей обозначим правую часть в доказываемом включении символом Σ .

Если $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{l-1}) \in \mathbf{I}(A^{l-1}, \eta_{s, \sigma, l-1})$, то по лемме 1.1

$$\eta(\varepsilon_j \varepsilon_{\sigma(j)} \varepsilon_{\sigma^2(j)} \dots \varepsilon_{\sigma^{l-2}(j)} \varepsilon_j) = \varepsilon_j, \quad (2.1)$$

откуда следует

$$\varepsilon_j = (\varepsilon_{\sigma(j)} \varepsilon_{\sigma^2(j)} \dots \varepsilon_{\sigma^{l-2}(j)})^{-1}. \quad (2.2)$$

Следовательно, $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{l-1}) \in \Sigma$, и доказано включение

$$\mathbf{I}(A^{l-1}, \eta_{s, \sigma, l-1}) \subseteq \Sigma, \quad (2.3)$$

то есть доказываемое включение верно.

Если $|A| = r$, то число элементов в правой части доказанного включения равно r^{l-2} . Поэтому из этого включения следует неравенство из условия предложения. Предложение доказано.

Теорема 2.1. Пусть $\langle A, \eta \rangle$ – n -арная группа, σ – цикл из \mathbf{S}_{l-1} длины $l-1$, $j \in \{1, \dots, l-1\}$. Тогда

$$\mathbf{I}(A^{l-1}, \eta_{s, \sigma, l-1}) = \{(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{l-1}) \mid \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{j-1}, \varepsilon_{j+1}, \dots, \varepsilon_{l-1} \in A, \varepsilon_j = (\varepsilon_{\sigma(j)} \varepsilon_{\sigma^2(j)} \dots \varepsilon_{\sigma^{l-2}(j)})^{-1}\}.$$

Если $|A| = r$, то $|\mathbf{I}(A^{l-1}, \eta_{s, \sigma, l-1})| = r^{l-2}$.

Доказательство. Так как σ – цикл из \mathbf{S}_{l-1} длины $l-1$, то $\sigma^l = \sigma$. Кроме того, множество

$$\{\sigma(j), \sigma^2(j), \dots, \sigma^{l-2}(j)\}$$

совпадает с множеством $\{1, \dots, j-1, j+1, \dots, l-1\}$. Поэтому

$$j \notin \{\sigma(j), \sigma^2(j), \dots, \sigma^{l-2}(j)\}.$$

Тогда согласно предложению 2.1, верно включение (2.3), где Σ – то же, что и в доказательстве предложения 2.1.

Если теперь $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{l-1}) \in \Sigma$, то из условия (2.2) следует равенство (2.1). Тогда, полагая в утверждении 2) леммы 1.3 $k = l-1$ (в этом случае $t = 1$), получим

$$\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{l-1}) \in \mathbf{I}(A^{l-1}, \eta_{s, \sigma, l-1}).$$

Тем самым доказано включение

$$\Sigma \subseteq \mathbf{I}(A^{l-1}, \eta_{s, \sigma, l-1}). \quad (2.4)$$

Из включений (2.3) и (2.4) следует $\mathbf{I}(A^{l-1}, \eta_{s, \sigma, l-1}) = \Sigma$, то есть первое доказываемое равенство верно.

Второе доказываемое равенство является следствием только что доказанного равенства и равенства $|\Sigma| = r^{l-2}$. Теорема доказана.

Полагая в теореме 2.1 $\sigma = (12 \dots l-1)$, получим

Следствие 2.1. Если $\langle A, \eta \rangle$ – n -арная группа, $j \in \{1, \dots, l-1\}$, то

$$\mathbf{I}(A^{l-1}, \eta_{s, (12 \dots l-1), l-1}) = \{(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{l-1}) \mid \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{j-1}, \varepsilon_{j+1}, \dots, \varepsilon_{l-1} \in A, \varepsilon_j = (\varepsilon_{j+1} \dots \varepsilon_{l-1} \varepsilon_1 \dots \varepsilon_{j-1})^{-1}\}.$$

Если $|A| = r$, то $|\mathbf{I}(A^{l-1}, \eta_{s, (12 \dots l-1), l-1})| = r^{l-2}$.

Полагая в теореме 2.1 и в следствии 2.1 $j = 1$ и $j = l-1$, получим ещё два следствия.

Следствие 2.2. Пусть $\langle A, \eta \rangle$ – n -арная группа, σ – цикл из \mathbf{S}_{l-1} длины $l-1$. Тогда

$$\begin{aligned} \mathbf{I}(A^{l-1}, \eta_{s, \sigma, l-1}) &= \{(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{l-1}) \mid \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{l-1} \in A, \varepsilon_1 = (\varepsilon_{\sigma(1)} \varepsilon_{\sigma^2(1)} \dots \varepsilon_{\sigma^{l-2}(1)})^{-1}\} = \\ &= \{(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{l-2}, \varepsilon_{l-1}) \mid \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{l-2} \in A, \varepsilon_{l-1} = (\varepsilon_{\sigma(l-1)} \varepsilon_{\sigma^2(l-1)} \dots \varepsilon_{\sigma^{l-2}(l-1)})^{-1}\}. \end{aligned}$$

Если $|A| = r$, то $|\mathbf{I}(A^{l-1}, \eta_{s, \sigma, l-1})| = r^{l-2}$.

Следствие 2.3. Если $\langle A, \eta \rangle$ – n -арная группа, то

$$\begin{aligned} \mathbf{I}(A^{l-1}, \eta_{s, (12 \dots l-1), l-1}) &= \{(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{l-1}) \mid \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{l-1} \in A, \varepsilon_1 = (\varepsilon_2 \varepsilon_3 \dots \varepsilon_{l-1})^{-1}\} = \\ &= \{(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{l-2}, \varepsilon_{l-1}) \mid \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{l-2} \in A, \varepsilon_{l-1} = (\varepsilon_1 \varepsilon_2 \dots \varepsilon_{l-2})^{-1}\}. \end{aligned}$$

Если $|A| = r$, то $|\mathbf{I}(A^{l-1}, \eta_{s, (12 \dots l-1), l-1})| = r^{l-2}$.

Так как для любого элемента a тернарной группы $\langle A, \eta \rangle$ обратный элемент a^{-1} совпадает с косым элементом \bar{a} , то полагая в следствиях 2.2 и 2.3 $l = n = 3$, получим

Следствие 2.4. Если $\langle A, \eta \rangle$ – тернарная группа, то

$$\mathbf{I}(A^2, \eta_{1, (12), 2}) = \{(\bar{a}, a) \mid a \in A\} = \{(a, \bar{a}) \mid a \in A\}.$$

Если $|A| = r$, то $|A^2, \eta_{1, (12), 2}| = r$.

Теперь понятно, что пример 2.1 может быть извлечён из следствия 2.4, если в нём считать тернарную группу $\langle A, \eta \rangle$ производной от группы второго порядка.

Теорема 2.2. Пусть $\langle A, \eta \rangle$ – n -арная группа ($n \geq 3$), σ – цикл из S_{n-1} длины $n-1$, $j \in \{1, \dots, n-1\}$. Тогда

$$\{(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{n-1}) \mid \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{j-1}, \varepsilon_{j+1}, \dots, \varepsilon_{n-1} \in A, \varepsilon_j = (\varepsilon_{\sigma(j)} \varepsilon_{\sigma^2(j)} \dots \varepsilon_{\sigma^{n-2}(j)})^{-1}\} \subseteq \mathbf{I}(A^{n-1}, \eta_{s, \sigma, n-1}).$$

Если $|A| = r$, то $r^{n-2} \leq |\mathbf{I}(A^{n-1}, \eta_{s, \sigma, n-1})|$.

Доказательство. Так как $\sigma^{s(n-1)+1} = \sigma$, то по теореме 1.1 $\langle A^{n-1}, \eta_{s, \sigma, n-1} \rangle$ – l -арная группа. Для сокращения записей обозначим левую часть в доказываемом включении через Σ .

Если $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{n-1}) \in \Sigma$, то из условия $\varepsilon_j = (\varepsilon_{\sigma(j)} \varepsilon_{\sigma^2(j)} \dots \varepsilon_{\sigma^{n-2}(j)})^{-1}$ следует

$$\eta(\varepsilon_j \varepsilon_{\sigma(j)} \varepsilon_{\sigma^2(j)} \dots \varepsilon_{\sigma^{n-2}(j)} \varepsilon_j) = \varepsilon_j,$$

что означает нейтральность последовательности $\varepsilon_j \varepsilon_{\sigma(j)} \varepsilon_{\sigma^2(j)} \dots \varepsilon_{\sigma^{n-2}(j)}$, откуда следует нейтральность последовательности

$$\underbrace{\varepsilon_j \varepsilon_{\sigma(j)} \varepsilon_{\sigma^2(j)} \dots \varepsilon_{\sigma^{n-2}(j)} \dots \varepsilon_j \varepsilon_{\sigma(j)} \varepsilon_{\sigma^2(j)} \dots \varepsilon_{\sigma^{n-2}(j)}}_s.$$

Следовательно,

$$\eta(\underbrace{\varepsilon_j \varepsilon_{\sigma(j)} \varepsilon_{\sigma^2(j)} \dots \varepsilon_{\sigma^{n-2}(j)} \dots \varepsilon_j \varepsilon_{\sigma(j)} \varepsilon_{\sigma^2(j)} \dots \varepsilon_{\sigma^{n-2}(j)}}_s \varepsilon_j) = \varepsilon_j.$$

Тогда, полагая в утверждении 2) леммы 1.3 $k = n-1$, $s = t$, получим

$$\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{n-1}) \in \mathbf{I}(A^{n-1}, \eta_{s, \sigma, n-1}).$$

Тем самым доказано требуемое включение $\Sigma \subseteq \mathbf{I}(A^{n-1}, \eta_{s, \sigma, n-1})$.

Если $|A| = r$, то число элементов в левой части доказанного включения равно r^{n-2} . Поэтому из этого включения следует неравенство из условия теоремы. Теорема доказана.

Полагая в теореме 2.2 $\sigma = (12 \dots n-1)$, получим

Следствие 2.5. Если $\langle A, \eta \rangle$ – n -арная группа ($n \geq 3$), $j \in \{1, \dots, n-1\}$, то

$$\{(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{n-1}) \mid \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{j-1}, \varepsilon_{j+1}, \dots, \varepsilon_{n-1} \in A, \varepsilon_j = (\varepsilon_{j+1} \dots \varepsilon_{n-1} \varepsilon_1 \dots \varepsilon_{j-1})^{-1}\} \subseteq \mathbf{I}(A^{n-1}, \eta_{s, (12 \dots n-1), n-1}).$$

Если $|A| = r$, то $r^{n-2} \leq |\mathbf{I}(A^{n-1}, \eta_{s, (12 \dots n-1), n-1})|$.

Полагая в следствии 2.5 $j = 1$ и $j = n-1$, получим

Следствие 2.6. Если $\langle A, \eta \rangle$ – n -арная группа ($n \geq 3$), то

$$\begin{aligned} & \{(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{n-1}) \mid \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{n-1} \in A, \varepsilon_1 = (\varepsilon_2 \varepsilon_3 \dots \varepsilon_{n-1})^{-1}\} = \\ & = \{(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{n-2}, \varepsilon_{n-1}) \mid \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{n-2} \in A, \varepsilon_{n-1} = (\varepsilon_1 \varepsilon_2 \dots \varepsilon_{n-2})^{-1}\} \subseteq \mathbf{I}(A^{n-1}, \eta_{s, (12 \dots n-1), n-1}). \end{aligned}$$

Если $|A| = r$, то $r^{n-2} \leq |\mathbf{I}(A^{n-1}, \eta_{s, (12 \dots n-1), n-1})|$.

Полагая в следствии 2.6 $n = 3$, получим

Следствие 2.7. Если $\langle A, \eta \rangle$ – тернарная группа, то

$$\{(\bar{a}, a) \mid a \in A\} = \{(a, \bar{a}) \mid a \in A\} \subseteq \mathbf{I}(A^2, \eta_{s, (12), 2}).$$

Если $|A| = r$, то $r \leq |\mathbf{I}(A^2, \eta_{s, (12), 2})|$.

Замечание 2.2. Подчеркнём, что, все обратные элементы, о которых говорилось выше, начиная с обратного элемента $(\varepsilon_{\sigma(j)} \varepsilon_{\sigma^2(j)} \dots \varepsilon_{\sigma^{l-2}(j)})^{-1}$ из предложения 2.1, определяются с помощью n -арной операции η , то есть в n -арной группе $\langle A, \eta \rangle$. Это следует иметь ввиду и далее.

Пример 2.1 показывает, что включение из теоремы 2.2 может быть равенством, то есть множество всех идемпотентов l -арной группы $\langle A^{n-1}, \eta_{s, \sigma, n-1} \rangle$ может совпадать с левой частью этого включения.

3.Случай $(2s+1)$ -арной группы $\langle A^k, \eta_{s, \tau, k} \rangle$ порядка 2^k . Покажем, что включение из теоремы 2.2 может быть строгим, то есть множество всех идемпотентов в l -арной группе $\langle A^{n-1}, \eta_{s, \sigma, n-1} \rangle$ может быть шире его левой части.

Пример 3.1. Пусть $\langle A, \eta \rangle$ – тернарная группа из примера 2.1, производная от группы $A = \{e, a\}$ с единицей e . Так как $\eta(eee) = e$, $\eta(aaa) = a$, то в тернарной группе $\langle A, \eta \rangle$ обрат-

ные элементы к элементам e и a совпадают с обратными к ним же в группе A и являются косыми к самим себе: $e = e^{-1} = \bar{e}$, $a = a^{-1} = \bar{a}$. А так как цикл $\sigma = (12)$ удовлетворяет условию $(12)^{2s+1} = (12)$, то по теореме 1.1 $\langle A^2, \eta_{s, (12), 2} \rangle - (2s+1)$ -арная группа для любого $s \geq 1$, где $A^2 = \{(e, e), (e, a), (a, e), (a, a)\}$.

Так как

$$\begin{aligned} \eta_{2, (12), 2}((e, e)(e, e)(e, e)(e, e)(e, e)) &= (\eta(eeeee), \eta(eeeee)) = (e, e), \\ \eta_{2, (12), 2}((a, a)(a, a)(a, a)(a, a)(a, a)) &= (\eta(aaaaa), \eta(aaaaa)) = (a, a), \\ \eta_{2, (12), 2}((e, a)(e, a)(e, a)(e, a)(e, a)) &= (\eta(eaeae), \eta(eaeae)) = (e, a), \\ \eta_{2, (12), 2}((a, e)(a, e)(a, e)(a, e)(a, e)) &= (\eta(aeae), \eta(eaeae)) = (a, e), \end{aligned}$$

то в 5-арной группе $\langle A^2, \eta_{2, (12), 2} \rangle$ все элементы являются идемпотентами, то есть $\langle A^2, \eta_{2, (12), 2} \rangle -$ идемпотентная 5-арная группа:

$$\mathbf{I}(A^2, \eta_{2, (12), 2}) = \{(e, e), (a, a), (e, a), (a, e)\} = A^2.$$

При этом левая часть включения из теоремы 2.2 в данном случае имеет вид $\{(e, e), (a, a)\}$. Таким образом, указанное включение является строгим.

Теорема 3.1. Пусть $\langle A, \eta \rangle -$ тернарная группа, производная от группы $A = \{e, a\}$ с единицей e , $\tau = (\alpha \beta) -$ транспозиция из \mathbf{S}_k . Тогда:

1) для любого $s \geq 1$ и любых $a_1, \dots, a_{\alpha-1}, a_{\alpha+1}, \dots, a_{\beta-1}, a_{\beta+1}, \dots, a_k \in A$ элементы

$$\mathbf{u} = (a_1, \dots, a_{\alpha-1}, e, a_{\alpha+1}, \dots, a_{\beta-1}, e, a_{\beta+1}, \dots, a_k), \quad (3.1)$$

$$\mathbf{v} = (a_1, \dots, a_{\alpha-1}, a, a_{\alpha+1}, \dots, a_{\beta-1}, a, a_{\beta+1}, \dots, a_k) \quad (3.2)$$

являются идемпотентами в $(2s+1)$ -арной группе $\langle A^k, \eta_{s, \tau, k} \rangle$;

2) если $s = 2r - 1$, то множество $\mathbf{I}(A^k, \eta_{2r-1, \tau, k})$ всех идемпотентов $(2s+1)$ -арной группы $\langle A^k, \eta_{2r-1, \tau, k} \rangle$ исчерпывается элементами \mathbf{u} и \mathbf{v} из 1), то есть

$$\mathbf{I}(A^k, \eta_{2r-1, \tau, k}) = \{\mathbf{u}, \mathbf{v} \mid a_1, \dots, a_{\alpha-1}, a_{\alpha+1}, \dots, a_{\beta-1}, a_{\beta+1}, \dots, a_k \in A\},$$

при этом $|\mathbf{I}(A^k, \eta_{2r-1, \tau, k})| = 2^{k-1}$;

3) если $s = 2r$, то $\mathbf{I}(A^k, \eta_{2r, \tau, k}) = A^k$, $|\mathbf{I}(A^k, \eta_{2r, \tau, k})| = 2^k$.

Доказательство. 1) Так как подстановка τ удовлетворяет условию $\tau^{2s+1} = \tau$, то по теореме 1.1 $\langle A^k, \eta_{s, \tau, k} \rangle - (2s+1)$ -арная группа для любого $s \geq 1$.

Считая $a_\alpha = e$, $a_\beta = e$, будем иметь

$$\mathbf{u} = (a_1, \dots, a_{\alpha-1}, a_\alpha = e, a_{\alpha+1}, \dots, a_{\beta-1}, a_\beta = e, a_{\beta+1}, \dots, a_k).$$

Кроме того, положим

$$\eta_{s, \tau, k}(\underbrace{\mathbf{u} \dots \mathbf{u}}_{2s+1}) = (u_1, \dots, u_k).$$

Тогда для символов j , которые подстановка τ оставляет неподвижными, то есть для символов, отличных от α и β , имеем

$$u_j = \eta(a_j a_{\tau(j)} \dots a_{\tau^{2s-1}(j)} a_{\tau^{2s}(j)}) = a_j a_{\tau(j)} \dots a_{\tau^{2s-1}(j)} a_{\tau^{2s}(j)} = a_j^{2s+1} = a_j.$$

Кроме того,

$$u_\alpha = \eta(a_\alpha a_{\tau(\alpha)} \dots a_{\tau^{2s-1}(\alpha)} a_{\tau^{2s}(\alpha)}) = e^{2s+1} = e,$$

$$u_\beta = \eta(a_\beta a_{\tau(\beta)} \dots a_{\tau^{2s-1}(\beta)} a_{\tau^{2s}(\beta)}) = e^{2s+1} = e.$$

Таким образом,

$$\eta_{s, \tau, k}(\underbrace{\mathbf{u} \dots \mathbf{u}}_{2s+1}) = \mathbf{u}.$$

Это означает, что элементы вида (3.1) являются идемпотентами в $\langle A^k, \eta_{s, \tau, k} \rangle -$ для любого $s \geq 1$.

Аналогично, считая $a_\alpha = a$, $a_\beta = a$, будем иметь

$$\mathbf{v} = (a_1, \dots, a_{\alpha-1}, a_\alpha = a, a_{\alpha+1}, \dots, a_{\beta-1}, a_\beta = a, a_{\beta+1}, \dots, a_k).$$

Тогда, полагая

$$\eta_{s, \tau, k}(\underbrace{\mathbf{v} \dots \mathbf{v}}_{2s+1}) = (v_1, \dots, v_k),$$

получим

$$v_j = \eta(a_j a_{\tau(j)} \dots a_{\tau^{2s-1}(j)} a_{\tau^{2s}(j)}) = a_j a_{\tau(j)} \dots a_{\tau^{2s-1}(j)} a_{\tau^{2s}(j)} = a_j^{2s+1} = a_j$$

для символов j , которые подстановка τ оставляет неподвижными. Кроме того,

$$v_\alpha = \eta(a_\alpha a_{\tau(\alpha)} \dots a_{\tau^{2s-1}(\alpha)} a_{\tau^{2s}(\alpha)}) = a_\alpha^{2s+1} = a_\alpha,$$

$$v_\beta = \eta(a_\beta a_{\tau(\beta)} \dots a_{\tau^{2s-1}(\beta)} a_{\tau^{2s}(\beta)}) = a_\beta^{2s+1} = a_\beta.$$

Таким образом,

$$\eta_{s, \tau, k}(\underbrace{\mathbf{v} \dots \mathbf{v}}_{2s+1}) = \mathbf{v}.$$

Это означает, что элементы вида (3.2) также являются идемпотентами в $\langle A^k, \eta_{s, \tau, k} \rangle$ для любого $s \geq 1$.

2) Покажем теперь, что любой идемпотент в $\langle A^k, \eta_{2r-1, \tau, k} \rangle$ совпадает либо с (3.1), либо с (3.2). Для этого предположим, что для любых $a_1, \dots, a_k \in A$ элемент

$$\mathbf{w} = (a_1, \dots, a_{\alpha-1}, a_\alpha, a_{\alpha+1}, \dots, a_{\beta-1}, a_\beta, a_{\beta+1}, \dots, a_k) \quad (3.3)$$

является идемпотентом в $\langle A^k, \eta_{2r-1, \tau, k} \rangle$ и положим

$$\eta_{s, \tau, k}(\underbrace{\mathbf{w} \dots \mathbf{w}}_{2s+1}) = (w_1, \dots, w_k),$$

где $s = 2r - 1$. Тогда

$$w_j = \eta(a_j a_{\tau(j)} \dots a_{\tau^{2s-1}(j)} a_{\tau^{2s}(j)}) = a_j a_{\tau(j)} \dots a_{\tau^{2s-1}(j)} a_{\tau^{2s}(j)}$$

для любого $j \in \{1, \dots, k\}$. Так как подстановка τ оставляет неподвижными символы, отличные от α и β , то из полученного равенства вытекает

$$w_j = a_j^{2s+1} = a_j, j \neq \alpha, j \neq \beta. \quad (3.4)$$

Кроме того, учитывая равенство $s = 2r - 1$, получим

$$\begin{aligned} w_\alpha &= a_\alpha a_{\tau(\alpha)} a_{\tau^2(\alpha)} a_{\tau^3(\alpha)} \dots a_{\tau^{4r-4}(j)} a_{\tau^{4r-3}(j)} a_{\tau^{4r-2}(j)} = \\ &= \underbrace{a_\alpha a_\beta \dots a_\alpha a_\beta}_{2(r-1)} a_\alpha a_\beta a_\alpha = a_\alpha a_\beta a_\alpha = a_\beta, \\ w_\beta &= a_\beta a_{\tau(\beta)} a_{\tau^2(\beta)} a_{\tau^3(\beta)} \dots a_{\tau^{4r-4}(\beta)} a_{\tau^{4r-3}(\beta)} a_{\tau^{4r-2}(\beta)} = \\ &= \underbrace{a_\beta a_\alpha \dots a_\beta a_\alpha}_{2(r-1)} a_\beta a_\alpha a_\beta = a_\beta a_\alpha a_\beta = a_\alpha, \end{aligned}$$

то есть

$$w_\alpha = a_\beta, w_\beta = a_\alpha. \quad (3.5)$$

Из (3.4) и (3.5) следует

$$\eta_{s, \tau, k}(\underbrace{\mathbf{w} \dots \mathbf{w}}_{2s+1}) = (a_1, \dots, a_{\alpha-1}, a_\beta, a_{\alpha+1}, \dots, a_{\beta-1}, a_\alpha, a_{\beta+1}, \dots, a_k).$$

А так как по предположению

$$\eta_{s, \tau, k}(\underbrace{\mathbf{w} \dots \mathbf{w}}_{2s+1}) = \mathbf{w},$$

то, учитывая (3.3), получим

$$\begin{aligned} &(a_1, \dots, a_{\alpha-1}, a_\alpha, a_{\alpha+1}, \dots, a_{\beta-1}, a_\beta, a_{\beta+1}, \dots, a_k) = \\ &= (a_1, \dots, a_{\alpha-1}, a_\beta, a_{\alpha+1}, \dots, a_{\beta-1}, a_\alpha, a_{\beta+1}, \dots, a_k), \end{aligned}$$

откуда следует $a_\alpha = a_\beta$.

Таким образом, если \mathbf{w} – идемпотент в $\langle A^k, \eta_{2r-1, \tau, k} \rangle$, то либо

$$\mathbf{w} = (a_1, \dots, a_{\alpha-1}, e, a_{\alpha+1}, \dots, a_{\beta-1}, e, a_{\beta+1}, \dots, a_k),$$

либо

$$\mathbf{w} = (a_1, \dots, a_{\alpha-1}, a, a_{\alpha+1}, \dots, a_{\beta-1}, a, a_{\beta+1}, \dots, a_k).$$

Ясно, что число элементов вида (3.1) равно 2^{k-2} , элементов вида (3.2) столько же. Поэтому $|\mathbf{I}(A^k, \eta_{2r-1, \tau, k})| = 2^{k-1}$.

3) Рассмотрим произвольный элемент \mathbf{w} из A^k , который запишем в виде (3.3) и положим

$$\eta_{2r, \tau, k}(\underbrace{\mathbf{w} \dots \mathbf{w}}_{4r+1}) = (w_1, \dots, w_k).$$

Тогда

$$w_j = \eta(a_j a_{\tau(j)} \dots a_{\tau^{4r-1}(j)} a_{\tau^{4r}(j)}) = a_j a_{\tau(j)} \dots a_{\tau^{4r-1}(j)} a_{\tau^{4r}(j)}$$

для любого $j \in \{1, \dots, k\}$. Так как подстановка τ оставляет неподвижными символы, отличные от α и β , то из полученного равенства вытекает

$$w_j = a_j^{4r+1} = a_j, j \neq \alpha, j \neq \beta. \quad (3.6)$$

Кроме того,

$$w_\alpha = a_\alpha a_{\tau(\alpha)} \dots a_{\tau^{4r-1}(\alpha)} a_{\tau^{4r}(\alpha)} = \underbrace{a_\alpha a_\beta \dots a_\alpha a_\beta}_{2r} a_\alpha = a_\alpha,$$

$$w_\beta = a_\beta a_{\tau(\beta)} \dots a_{\tau^{4r-1}(\beta)} a_{\tau^{4r}(\beta)} = \underbrace{a_\beta a_\alpha \dots a_\beta a_\alpha}_{2r} a_\beta = a_\beta,$$

то есть

$$w_\alpha = a_\alpha, w_\beta = a_\beta. \quad (3.7)$$

Из (3.6) и (3.7) следует

$$\eta_{2r, \tau, k}(\underbrace{\mathbf{w} \dots \mathbf{w}}_{4r+1}) = \mathbf{w}.$$

Следовательно, \mathbf{w} – идемпотент в $\langle A^k, \eta_{2r, \tau, k} \rangle$. Теорема доказана.

Литература

1. Гальмак, А. М. О полиадических операциях на декартовых степенях / А. М. Гальмак, А. Д. Русаков // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2014. – № 3. – С. 35–40.
2. Гальмак, А. М. Многочестные операции на декартовых степенях / А. М. Гальмак. – Минск : Изд. центр БГУ, 2009. – 265 с.
3. Post, E. L. Polyadic groups / E. L. Post // Trans. Amer. Math. Soc. – 1940. – Vol. 48, № 2. – P. 208–350.
4. Русаков, С. А. Алгебраические n -арные системы / С. А. Русаков. – Минск : Навука і тэхніка, 1992. – 245 с.
5. Гальмак, А. М. О разрешимости уравнений в $\langle A^k, \eta_{s, \sigma, k} \rangle$ / А. М. Гальмак // Веснік МДУ ім. А.А. Куляшова. – 2018. – № 1 (51). – С. 4–10.
6. Гальмак, А. М. Идемпотенты в полиадических группоидах специального вида / А. М. Гальмак // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 2 (51). – С. 4–10.

¹Белорусский государственный университет
пищевых и химических технологий

²Белорусский государственный
университет транспорта

³Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 12.03.2022

Эффективная адаптация скорости машинного обучения на основе иерархического подхода к оптимизации

С.И. ЖОГАЛЬ, С.П. ЖОГАЛЬ, Н.А. АЛЁШИН, В.В. ОРЛОВ

Рассмотрен иерархический подход к адаптации скорости обучения в градиентных методах, называемый оптимизацией скорости обучения (ОСО). ОСО формулирует проблему адаптации скорости обучения как задачу иерархической оптимизации, которая минимизирует функцию потерь по отношению к скорости обучения для текущих параметров и градиентов модели. Затем ОСО оптимизирует скорость обучения на основе метода множителей переменного направления. В процессе этой оптимизации не требуется никакой информации второго порядка и вероятностной модели, поэтому он очень эффективен. Кроме того, ОСО не требует дополнительных гиперпараметров по сравнению с методом градиента с простым экспоненциальным спадом скорости обучения. Если сравнить эффективность оптимизации с современными методами адаптации скорости обучения, а также с наиболее часто используемыми методами адаптивного градиента, то ОСО превосходит другие методы в задачах классификации.

Ключевые слова: глубокое обучение, машинное обучение, математическая оптимизация.

A hierarchical approach to adapting the learning rate in gradient methods, called learning rate optimization (LRO), is considered. LRO formulates the learning rate adaptation problem as a hierarchical optimization problem that minimizes the loss function with respect to the learning rate for current model parameters and gradients. LRO then optimizes the learning rate based on the alternating direction multiplier method. In the process of this optimization it does not require any second order information and a probabilistic model, so it is very efficient. In addition, LRO does not require any additional hyperparameters compared to the gradient method with a simple exponential learning rate decay. If we compare the optimization efficiency with modern learning rate adaptation methods, as well as with the most commonly used SGD adaptive gradient methods, then LRO outperforms all competitors in classification tasks.

Keywords: deep learning, machine learning, mathematical optimization.

Введение. Градиентные методы широко используются для подбора параметров модели в интеллектуальном анализе данных и машинном обучении, благодаря их эффективности. В градиентных методах скорость обучения (или размер шага) является одним из наиболее важных параметров, определяющих общую производительность оптимизации. По этой причине методы адаптации скорости обучения широко изучались с различных точек зрения, таких как информация второго порядка, обучение с подкреплением и статистический тест [1]. Однако эти методы почти не используются на практике из-за сложной реализации, больших трудоемких вычислений.

Для эффективной и действенной адаптации скорости обучения был предложен новый иерархический подход к адаптации скорости обучения, называемый оптимизацией скорости обучения (ОСО). ОСО формулирует проблему адаптации скорости обучения как проблему субоптимизации градиентных методов. В частности, скорость обучения оптимизирована для минимизации линеаризованной функции потерь для текущих параметров и градиентов модели. Затем оптимальная скорость обучения эффективно рассчитывается на основе метода множителей переменных направлений [2]. Поскольку ОСО напрямую оптимизирует скорость обучения, чтобы минимизировать функцию потерь без каких-либо эвристических предположений, мотивация и причина повышения производительности ОСО ясны и хорошо обоснованы.

ОСО не требует каких-либо архитектурных ограничений для моделей прогнозирования, а также трудоемкой информации второго порядка, вероятностных моделей и статистических тестов для адаптации скорости обучения. Следовательно, ОСО эффективен и прост в реализации, дополнительная временная сложность от применения ОСО в градиентных методах незначительна в задачах оптимизации большого масштаба, таких как обучение глубоких

нейронных сетей. Кроме того, ОСО имеет только два гиперпараметра: начальную верхнюю границу скорости обучения и коэффициент затухания, что равно количеству гиперпараметров метода ванильного градиента с экспоненциальным спадом скорости обучения. В ОСО нет дополнительных гиперпараметров, если сравнивать его с методом простого градиента [1].

Метод ОСО значительно улучшил сходимость и оптимизацию метода градиентного спуска. Кроме того, градиентные методы с ОСО значительно превзошли популярные и современные градиентные методы при обучении глубоких нейронных сетей.

Оптимизация скорости обучения. Цель метода ОСО – найти оптимальную скорость обучения для заданных в данный момент параметров модели и градиентов. Таким образом, ОСО является подмодулем градиентных методов для адаптации скорости онлайн-обучения. Вкратце, градиентные методы с ОСО оптимизируют параметры модели в три этапа:

1. Расчет градиентов для целевых и текущих параметров модели.
2. Поиск оптимальной скорости обучения для заданных параметров модели и градиентов.
3. Обновление параметров модели, используя градиенты и оптимизированную скорость обучения.

Цель ОСО – найти параметр η^* – оптимальную скорость обучения, который минимизирует функцию потерь для заданных текущих параметров модели и градиентов как:

$$\eta^* = \arg \min_{\eta} \{I(\theta - \eta v) + \Omega(\theta - \eta v)\}, \quad (1)$$

где I – функция потерь обучения, Ω – срок регуляризации θ – параметры модели, v – адаптивный градиент для обновления θ . Поскольку методы градиента обновляют параметры модели, перемещаясь в направлении, противоположном градиенту ($\theta \leftarrow \theta - \eta v$), функция потерь $I(\theta)$ и срок регуляризации $\Omega(\theta)$ можно переписать как $I(\theta - \eta v)$ и $\Omega(\theta - \eta v)$, соответственно.

Однако в реальных задачах непосредственно решать задачу оптимизации в уравнении (1) невозможно из-за сильной нелинейности I . Чтобы справиться с этой трудностью, сначала линеаризуется I вблизи θ в виде:

$$I(\theta - \eta v) \approx I(\theta) + (\nabla_{\theta} I)^T (\theta - \eta v - \theta) = I(\theta) - \eta g^T v, \quad (2)$$

где $g = \nabla_{\theta} I$ является истинным градиентом. Однако для линеаризации уравнения (2) η должен быть достаточно мал. Для этого ограничения мы вводим ограничение неравенства для верхней границы η [3]. Таким образом, задача оптимизации ОСО окончательно определяется следующим образом:

$$\eta^* = \arg \min_{0 \leq \eta \leq \varepsilon} \{I(\theta) - \eta g^T v + \Omega(\theta - \eta v)\}, \quad (3)$$

где ε – положительный гиперпараметр, определяющий верхнюю границу скорости обучения. Таким образом, ОСО адаптирует скорость обучения, решая задачу оптимизации с ограничениями в уравнении (3) для текущих параметров модели и градиентов.

Расширенный метод Лагранжа для задачи оптимизации скорости обучения. Расширенный метод Лагранжа – это широко используемый метод оптимизации для решения задачи оптимизации с ограничениями путем преобразования ее в задачу без ограничений [4]. Однако задача оптимизации расширенного метода Лагранжа должна быть определена при ограничениях равенствах. По этой причине необходимо преобразовать задачу оптимизации с ограничениями неравенствами в уравнении (3) к задаче с ограничениями – равенствами. Для этого введем переменную $s = [s_1, s_2]^T$, затем преобразуем проблему в проблему с ограниченными равенствами как:

$$\eta^* = \arg \min_{0 \leq \eta \leq \varepsilon} \{I(\theta) - \eta g^T v + \Omega(\theta - \eta v)\}, \quad (4)$$

$$\eta - s_1 = 0, \varepsilon - \eta - s_2 = 0, \quad s_1 \geq 0, s_2 \geq 0,$$

где s_1 и s_2 являются слабыми переменными с неотрицательным ограничением.

Наконец, расширенная функция Лагранжа для задачи определяется как:

$$L_{\lambda}(\eta, s, \lambda) = I(\theta) - \eta g^T v + \Omega(\theta - \eta v) - \\ - \lambda_1(\eta - s_1) - \lambda_2(\varepsilon + \eta - s_2) + \frac{\mu}{2}(\eta - s_1)^2 + \frac{\mu}{2}(\varepsilon - \eta - s_2)^2, \quad (5)$$

где $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2]^T$ является двойственной переменной для расширенной функции Лагранжа и $\mu \geq 0$ является гиперпараметром метода множителей переменных направлений (ММПН) для управления балансом целевой функции и штрафного члена для ограничений равенств. В целом, μ просто настроен на постепенное увеличение в процессе оптимизации, чтобы гарантировать выполнимость решения для ограничений равенств [5].

Оптимизация. Оптимизация ОСО реализуется на основе ММПН, чтобы найти оптимальную скорость обучения, которая минимизирует расширенную функцию Лагранжа в уравнении (5). Основанное на ММПН решение для ОСО имеет два преимущества:

1. Оно эффективно, поскольку правила обновления получаются на основе простых скалярных вычислений.
2. Легко расширяется до нескольких ограничений и скоростей обучения, адаптированных для каждого параметра модели.

В математической оптимизации ММПН широко используется для решения задачи оптимизации [6], содержащей различные типы первичных переменных x и z с ограничениями равенствами:

$$x, z = \arg \min_{x, z} f(x) + g(z) \quad (6)$$

$$Ax + Bz = c,$$

где A и B матрицы коэффициентов ограничений равенств, c является константой. ММПН итеративно находит оптимальные значения основных переменных путем минимизации расширенной функции Лагранжа $L_{\mu}(x, z, \lambda)$ для задачи (6). В частности, ММПН оптимизирует простые и двойственные переменные по методу Гаусса-Зейделя [6], за один проход $L_{\mu}(x, z, \lambda)$ минимизируется по отношению к x и z альтернативно для фиксированной переменной λ . Затем, $L_{\mu}(x, z, \lambda)$ сводится к минимуму по λ для фиксированных x и z .

Задача оптимизации скорости обучения уравнения (4) представляет собой проблему с ограничениями равенствами, а также имеет два типа основных переменных: скорость обучения и переменная резерва [7]. То есть, для основных переменных η и s задача оптимизации скорости обучения имеет ту же структуру, что и задача (6), $f(\eta) = I(\theta) - \eta g^T v + \Omega(\theta - \eta v)$, $g(s) = 0$ для $s = [s_1, s_2]^T$, и ограничения равенства $\eta - s_1 = 0$ и $\varepsilon - \eta - s_2 = 0$. Таким образом, основные и двойные переменные задачи оптимизации скорости обучения могут быть оптимизированы с помощью ММПН [8] следующим образом:

$$\eta^{(t+1)} \leftarrow \arg \min_{\eta} L_{\mu}(\eta, s^{(t)}, \lambda^{(t)}), \quad (7)$$

$$s^{(t+1)} \leftarrow [\arg \min_s L_{\mu}(\eta^{(t+1)}, s, \lambda^{(t)})]_+, \quad (8)$$

$$\lambda_1^{(t+1)} \leftarrow \lambda_1^{(t)} - \mu(\eta^{(t+1)} - s_1^{(t+1)}), \quad (9)$$

$$\lambda_2^{(t+1)} \leftarrow \lambda_2^{(t)} - \mu(\varepsilon - \eta^{(t+1)} - s_2^{(t+1)}), \quad (10)$$

где $[\]_+$ является операцией поэлементной максимизации, где максимизация применяется к уравнению (8) для удовлетворения неотрицательного ограничения переменной резерва [9]. В этом процессе оптимизации, поскольку переменная резерва не зависит от функции потерь и члена регуляризации в задаче оптимизации скорости обучения, правила обновления переменной резерва могут быть указаны как [9]:

$$s_1^{(t+1)} = [\eta^{(t+1)} - \frac{\lambda_1^{(t)}}{\mu}]_+, \quad (11)$$

$$s_2^{(t+1)} = [\varepsilon - \eta^{(t+1)} - \frac{\lambda_2^{(t)}}{\mu}]_+. \quad (12)$$

Сходимость ОСО зависит от члена регуляризации $\Omega(\theta - \eta\nu)$. В частности, поскольку условия потерь уже выпуклы относительно η , сходимость ОСО гарантируется, когда $\Omega(\theta - \eta\nu)$ выпукла. Однако, в целом член регуляризации определяется как выпуклая функция или намеренно сведен к выпуклой функции в машинном обучении [10]. Таким образом, сходимость ОСО гарантируется в общих случаях машинного обучения.

Литература

1. Byrd, R. H. A stochastic quasi-Newton method for large-scale optimization / R. H. Byrd, S. L. Hansen, J. Nosedal, Y. A. Singer // *SIAM Journal on Optimization*. – 2016. – № 26 (2). – P. 1008–1031.
2. Agarwal, A. Noisy matrix decomposition via convex relaxation : Optimal rates in high dimensions / A. Agarwal, S. N. Negahban, M. J. Wainwright // *The Annals of Statistics*. – 2012. – № 40.2. – P. 1171–1197.
3. Chen, C. The direct extension of ADMM for multi-block convex minimization problems is not necessarily convergent / C. Chen, B. He, Y. Ye, X. Yuan // *Mathematical Programming's*. – 2016. – Vol. 155, № 1–2. – P. 57–79.
4. Duchi, J. Adaptive subgradient methods for online learning and stochastic optimization / J. Duchi, E. Hazan, Y. Singer // *Journal of Machine Learning Research*. – 2011. – № 12 (61). – P. 2121–2159.
5. Fadil, S. Linear inversion of band-limited reflection seismograms / S. Fadil // *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*. – 1986. – Vol. 7, № 4. – P. 1307–1330.
6. Gabay, D. A dual algorithm for the solution of nonlinear variational problems via finite element approximation / D. Gabay, B. Mercier // *Computes and Mathematics with Applications*. – 1976. – № 2. – P. 17–40.
7. Hestenes, M. R. Multiplier and gradient methods / M. R. Hestenes // *Journal of Optimization Theory and Applications*. – 1969. – № 4. – P. 303–320.
8. LeCun, Y. Gradient-based learning applied to document recognition / Y. LeCun, L. Bottou, Y. Bengio, P. Haffner // *Proceedings of the IEEE*. – 1998. – № 86 (11). – P. 2278–2324.
9. Lin, T. Global convergence of unmodified 3-block ADMM for a class of convex minimization problems / T. Lin, S. Ma, S. Zhang // *Journal of Scientific Computing*. – 2017. – № 76 (1). – P. 69–88.
10. Schaul, T. No more learning rates / T. Schaul, S. Zhang, Y. LeCun // *Proceedings of machine learning research*. – 2013. – Vol. 28. – P. 343–351.

УДК 621.382.049.77

Изучение влияния примесей на процессы формообразования синтетического алмаза в зоне термического влияния лазерного излучения

В.А. ЕМЕЛЬЯНОВ, Е.Б. ШЕРШНЕВ, А.Н. КУПО, С.И. СОКОЛОВ

В работе представлены результаты математического моделирования процесса термохимической обработки алмаза. Изучено влияние теплофизических свойств синтетического алмаза, зависящих от температуры, на динамику протекания физико-химических процессов в зоне лазерного воздействия.

Ключевые слова: лазерная обработка, алмаз, диффузия, углерод.

The paper presents the results of mathematical modeling of the process of thermochemical treatment of diamond. The influence of thermal-physical properties of synthetic diamond, which depend on the temperature, on the dynamics of physical and chemical processes in the laser treatment zone is studied.

Keywords: laser processing, diamond, diffusion, carbon.

Введение. В настоящее время алмаз и алмазоподобные материалы широко применяются в различных областях микроэлектроники и лазерной техники, благодаря стабильной работе в критических условиях устройств, созданных на их основе. В частности, в качестве теплоотводов в линейках полупроводниковых лазеров и мощных мультичиповых модулях. Лазерная обработка имеет существенные преимущества перед другими способами обработки кристаллов алмаза, за счет малой ширины реза и минимальной зоны термического влияния, при этом сам процесс обработки отличается высокой производительностью по сравнению с механическими методами обработки. Среди различных способов обработки алмаза термохимический способ обработки является по-прежнему наиболее перспективным [1]–[2].

Принцип термохимического способа обработки алмаза. В основе термохимического способа обработки алмаза лежит процесс каталитического взаимодействия углерода, входящего в состав алмаза с водородом или смесями водорода с водяным паром и углекислым газом [3]. Однако, несмотря на высокую производительность и технологичность, обработка лазером не всегда приводит к нужному результату. На практике оказывается, что при выборе синтетического алмаза, в частности алмазота, без видимых в микроскоп включений вероятность произвольных расколов достигает 10 %, что приводит к значительными финансовым затратам. Поэтому, для оптимизации процесса термохимической обработки алмаза и выявления факторов, влияющих на термохимическую реакцию, необходимо комплексное исследование физико-химических механизмов указанного процесса, в том числе методами математического моделирования. Для обеспечения локализации процесса термохимической обработки в качестве поверхностного теплового источника используется лазерное излучение, которое поглощается металлом. Принципиальная схема процесса термохимической обработки алмаза представлена на рисунке 1.

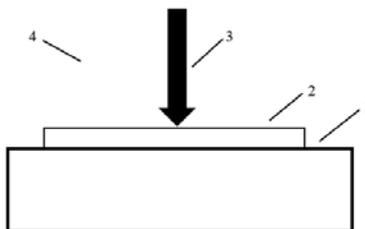


Рисунок 1 – Схема термохимической обработки алмаза с помощью лазерного излучения: 1 – алмаз (обрабатываемый материал); 2 – металлическое покрытие; 3 – лазерное излучение; 4 – газовая среда

Процесс термохимической обработки включает следующие стадии:

- 1) абсорбция атомов углерода из алмаза в металлическое покрытие;
- 2) диффузионная транспортировка атомов углерода через металл к поверхности;
- 3) диссоциация водорода каталитически активными атомами металла-катализатора;
- 4) гидрогенизация растворенного углерода на внешней поверхности металла атомарным водородом.

Моделирование. Авторами ранее в работе [4] были получены решения нестационарной нелинейной задачи тепломассопереноса в системе алмаз–металл–водород. Однако, полученные решения не учитывают связи между особенностями дефектно-примесного состава синтетических алмазов и вероятностью их разрушения при лазерном облучении.

Одним из факторов, влияющих на вероятность разрушения синтетических алмазов при лазерном облучении, является концентрация дисперсного азота (С-дефект), который в свою очередь влияет на теплофизические параметры кристалла [5]. Градиент температуры, возникающий при локальном воздействии лазерного излучения, определяется в значительной мере коэффициентом теплопроводности. При этом теплопроводность зависит от типа кристалла, происхождения (природный либо искусственный) и температуры, что в свою очередь определяет распределение температурных полей в кристалле при его лазерной обработке. Вследствие этого при увеличении теплопроводности будет снижаться и величина температурного градиента, поэтому большую вероятность разрушения будут иметь кристаллы с большим количеством примесей за счет своей низкой теплопроводности. Таким образом, учет зависимости теплопроводности от температуры при математическом моделировании указанных процессов является одним из определяющих факторов, позволяющих оптимизировать процесс лазерной обработки алмаза.

При моделировании воздействия лазерного излучения на кристаллы алмаза был применен метод интерполяции экспериментальных данных полиномом зависимости теплопроводности от температуры [6] для различных видов алмаза как натуральных, так и искусственных. Пример такой зависимости представлен на рисунке 2.

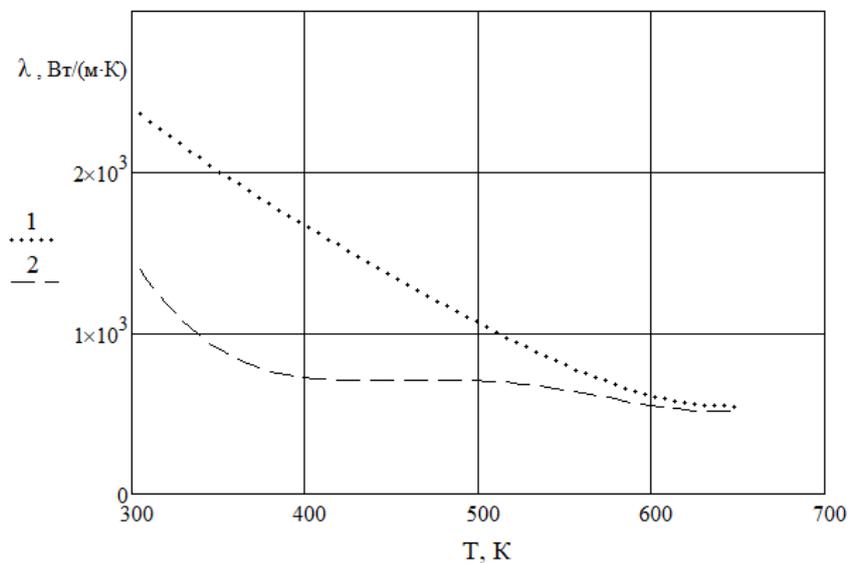


Рисунок 2 – Зависимость теплопроводности от температуры: 1 – природного алмаза типа Па; 2 – синтетического алмаза с концентрацией азота $1,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

Результаты моделирования. Известны решения уравнения теплопроводности для системы металлическая плёнка-подложка в предположении равномерного распределения интенсивности по сечению лазерного пучка для полубесконечной мишени (алмаза) [7]. Однако в этой модели теплофизические константы полагаются неизменными и заменяются усреднёнными параметрами. Учет зависимости теплопроводности от температуры, которая, очевидно, влияет на динамику термохимических процессов, позволяет уточнить значение температуры в зоне лазерного воздействия на поверхность алмаза (рисунок 3).

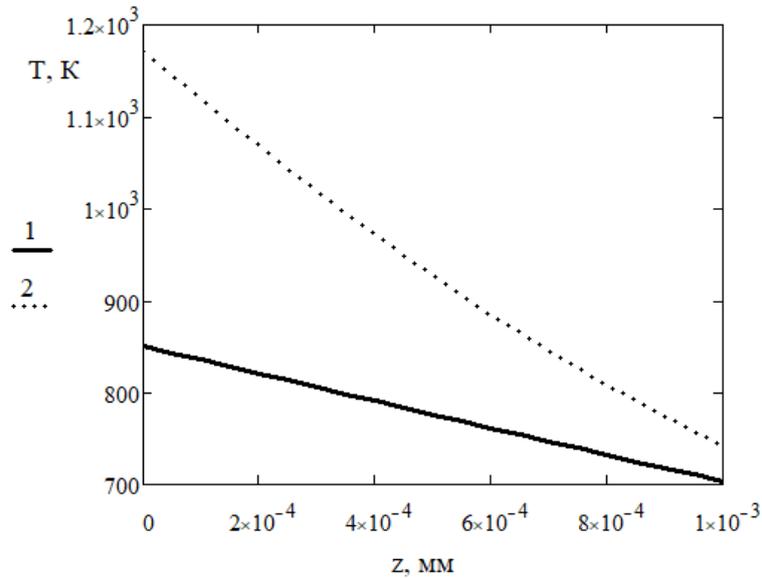


Рисунок 3 – Зависимость расчетной температуры T по глубине при обработке алмаза типа IIa: 1 – без учета зависимости теплопроводности от температуры; 2 – с учетом зависимости теплопроводности от температуры

Таким образом, учет зависимости теплопроводности от температуры приводит к значительному отличию расчетной температуры T в зоне обработки. Так, например, при плотности мощности 50 Вт/мм^2 температуры в кристалле алмаза типа IIa, рассчитанные различными способами, отличаются на 15–25 %.

Для определения режимов обработки искусственных алмазов необходимо знать концентрацию дефектов в кристалле. Это позволит определить значения температур T и выявить влияние концентрации дефектов на динамику термических напряжений, приводящих к разрушению кристаллов в процессе обработки. По результатам построены зависимости температуры и механических напряжений по глубине в различные моменты времени обработки (рисунки 4, 5).

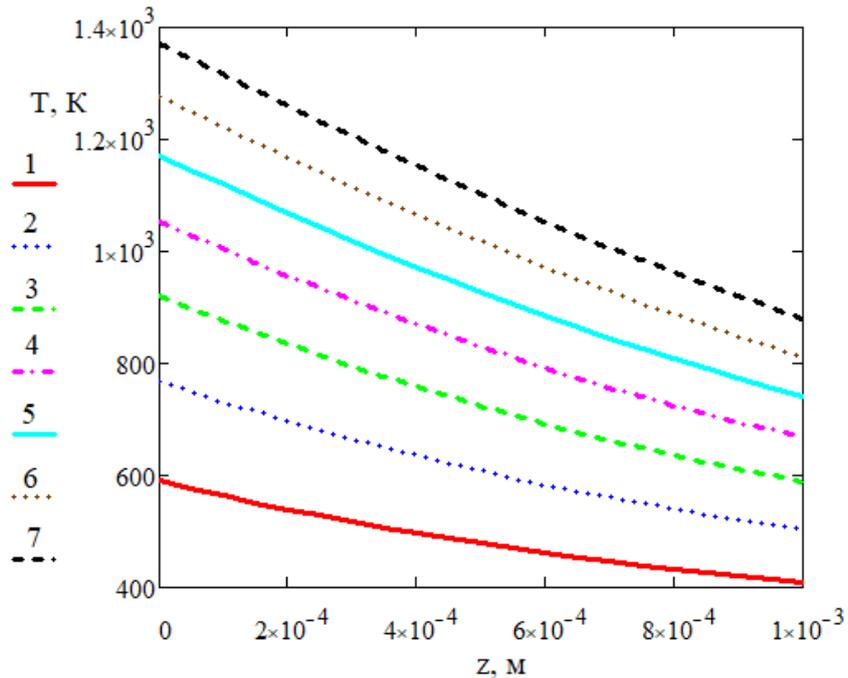


Рисунок 4 – Распределение температуры в алмазе по глубине в различные моменты времени после начала лазерного воздействия: 1 – 1 мс; 2 – 2 мс; 3 – 3 мс; 4 – 4 мс; 5 – 5 мс; 6 – 6 мс; 7 – 7 мс

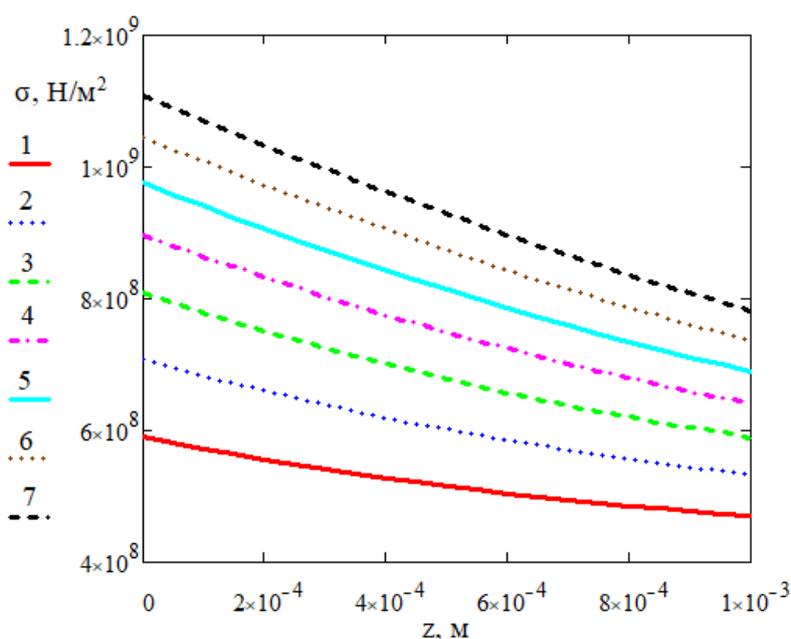


Рисунок 5 – Распределение механических напряжений в алмазе по глубине в различные моменты времени после начала лазерного воздействия: 1 – 1 мс; 2 – 2 мс; 3 – 3 мс; 4 – 4 мс; 5 – 5 мс; 6 – 6 мс; 7 – 7 мс

Результаты моделирования показали, что учет зависимости теплопроводности от температуры значительно влияет на динамику термохимических процессов, при этом полученное распределение температурных полей по глубине позволяет рассчитать механические напряжения в кристалле. Если рассчитанные напряжения больше предела прочности кристалла, то данные параметры лазерной обработки могут привести к растрескиванию кристалла.

Заключение. Разработанная математическая модель и проведенное моделирование позволяет провести расчет технологических параметров процесса термохимической обработки как натуральных, так и искусственных алмазов, учитывая при этом зависимость их теплофизических параметров от температуры. Полученная модель можно использовать для микроформообразования алмаза при лазерной полировке, литографии и созданию заданной топологии изделий из алмазов.

Литература

1. Митягин, А. Ю. Технология и оборудование для обработки алмазных материалов современной техники / А. Ю. Митягин, А. А. Алтухов, А. Б. Митягина // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2009. – № 1. – С. 53–58.
2. Zaitsev, A. M. Thermochemical polishing of CVD diamond films / A. M. Zaitsev // Diamond and Related Materials. – 1998. – V. 7, i. 8. – P. 1108–1117.
3. Григорьев, А. П. Механизм гидрирования углерода в присутствии никеля, железа и платины / А. П. Григорьев, С. У. Лифшиц, П. П. Шамаев // Кинетика и катализ. – 1977. – Т. 18, № 4. – С. 948–952.
4. Емельянов, В. А. Изучение влияния параметров обработки на протекание поверхностных нанопроцессов при формообразовании синтетических алмазов / В. А. Емельянов, Е. Б. Шершнев, А. Н. Купо, С. И. Соколов // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2021. – № 6 (129). – С. 150–154.
5. Бокий, Г. Б. Природные и синтетические алмазы / Г. Б. Бокий, Г. Н. Безруков, Ю. А. Клюев [и др.]. – М.: Наука, 1986. – 221 с.
6. Оситинская, Т. Д. Влияние точечных дефектов на теплопроводность алмазов / Т. Д. Оситинская, А. П. Подоба, С. В. Шмегера // Сверхтвердые материалы. – 1992. – № 2. – С. 27–31.
7. Прохоров, А. М. Взаимодействие лазерного излучения с металлами / А. М. Прохоров, В. И. Конов, И. Урсу, Й. Михайлеску. – М.: Наука, 1988. – 537 с.

Вынужденные колебания круговой трёхслойной пластины ступенчато-переменной толщины

М.В. МАРКОВА

В работе представлена система уравнений, описывающих процесс вынужденных колебаний трёхслойной круговой пластины через перемещения, возникающие при её деформации. Получено аналитическое решение для случая линейной по времени внешней нагрузки. Рассмотрена пластина, имеющая ступенчато-переменную толщину, приведён принцип построения общего решения и численные результаты расчёта.

Ключевые слова: вынужденные колебания трёхслойной пластины, ступенчатая трёхслойная пластина.

The paper presents a system of equations governing displacements that occur during the forced vibration of a three-layer circular plate. An analytical solution is obtained for forced vibration stimulated by a ramped load. A staged-thickness plate is analyzed: the principle of constructing a general solution and numerical calculation results are presented.

Keywords: forced vibration of a three-layer plate, staged-thickness three-layer plate.

Введение. Основным принципом конструирования является обеспечение несущей способности, жёсткости и дополнительных технических характеристик элемента (термостойкости, звуко- и электропроводности, магнитной проницаемости и др.) при одновременном минимуме его себестоимости и затрат на монтажные работы. В этой связи всё большую популярность обретают инженерные решения, базирующиеся на применении композитных материалов и комбинированных конструктивных элементов. Одной из наиболее распространённых разновидностей композитных конструкций являются трёхслойные пластины. Они представляют собой конгломерат из прочных и жёстких внешних несущих слоёв, соединённых срединным наполнителем. Срединный наполнитель обеспечивает перераспределение напряжений между несущими слоями и наделяет конструкцию дополнительными физико-техническими свойствами. А применение подобного рода конструкций, в свою очередь, обуславливает необходимость исследования их работы под действием внешней нагрузки. Построению механико-математических моделей статического [1]–[14] и динамического [15]–[23] деформирования трёхслойных пластин различной конфигурации в плане посвящено немало работ как среди отечественных, так и среди зарубежных авторов. Однако они относятся к трёхслойным пластинам, имеющим постоянную толщину. В данной статье будут рассмотрены вынужденные колебания трёхслойной круговой пластины ступенчато-переменной толщины, побуждаемые действием линейной по времени внешней нагрузки.

Уравнения движения. В цилиндрической системе координат (r, φ, z) рассмотрим вынужденные колебания круговой трёхслойной пластины, имеющей ступенчатое изменение толщины вдоль радиуса r (рисунок 1).

Толщина внешних несущих слоёв пластины задаётся с помощью функции Хевисайда [24]: $h_1(r) = h_{1(I)} + (h_{1(II)} - h_{1(I)}) \cdot H_0(r - R_1)$, $h_2(r) = h_{2(I)} + (h_{2(II)} - h_{2(I)}) \cdot H_0(r - R_1)$, где R_1 – радиус центрального участка пластины (участка I). Срединный наполнитель пластины имеет постоянную вдоль радиуса толщину $h_3 = 2c = \text{const}$, где c – расстояние от координатной плоскости до участка сопряжения слоёв, т. е. принимаем, что координатная плоскость пластины совпадает со срединной плоскостью наполнителя.

Деформирование пластины подчиняется гипотезе «ломаной линии». Согласно которой, нормаль к срединной плоскости при прогибе (w) пластины остаётся прямолинейной и перпендикулярной к деформированной срединной поверхности в тонких внешних слоях пластины

(гипотеза Кирхгофа), поворачиваясь при этом на некоторый угол $\theta = w_{,r}$ (здесь запятая в нижнем индексе обозначает операцию дифференцирования по координате r). В толстом срединном заполнителе, согласно гипотезе Тимошенко, она поворачивается на некоторый угол ψ .

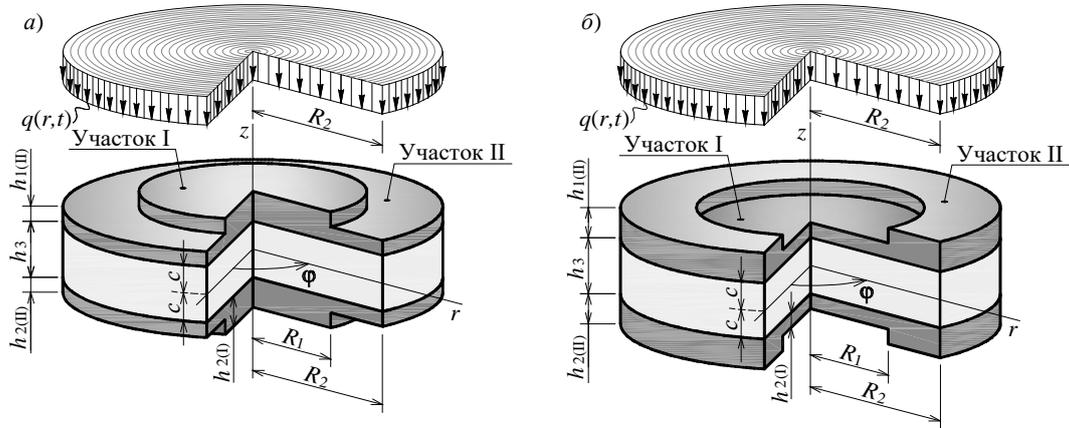


Рисунок 1 – Круговая трёхслойная ступенчатая пластина:
а – с уширением в центральной части; б – с сужением в центральной части

Согласно соотношениям Коши и принятой модели деформирования, выражения для определения радиальных перемещений в слоях пластины будут иметь вид:

$$\begin{aligned} u_r^{(1)} &= u + c\psi - zw_{,r} \quad (\text{при } c < z \leq c + h_1); \\ u_r^{(3)} &= u + z\psi - zw_{,r} \quad (\text{при } -c \leq z \leq c); \\ u_r^{(2)} &= u - c\psi - zw_{,r} \quad (\text{при } -c - h_2 \leq z < -c), \end{aligned}$$

здесь u – радиальное перемещение координатной поверхности; z – расстояние от рассматриваемого волокна до срединной плоскости заполнителя; $u \pm c\psi$ – величина смещения внешних слоёв 1 и 2 за счёт деформации заполнителя 3.

Используя вариационный принцип Гамильтона [25], для круговой трёхслойной пластины, имеющей криволинейную переменную толщину вдоль радиуса ($h_1 = h_1(r)$, $h_2 = h_2(r)$), в [26] был представлен вывод системы дифференциальных уравнений, описывающий перемещения, возникающие в пластине в процессе её деформирования при вынужденных колебаниях.

$$\begin{aligned} a_1^+ L_2(u) + a_2^+ L_2(\psi) - a_3^+ L_2(w_{,r}) + a_1^+,_r u_{,r} + a_2^+,_r \psi_{,r} - a_3^+,_r w_{,rr} + a_1^-,_r \frac{u}{r} + a_2^-,_r \frac{\psi}{r} - a_3^-,_r \frac{w_{,r}}{r} - \\ - M_1 \ddot{u} - M_2 \ddot{\psi} + M_3 \ddot{w}_{,r} = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_2^+ L_2(u) + a_4^+ L_2(\psi) - a_5^+ L_2(w_{,r}) + a_2^+,_r u_{,r} + a_4^+,_r \psi_{,r} - a_5^+,_r w_{,rr} + a_2^-,_r \frac{u}{r} + a_4^-,_r \frac{\psi}{r} - a_5^-,_r \frac{w_{,r}}{r} - \\ - M_2 \ddot{u} - M_4 \ddot{\psi} + M_5 \ddot{w}_{,r} = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_3^+ L_3(u) + 2a_3^+,_r L_2(u) + a_5^+ L_3(\psi) + 2a_5^+,_r L_2(\psi) - a_6^+ L_3(w_{,r}) - 2a_6^+,_r L_2(w_{,r}) + \left(a_3^+,_{rr} + \frac{a_3^-,_r}{r} \right) u_{,r} + \\ + \left(a_5^+,_{rr} + \frac{a_5^-,_r}{r} \right) \psi_{,r} - \left(a_6^+,_{rr} + \frac{a_6^-,_r}{r} \right) w_{,rr} + \left(a_3^-,_{rr} - \frac{a_3^+,_r}{r} \right) \frac{u}{r} + \left(a_5^-,_{rr} - \frac{a_5^+,_r}{r} \right) \frac{\psi}{r} - \left(a_6^-,_{rr} - \frac{a_6^+,_r}{r} \right) \frac{w_{,r}}{r} - \\ - \left[M_3,_{rr} + \frac{M_3}{r} \right] \ddot{u} - \left[M_5,_{rr} + \frac{M_5}{r} \right] \ddot{\psi} + \left[M_6,_{rr} + \frac{M_6}{r} \right] \ddot{w}_{,r} - M_3 \ddot{u}_{,r} - M_5 \ddot{\psi}_{,r} + M_6 \ddot{w}_{,rr} - M_1 \ddot{w} = -q, \quad (1) \end{aligned}$$

где $L_2(g) \equiv \left(\frac{1}{r} (rg)_{,r} \right)_{,r} \equiv g_{,rr} + \frac{g_{,r}}{r} - \frac{g}{r^2}$ и $L_3(g) \equiv \frac{1}{r} (rL_2(g))_{,r} \equiv g_{,rrr} + \frac{2g_{,rr}}{r} - \frac{g_{,r}}{r^2} + \frac{g}{r^3}$ – дифференциальные операторы; M_n и a_n^\pm – коэффициенты, зависящие от плотности, упругих

свойств материалов и толщины слоёв пластины; q – внешняя осесимметричная вертикальная распределённая нагрузка, не зависящая от координаты φ .

В работе [27] система (1) была преобразована и стала применима для описания перемещений, возникающих при колебании трёхслойной пластины постоянной толщины, т. е. при $h_1 = \text{const}$ и $h_2 = \text{const}$. И после математических преобразований она свелась к виду:

$$\begin{aligned} u &= b_1 w_{,r} + rC_1 + \frac{C_2}{r} - \frac{1}{r} \cdot \frac{a_4^+ M_3 - a_2^+ M_5}{a_1^+ a_4^+ - (a_2^+)^2} \int r \ddot{w} dr; \\ \psi &= b_2 w_{,r} + rC_3 + \frac{C_4}{r} - \frac{1}{r} \cdot \frac{a_1^+ M_5 - a_2^+ M_3}{a_1^+ a_4^+ - (a_2^+)^2} \int r \ddot{w} dr; \\ \Delta \Delta w + Dm \Delta \ddot{w} + DM_1 \dot{w} &= Dq. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь Δ – оператор Лапласа; D , b_i и m – коэффициенты, зависящие от плотности, упругих свойств материалов и толщины слоёв пластины; C_n – константы интегрирования.

Так как рассматриваемая в статье пластина (см. рисунок 1) ступенчато-переменной толщины представляет собой совокупность прямолинейных участков, то уравнения системы (2) справедливы и для каждого из её участков в отдельности, а общее решение для перемещений, возникающих в ступенчатой пластине, может быть построено из отдельных решений для каждого участка, сопряжённых с помощью функции Хевисайда [24]:

$$\begin{aligned} w &= w_{(I)} + (w_{(II)} - w_{(I)}) \cdot H_0(r - R_1); \\ \psi &= \psi_{(I)} + (\psi_{(II)} - \psi_{(I)}) \cdot H_0(r - R_1); \\ u &= u_{(I)} + (u_{(II)} - u_{(I)}) \cdot H_0(r - R_1). \end{aligned} \quad (3)$$

Решение системы (2) для каждого прямолинейного участка ступенчатой пластины будем искать в виде суммы квазистатических (w_s, ψ_s, u_s) и динамических (w_d, ψ_d, u_d) составляющих перемещений [28]:

$$\begin{aligned} u_{(I, II)} &= u_{s(I, II)} + u_{d(I, II)} \\ \psi_{(I, II)} &= \psi_{s(I, II)} + \psi_{d(I, II)} \\ w_{(I, II)} &= w_{s(I, II)} + w_{d(I, II)}. \end{aligned} \quad (4)$$

При этом квазистатическое деформирование пластины будет описываться системой уравнений, образованных из последнего уравнения системы (2) без учёта сил инерции

$$\begin{aligned} u_{s(I, II)} &= b_{1(I, II)} w_{s(I, II),r} + rC_{s1(I, II)} + \frac{C_{s2(I, II)}}{r}; \\ \psi_{s(I, II)} &= b_{2(I, II)} w_{s(I, II),r} + rC_{s3(I, II)} + \frac{C_{s4(I, II)}}{r}; \\ \Delta \Delta w_{s(I, II)} &= D_{(I, II)} q_{(I, II)}. \end{aligned} \quad (5)$$

После четырёхкратного интегрирования последнего уравнения системы (5) получаем выражение для определения квазистатического прогиба на каждом прямолинейном участке ступенчатой пластины

$$w_{s(I, II)} = C_{s5(I, II)} + C_{s6(I, II)} r^2 + C_{s7(II)} \ln r + C_{s8(II)} r^2 \ln r + D_{(I, II)} \int \frac{1}{r} \int r \int \frac{1}{r} \int (r q_{(I, II)}) dr dr dr dr, \quad (6)$$

где C_{si} – константы интегрирования, определяемые из граничных условий закрепления пластины.

Тогда выражения для определения радиального перемещения координатной поверхности и относительного сдвига в заполнителе будут иметь вид:

$$u_{s(I, II)} = C_{s1(I, II)} r + \frac{C_{s2(II)}}{r} + 2C_{s6(I, II)} b_{1(I, II)} r + C_{s7(II)} \frac{b_{1(II)}}{r} + C_{s8(II)} b_{1(II)} r (2 \ln r + 1) +$$

$$\begin{aligned} & + \frac{D_{(I,II)} b_{1(I,II)}}{r} \int r \int \frac{1}{r} \int (r q_{(I,II)}) dr dr dr ; \\ \Psi_{s(I,II)} = & C_{s3(I,II)} r + \frac{C_{s4(II)}}{r} + 2C_{s6(I,II)} b_{2(I,II)} r + C_{s7(II)} \frac{b_{2(II)}}{r} + C_{s8(II)} b_{2(II)} r (2 \ln r + 1) + \\ & + \frac{D_{(I,II)} b_{2(I,II)}}{r} \int r \int \frac{1}{r} \int (r q_{(I,II)}) dr dr dr . \end{aligned}$$

Константы интегрирования C_{s2} и C_{s4} для центрального участка пластины (участка I) приняты равными нулю, исходя из недопущения деления на ноль при $r = 0$: $C_{s2(I)} = C_{s4(I)} = 0$. Константы интегрирования C_{s7} и C_{s8} , стоящие при слагаемых, содержащих функцию натурального логарифма, для центрального участка пластины (участка I) так же приняты равными нулю, исходя из того, что при $r = 0$ (в центре пластины) прогиб не может быть равен бесконечности: $C_{s7(I)} = C_{s8(I)} = 0$. Оставшиеся двенадцать констант интегрирования определяются из системы уравнений, образованных следующими граничными условиями:

1. при наличии жёсткой заделки на внешнем контуре пластины, необходимо потребовать равенства нулю всех перемещений:

$$w_{s(II)} = 0; \quad u_{s(II)} = 0; \quad \Psi_{s(II)} = 0; \quad \theta_{s(II)} = w_{s(II),r} = 0;$$

2. при шарнирном опирании пластины в случае наличия по контуру жёсткой диафрагмы, препятствующей относительному сдвигу слоёв:

$$w_{s(II)} = 0; \quad u_{s(II)} = 0; \quad \Psi_{s(II)} = 0; \quad M_{rs(II)} = 0;$$

3. в точке сопряжения участков ступенчатой пластины необходимо потребовать равенства всех перемещений и внутренних усилий:

$$\begin{aligned} w_{s(I)} = w_{s(II)}; \quad u_{s(I)} = u_{s(II)}; \quad \Psi_{s(I)} = \Psi_{s(II)}; \quad w_{s(I),r} = w_{s(II),r}; \\ T_{rs(I)} = T_{rs(II)}; \quad M_{rs(I)} = M_{rs(II)}; \quad H_{rs(I)} = H_{rs(II)}; \quad Q_{s(I)} = Q_{s(II)}, \end{aligned}$$

здесь T_{rs} , Q_s , M_{rs} и H_{rs} – продольная сила, поперечная сила, изгибающий момент и момент на границе контакта заполнителя и внешних слоёв соответственно.

Учитывая, что $w_{(I,II)} = w_{s(I,II)} + w_{d(I,II)}$, последнее уравнение системы (2) примет вид

$$\Delta \Delta (w_{s(I,II)} + w_{d(I,II)}) + D_{(I,II)} m_{(I,II)} \Delta (\ddot{w}_{s(I,II)} + \ddot{w}_{d(I,II)}) + D_{(I,II)} M_{1(I,II)} (\ddot{w}_{s(I,II)} + \ddot{w}_{d(I,II)}) = D_{(I,II)} q_{(I,II)}. \quad (7)$$

Рассмотрим частный случай вынужденных колебаний, когда функция внешнего воздействия $q_{(I,II)} = q_{(I,II)}(r, t)$ будет линейна по времени t . Тогда $\ddot{w}_{s(I,II)} = 0$ и выражение (7) преобразуется к виду

$$\Delta \Delta (w_{s(I,II)} + w_{d(I,II)}) + D_{(I,II)} m_{(I,II)} \Delta \ddot{w}_{d(I,II)} + D_{(I,II)} M_{1(I,II)} \ddot{w}_{d(I,II)} = D_{(I,II)} q_{(I,II)}. \quad (8)$$

С учётом последнего уравнения системы (5), выражение (8) примет следующий вид

$$\Delta \Delta w_{d(I,II)} + D_{(I,II)} m_{(I,II)} \Delta \ddot{w}_{d(I,II)} + D_{(I,II)} M_{1(I,II)} \ddot{w}_{d(I,II)} = 0, \quad (9)$$

что соответствует уравнению, описывающему свободные колебания пластины. Используя метод Фурье [29], в [30] получено решение уравнения (9):

$$\begin{aligned} w_{d(I,II)} = \sum_{n=0}^{\infty} \left[C_{d5n(I,II)} I_0(r \gamma_{(I,II)n}^+) + C_{d6n(II)} K_0(r \gamma_{(II)n}^+) + C_{d7n(I,II)} J_0(r \gamma_{(I,II)n}^-) + C_{d8n(II)} Y_0(r \gamma_{(II)n}^-) \right] \times \\ \times (A_n \cos(\omega_n t) + B_n \sin(\omega_n t)), \end{aligned} \quad (10)$$

где γ_n^\pm – коэффициенты, зависящие от частоты собственных колебаний пластины ω_n ; $I_0(r)$, $K_0(r)$, $J_0(r)$ и $Y_0(r)$ – функции Бесселя от действительного и мнимого аргумента [31], [32]; C_{din} – константы интегрирования, определяемые из граничных условий; A и B – константы, определяемые из начальных условий колебания пластины.

В свою очередь, выражения для остальных составляющих динамических перемещений

$$\begin{aligned}
 u_{d(I, II)} = & \sum_{n=0}^{\infty} \left[C_{d1n(I, II)}^* r + \frac{C_{d2n(II)}^*}{r} + C_{d5n(I, II)} I_1 \left(r \gamma_{(I, II)n}^+ \right) \left(\gamma_{(I, II)n}^+ b_{1(I, II)} + \frac{\omega_n^2 m_{1(I, II)}}{\gamma_{(I, II)n}^+} \right) - \right. \\
 & - C_{d6n(II)} K_1 \left(r \gamma_{(II)n}^+ \right) \left(\gamma_{(II)n}^+ b_{1(II)} + \frac{\omega_n^2 m_{1(II)}}{\gamma_{(II)n}^+} \right) - C_{d7n(I, II)} J_1 \left(r \gamma_{(I, II)n}^- \right) \left(\gamma_{(I, II)n}^- b_{1(I, II)} - \frac{\omega_n^2 m_{1(I, II)}}{\gamma_{(I, II)n}^-} \right) - \\
 & \left. - C_{d8n(II)} Y_1 \left(r \gamma_{(II)n}^- \right) \left(\gamma_{(II)n}^- b_{1(II)} - \frac{\omega_n^2 m_{1(II)}}{\gamma_{(II)n}^-} \right) \right] \times \left(A_n \cos(\omega_n t) + B_n \sin(\omega_n t) \right); \\
 \psi_{d(I, II)} = & \sum_{n=0}^{\infty} \left[C_{d3n(I, II)}^* r + \frac{C_{d4n(II)}^*}{r} + C_{d5n(I, II)} I_1 \left(r \gamma_{(I, II)n}^+ \right) \left(\gamma_{(I, II)n}^+ b_{2(I, II)} + \frac{\omega_n^2 m_{2(I, II)}}{\gamma_{(I, II)n}^+} \right) - \right. \\
 & - C_{d6n(II)} K_1 \left(r \gamma_{(II)n}^+ \right) \left(\gamma_{(II)n}^+ b_{2(II)} + \frac{\omega_n^2 m_{2(II)}}{\gamma_{(II)n}^+} \right) - C_{d7n(I, II)} J_1 \left(r \gamma_{(I, II)n}^- \right) \left(\gamma_{(I, II)n}^- b_{2(I, II)} - \frac{\omega_n^2 m_{2(I, II)}}{\gamma_{(I, II)n}^-} \right) - \\
 & \left. - C_{d8n(II)} Y_1 \left(r \gamma_{(II)n}^- \right) \left(\gamma_{(II)n}^- b_{2(II)} - \frac{\omega_n^2 m_{2(II)}}{\gamma_{(II)n}^-} \right) \right] \times \left(A_n \cos(\omega_n t) + B_n \sin(\omega_n t) \right).
 \end{aligned}$$

Константы интегрирования C_{d2n} , C_{d4n} , C_{d6n} и C_{d8n} аналогично, как и в случае квазистатического деформирования пластины, для центрального участка I принимаются равными нулю из условия недопущения деления на ноль и бесконечности прогиба при $r = 0$:

$$C_{d2n(I)} = C_{d4n(I)} = C_{d6n(I)} = C_{d8n(I)} = 0.$$

Константы интегрирования A_n и B_n будут определены из условия отсутствия колебаний пластины в начальный момент приложения внешней нагрузки: $w(r, 0) = w_s(r, 0) + w_d(r, 0) = 0$.

$$w_d(r, 0) = -w_s(r, 0) \text{ и } \dot{w}_d(r, 0) = -\dot{w}_s(r, 0).$$

Численные исследования. Рассмотрим вынужденные колебания пластины ступенчато-переменной толщины: с уширением и с сужением в центральной части (см. рисунок 1). Пластина закреплена по всей длине окружности внешнего контура. Внешний радиус пластины $R_2 = 1,0$ м. Слои пакета представлены материалами Д16Т–фторопласт–Д16Т. Механические характеристики материалов имеют следующие значения:

- Д16Т: $K = 0,8 \cdot 10^{11}$ Па; $G = 0,267 \cdot 10^{11}$ Па;
- фторопласт: $K = 345 \cdot 10^6$ Па; $G = 90 \cdot 10^6$ Па.

Толщина внешних слоёв пластины:

- на участке I: $h_{1(I)} = h_{2(I)} = 0,04$ м (для пластины с уширением в центральной части);
 $h_{1(I)} = h_{2(I)} = 0,02$ м (для пластины с сужением в центральной части);
- на участке II: $h_{1(II)} = h_{2(II)} = 0,02$ м (для пластины с уширением);
 $h_{1(II)} = h_{2(II)} = 0,04$ м (для пластины с сужением).

Толщина срединного заполнителя для обоих видов пластин: $h_3 = 0,3$ м.

Предположим, что в момент времени t_0 на пластину действует внезапно приложенная равномерно распределённая по всей площади нагрузка q_0 , которая выводит пластину из состояния равновесия. Нагрузка имеет линейный по времени характер: её интенсивность неизменна – $q_0(r, t) = \text{const} = -100$ кПа. На рисунке 2 представлены графики зависимости амплитуды прогибов пластины от времени колебаний при различном радиусе центрального участка I.

Изменение величины прогиба пластины (амплитуды) и периода колебаний обусловлено изменением жёсткости пластин при разных радиусах центрального участка I. Время достижения первой амплитуды колебания пластины (максимальный прогиб) составляет $t = \pi / \omega_0$, где ω_0 – частота первой формы колебания.

Заключение. Таким образом, в работе приведена система дифференциальных уравнений, моделирующих процесс вынужденных колебаний трёхслойных круговых пластин через перемещения, возникающие при деформировании. А также представлено решение этой системы для трёхслойной круговой пластины, имеющей ступенчато-переменную толщину вдоль радиуса. Полученное решение позволяет определять перемещения, возникающие не только в процессе колебаний, но и при статическом деформировании ступенчатой пластины.

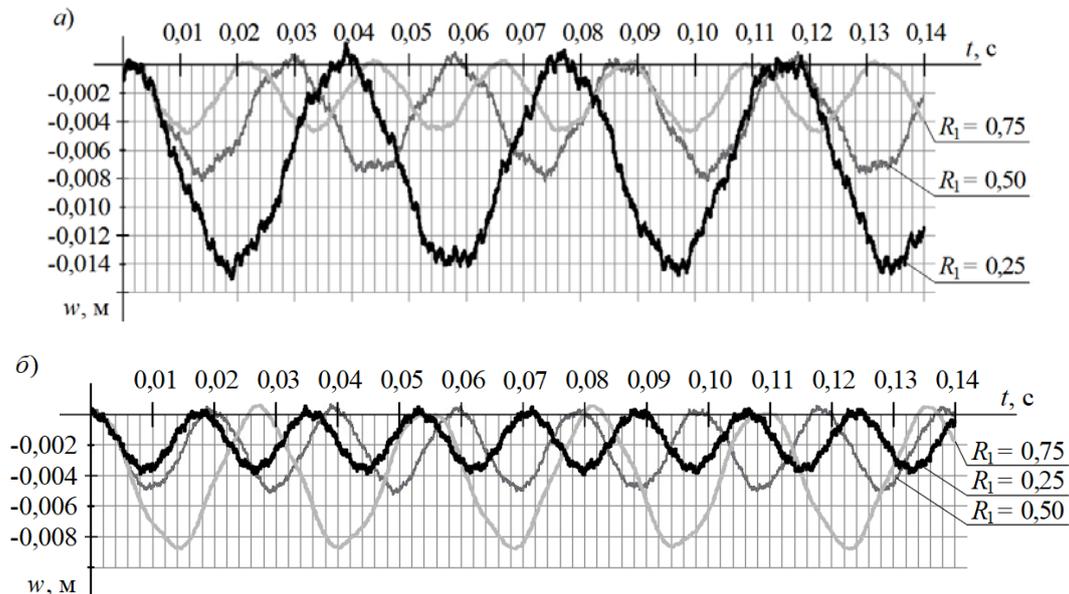


Рисунок 2 – Вынужденные колебания, вызванные неизменной по времени нагрузкой: а – пластина с уширением в центральной части; б – пластина с сужением в центральной части

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении».

Литература

1. Андреев, А. Н. Осесимметричное выпучивание трёхслойных круговых пластин / А. Н. Андреев // Динамика сплошной среды. – 1984. – № 66. – С. 3–11.
2. Григолоук, Э. И. Осесимметричное выпучивание круговых кольцевых трёхслойных пластин / Э. И. Григолоук, Л. А. Магеррамова // Исслед. по теор. пластин и оболочек. – 1980. – № 15. – С. 86–104.
3. Козел, А. Г. Нелинейный изгиб сэндвич-пластины на основании Пастернака / А. Г. Козел // Теоретическая и прикладная механика : междунар. научн.-техн. сб. – Минск : БНТУ, 2020. – Вып. 35. – С. 106–113.
4. Кудин, А. В. Осесимметричный изгиб круговых и кольцевых трёхслойных пластин с нелинейно-упругим наполнителем / А. В. Кудин, С. В. Чопоров, С. И. Гоменюк // Математическое моделирование. – 2017. – Т. 29, № 2. – С. 63–78.
5. Bending and buckling of circular sandwich plates with a hardened core / Z. Pi [et al.] // Materials. – 2021. – Vol. 14. – P. 4741–4755.
6. Bofilios, D. Response of double-wall (sandwich) circular plates to random excitations – Analytical approach / D. Bofilios, C. Lyrintzis // Journal of aircraft. – 1992. – Vol. 29. – P. 932–938.
7. Buckling of a sandwich symmetrical circular plate with varying mechanical properties of the core / E. Magnucka [et al.] // Applied mathematics and mechanics. – 2018. – Vol. 39 (7). – P. 981–992.
8. Global and local buckling of sandwich circular and beam-rectangular plates with metal foam core / P. Jasion [et al.] // Thin-walled structures. – 2012. – Vol. 61. – P. 154–161.
9. Lal, A. Bending analysis of a sandwich plate with elliptical/circular cutout / A. Lal, B. M. Sutaria, R. Kumar // Conf. series : Materials science and engineering. – 2020. – Vol. 1004 (1). – P. 1–7.
10. Leonenko, D. V. Elastic bending of a three-layer circular plate with step-variable thickness / D. V. Leonenko // Mechanics of machines, mechanisms and materials. – 2021. – Vol. 1 (54). – P. 25–29.
11. Waszczyszyn, Z. Stability analysis of plastic sandwich circular plates / Z. Waszczyszyn // Mechanika teoretyczna i stosowana. – 1970. – Vol. 4 (10). – P. 577–597.

12. Yoosefian, A. R. Nonlinear bending of functionally graded sandwich plates under mechanical and thermal load / A. R. Yoosefian, M. Golmakani, M. Sadeghian // *Communications in nonlinear science and numerical simulation*. – 2019. – Vol. 84. – DOI: 10.1016/j.cnsns.2019.105161.
13. Zenkour, A. Bending analysis of functionally graded sandwich plates under the effect of mechanical and thermal loads / A. Zenkour, N. Alghamdi // *Mechanics of advanced materials and structures*. – 2010. – Vol. 17. – P. 419–432.
14. Žur, K. K. Analytical solutions to boundary value problem of free vibration of sandwich thin circular plates with discrete elements / K. Žur, J. Jaroszewicz, Ł. Dragun // *International journal of applied mechanics and engineering*. – 2015. – Vol. 20, № 3. – P. 617–627.
15. Громыко, Ю. В. Колебания трёхслойной круговой пластины с отверстием при резонансе / Ю. В. Громыко // *Механика. Исследования и инновации*. – 2018. – № 11 (11). – С. 41–48.
16. Леоненко, Д. В. Исследование спектра частот трёхслойной цилиндрической оболочки с упругим наполнителем / Д. В. Леоненко, Э. И. Старовойтов // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 162–169.
17. Леоненко, Д. В. Колебания круговых трёхслойных пластин на упругом основании Пастернака / Д. В. Леоненко // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. – 2014. – № 1. – С. 59–63.
18. Леоненко, Д. В. Свободные колебания круговых трёхслойных пластин на упругом основании / Д. В. Леоненко // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. – 2008. – № 3. – С. 42–47.
19. Alipour, M. M. Transient forced vibration response analysis of heterogeneous sandwich circular plates under viscoelastic boundary support / M. M. Alipour // *Archives of civil and mechanical engineering*. – 2018. – Vol. 18. – P. 12–31.
20. Heshmati, M. Effect of radially graded porosity on the free vibration behavior of circular and annular sandwich plates / M. Heshmati, S. Jalali // *European journal of mechanics – A/Solids*. – 2019. – Vol. 74. – P. 417–430.
21. Popov, V. Modeling of bending and radial hydroelastic oscillations for a sandwich circular plate resting on an inertial elastic foundation / V. Popov, A. Chernenko // *Journal of physics : conference series*. – 2021. – Vol. 1791. – P. 12–20.
22. Wang, H.-J. Axisymmetric dynamic stability of sandwich circular plates / H.-J. Wang, L.-W. Chen // *Composite structures – COMPOS STRUCT*. – 2003. – Vol. 59. – P. 99–107.
23. Zhou, D. Modal frequencies of circular sandwich panels / D. Zhou, W. Stronge // *Journal of sandwich structures and materials*. – 2006. – Vol. 8. – P. 343–357.
24. Зорич, В. А. Математический анализ. Часть I, изд. 6-е дополн. / В. А. Зорич. – М. : МЦНМО, 2012. – 710 с.
25. Новацкий, В. Теория упругости / В. Новацкий. – М. : Мир, 1975. – 872 с.
26. Маркова, М. В. Постановка начально-краевой задачи об осесимметричных колебаниях круговой трёхслойной пластины переменной толщины / М. В. Маркова, Д. В. Леоненко // *Теоретическая и прикладная механика : междунар. науч.-техн. сб.* – Минск, 2022. – Вып. 36. – С. 3–10.
27. Маркова, М. В. Инерционная математическая модель динамического деформирования круговой трёхслойной ступенчатой пластины / М. В. Маркова // *Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины*. – 2021. – № 6 (129). – С. 164–170.
28. Тонг, К. Н. Теория механических колебаний / К. Н. Тонг. – М. : Машгиз, 1963. – 351 с.
29. Араманович, И. Г. Уравнения математической физики / И. Г. Араманович, В. И. Левин. – М. : Наука, 1969. – 288 с.
30. Маркова, М. В. Собственные колебания круговой трёхслойной ступенчатой пластины / М. В. Маркова // *Механика. Исследования и инновации*. – 2021. – № 14 (14). – С. 147–158.
31. Бейтман, Г. Высшие трансцендентные функции / Г. Бейтман, А. Эрдейн. – М. : Наука, 1974. – 296 с.
32. Ватсон, Г. Н. Теория Бесселевых функций / Г. Н. Ватсон. – М. : Изд-во иностр. лит., 1949. – 799 с.
33. Деформирование ступенчатой композитной балки в температурном поле / Э. И. Старовойтов [и др.] // *Инженерно-физический журнал*. – 2015. – Т. 88, № 4. – С. 987–993.
34. Старовойтов, Э. И. Деформирование трёхслойных физически нелинейных стержней / Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко, Л. Н. Рабинский. – М. : Изд-во МАИ, 2016. – 184 с.

Краткие сообщения

УДК 575.17:599.9

Сэнгеровская эпоха ДНК-секвенирования К 100-летию дважды лауреата Нобелевской премии Фредерика Сэнгера

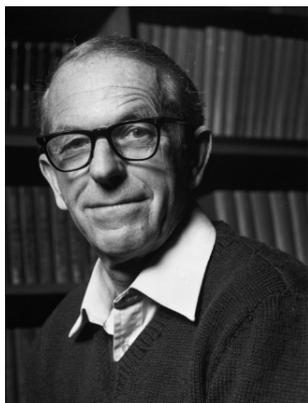
Г.Г. ГОНЧАРЕНКО

Рассмотрены основные этапы жизнедеятельности выдающегося молекулярного биолога дважды лауреата Нобелевской премии Фредерика Сэнгера. Охарактеризованы разработанные им методы секвенирования белков в ходе исследования инсулина, а так же ферментативный метод секвенирования ДНК, на основании которого расшифрованы геномы многих видов.

Ключевые слова: инсулин, секвенирования ДНК, ферментативный метод, дидезоксинуклеотиды.

The main stages of life of the outstanding molecular biologist, twice Nobel Prize winner Frederick Sanger, are considered. The methods of protein sequencing developed by him during the study of insulin are characterized, as well as the enzymatic method of DNA sequencing. By using this method genomes of many species were decoded.

Keywords: insulin, DNA sequencing, enzymatic method, dideoxynucleotides.



Фредерик Сэнгер выдающийся учёный, который **научил человечество читать белки и ДНК**. В современной молекулярной биологии и генетике устойчиво закрепилось понятие «Эпоха секвенирования Сэнгера», которая продолжается уже более 50 лет. Он является четвёртым учёным, дважды получившим Нобелевскую премию (1958, 1980 гг.). До него такой чести удостоивались только Мария Кюри, Лайнус Полинг и Джон Бардин. Сэнгер сочетал в себе блестящий талант тонкого экспериментатора, гениальное мышление, упорство и трудолюбие при поразительной скромности. Несмотря на феноменальные достижения и огромное количество званий и наград, он считал себя «академически невыдающимся» и «просто парнем, который возился в лаборатории» [1].

Фредерик Сэнгер родился 13 августа 1918 г. в английском городке Редкомб. Его отец был врачом и долгое время работал миссионером в Китае, поэтому в детстве Фредерик так же хотел связать свою судьбу с медициной. Сэнгер на год раньше срока окончил школу в Дорсеге и в 1936 г. успешно поступил в колледж Сэнт-Джонс Кембриджского университета. С тех пор вся его жизнь была связана с Кембриджем. В эти годы под влиянием молодого коллектива кафедры биохимии, основанной Ф. Хопкинсоном (Нобелевская премия 1929 г.), у Сэнгера возникает стойкий интерес к научным исследованиям.

По окончании Кембриджа в 1939 г. Сэнгер получил степень бакалавра естественных наук, а в 1943 г. – степень доктора наук. После этого он был принят в исследовательскую группу Ф. Чибналла, под руководством которого начал активно исследовать строение молекулы инсулина. В результате блестящих экспериментов ему удалось полностью установить аминокислотную последовательность инсулина (рисунок 1), за что Фредерик Сэнгер был увенчан Нобелевской премией в 1958 г. [2].

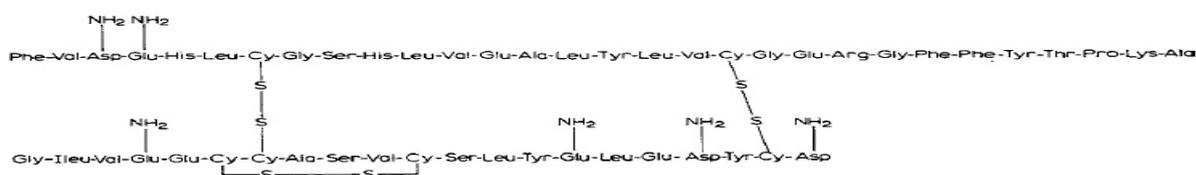


Рисунок 1 – Структура инсулина (из Нобелевской лекции Ф. Сэнгера, 1958) [2]

Через три года Сэнгер переходит во вновь созданную в Кембридже лабораторию молекулярной биологии, где начинает трудиться вместе с Перутцом, Криком, Кендрью и Хаксли.

Именно в этой творческой атмосфере он переходит к исследованию нуклеиновых кислот, что привело его к ещё одному гениальному открытию – разработке технологий секвенирования ДНК, получивших название «ферментативный метод» или «метод обрыва цепи», завершённого к 1977 г. [3].

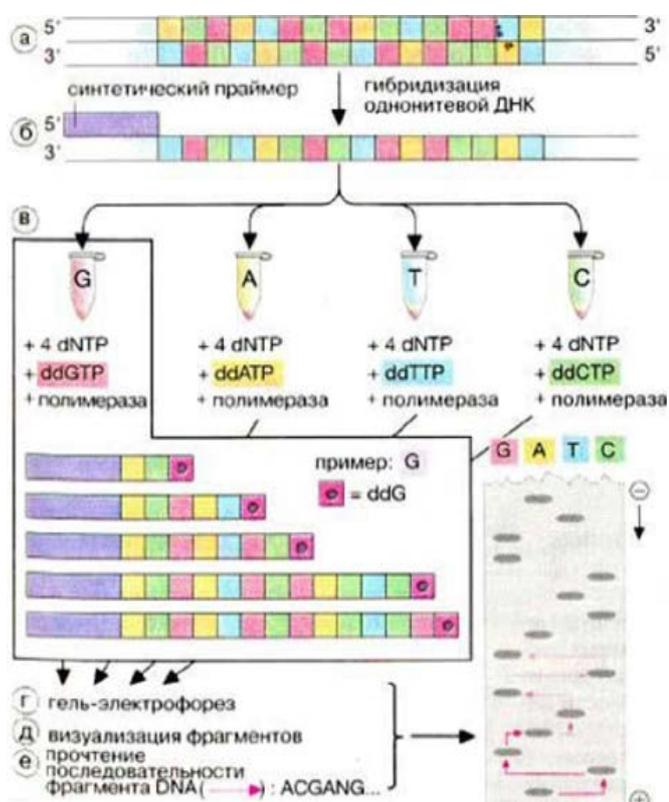


Рисунок 2 – Схематическое изображение последовательных операций секвенирования ДНК по «ферментативному методу» Сэнгера [3]

В основе метода лежит ферментативное копирование с помощью ДНК-полимеразы. В каждом из четырёх наборов реагентов, помимо всех типов нуклеотидов dNTP и полимеразы, синтез ДНК останавливается путем добавления в каждую смесь одного из дидезоксинуклеотид-фосфатов (ddATP, ddTTP, ddCTP, ddGTP), который способен прерывать растущую цепь ДНК. Полученные фрагменты ДНК разделяют методом электрофореза, в результате чего по расположению фракций определяется последовательность нуклеотидов в цепи ДНК (рисунок 2). Следует подчеркнуть, что разработку этого метода Сэнгер считал одним из главных своих достижений в науке. Именно за это открытие ему и была вручена вторая Нобелевская премия в 1980 г.

Опираясь на богатый опыт по секвенированию аминокислот в белках и на свой дидезоксинуклеотидный метод, Сэнгер в 1977 г. установил химическую формулу однонитчатой ДНК фага φX174, насчитывающий в своем составе 5375 нуклеотидов [4]. В 1981 г. установил последовательность ДНК митохондриального человека, состоящую из 16338 нуклеотидов [5], а в 1982 г. установил полную нуклеотидную последовательность бактериофага лямбда (48500 нуклеотидов) [6]. В последствии улучшенный и автоматизированный в

1986 г. Лерроем Худом с соавторами [7] метод Сэнгера позволил в лучших лабораториях мира секвенировать всю ДНК человека, состоящую из более 3 млрд. пар нуклеотидов в ходе реализации одноимённого проекта «Геном человека».

Литература

1. Sanger, F. *Autobiography. The Nobel Prize in Chemistry. 1980* [Electronic resource] / F. Sanger. – Access mode : http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1980/sanger-autibio.html. – Access date : 17.02.2022.
2. Sanger, F. *The chemistry of insulin. Nobel lecture. The Nobel Prize in Chemistry. 1958* [Electronic resource] / F. Sanger // *Les Prix Nobel en 1958*. – Stockholm, 1959. – Access mode : http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1958/. – Access date : 17.02.2022.
3. Sanger, F. *DNA sequencing with chain-terminating inhibitors* / F. Sanger, S. Nicklen, A. Coulson // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. – 1977. – Vol. 74. – P. 5463–5467.
4. Sanger, F. *Nucleotide sequence of bacteriophage phi X174 DNA* / F. Sanger, G. M. Air, B. G. Barrell [et al.] // *Nature*. – 1977. – Vol. 265 (5596). – P. 687–695.
5. Anderson, S. *Sequence and organization of human mitochondrial genome* / S. Anderson, A. Bankier, B. Barrell, M. de Bruijn, A. Coulson [et al.] // *Nature*. – 1981. – Vol. 290 (5806). – P. 457–465.
6. Sanger, F. *Nucleotide sequence of bacteriophage lambda DNA* / F. Sanger, A. Coulson, G. Hong [et al.] // *J. of Mol. Biology*. – 1982. – Vol. 162 (4). – P. 729–773.
7. Smith, L. *Fluorescence detection in automated DNA sequence analysis* / L. Smith, J. Sanders, R. Kaiser [et al.] // *Nature*. – 1986. – Vol. 321. – P. 674–679.

Характеризация конечных N_σ -критических групп

С.Ф. КАМОРНИКОВ^{1*}, В.Н. ТЮТЯНОВ²

Пусть σ – некоторое разбиение множества всех простых чисел и N_σ – класс всех σ -нильпотентных конечных групп. В работе показывается, что всякая N_σ -критическая конечная группа является группой Шмидта.

Ключевые слова: конечная группа, \mathfrak{F} -критическая группа, σ -нильпотентная группа, группа Шмидта, π -однородная группа.

Let σ be some partition of the set of all primes and N_σ be the class of all σ -nilpotent finite groups. It is proved that every N_σ -critical group is a Schmidt group.

Keywords: finite group, \mathfrak{F} -critical group, σ -nilpotent group, Schmidt group, π -homogeneous group.

*Светлой памяти
Ведерникова Виктора Александровича
посвящается*

Введение. Пусть \mathfrak{F} – некоторый класс конечных групп. Группа G называется \mathfrak{F} -критической (или критической группой класса \mathfrak{F}), если все ее подгруппы принадлежат \mathfrak{F} , а сама она не входит в \mathfrak{F} . В частности, если $F = N$ – класс всех конечных nilпотентных групп, то \mathfrak{F} -критическая группа – это группа Шмидта, т. е. ненильпотентная группа, все подгруппы которой являются nilпотентными.

В связи с изучением σ -субнормальных подгрупп конечных групп в [1] под номером 4.9 был сформулирован следующий вопрос (см. также вопрос 6.2 из [2]):

Пусть σ – некоторое разбиение множества всех простых чисел и N_σ – класс всех σ -нильпотентных конечных групп. Верно ли, что любая N_σ -критическая группа является σ -разрешимой?

В данной работе дается положительный ответ на этот вопрос. Наша главная цель – доказать следующее утверждение.

Теорема 1. *Пусть σ – некоторое разбиение множества всех простых чисел и N_σ – класс всех σ -нильпотентных конечных групп. Тогда и только тогда конечная группа G является N_σ -критической, когда G – группа Шмидта и простые делители ее порядка принадлежат различным компонентам разбиения σ .*

1. Определения и предварительные результаты.

В работе рассматриваются только конечные группы, используются определения и обозначения, принятые в [3].

Пусть $\sigma = \{\sigma_i \mid i \in I\}$ – некоторое разбиение множества всех простых чисел \mathbb{P} , т. е. $\mathbb{P} = \cup_{i \in I} \sigma_i$ и $\sigma_i \cap \sigma_j = \emptyset$ для всех $i \neq j$. Следуя [1], будем говорить, что группа G является:

- σ -примарной, если G является σ_i -группой для некоторого $\sigma_i \in \sigma$;
- σ -нильпотентной, если она является прямым произведением некоторых σ -примарных групп;

*Исследования первого автора выполнены при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (грант № 20211779 «Конвергенция – 2025»).

– σ -разрешимой, если каждый главный фактор группы G является σ -примарной группой.

Простая проверка показывает, что класс N_σ всех σ -нильпотентных групп является наследственной формацией Фиттинга. Отметим, что если $\sigma = \{\pi, \pi'\}$ для некоторого множества π простых чисел, то группа G является σ -нильпотентной тогда и только тогда, когда она π -разложима, т. е. $G = O_\pi(G) \times O_{\pi'}(G)$.

Основное строение групп Шмидта установлено в работе [4]. В частности, из [4] следует, что группа Шмидта бипримарна (т. е. ее порядок делится в точности на два различных простых числа), одна из ее силовских подгрупп является нормальной, а другая – циклической.

Пусть π – некоторое множество простых чисел. Группа G называется π -замкнутой, если она обладает нормальной холловой π -подгруппой. Следуя [5], группу G будем называть π -однородной, если для любой π -подгруппы H из G группа $N_G(H)/C_G(H)$ является π -группой.

Ключом к доказательству теоремы 1 является основной результат из [6], доказательство которого опирается на классификацию конечных простых групп. Этот результат мы приведем в виде следующей леммы.

Лемма 1. Пусть π – некоторое множество нечетных чисел. Группа G является π -однородной тогда и только тогда, когда она π' -замкнута.

Лемма 2. Для любого разбиения σ всякая N_σ -критическая группа является σ -разрешимой.

Доказательство. Предположим, что для некоторого разбиения σ лемма не верна. Пусть G – N_σ -критическая группа наименьшего порядка, которая не является σ -разрешимой. Пусть N – ее минимальная нормальная подгруппа.

Рассмотрим группу G/N . Простая проверка показывает, что все собственные подгруппы из G/N являются σ -нильпотентными. Если сама группа G/N является σ -нильпотентной, то по определению она будет σ -разрешимой. Если же G/N не является σ -нильпотентной, то она будет N_σ -критической, а потому ввиду выбора G группа G/N является σ -разрешимой. Если при этом группа G не является простой, то из условия следует, что подгруппа N σ -нильпотентна, а значит, σ -разрешима. А так как класс всех σ -разрешимых групп замкнут относительно расширений, то группа G является σ -разрешимой. Пришли к противоречию с выбором группы G .

Таким образом, G – простая группа. Тогда, исходя из условия леммы, найдется такая компонента σ_n разбиения $\sigma = \{\sigma_i \mid i \in I\}$, что $\sigma_n \cap \pi(G) \neq \emptyset$ и, кроме того, множество $\sigma_n \cap \pi(G) \neq \emptyset$ состоит из нечетных простых чисел. Пусть H – произвольная σ_n -подгруппа из G . Так как группа G является N_σ -критической и простой, то $N_G(H) \neq G$, а потому

$$N_G(H) = O_{\sigma_n}(N_G(H)) \times O_{\sigma_n'}(N_G(H)).$$

Так как подгруппа H является σ_n -подгруппой, то из

$$O_{\sigma_n'}(N_G(H)) \subseteq C_G(H)$$

следует, что $N_G(H)/C_G(H)$ – σ_n -подгруппа. Следовательно, группа G является σ_n -однородной. Но тогда по лемме 1 G является σ_n' -замкнутой группой. Пришли к противоречию с простотой группы G .

Лемма доказана.

2. Доказательство теоремы 1.

Пусть G – некоторая N_σ -критическая группа и π – такая компонента разбиения $\sigma = \{\sigma_i \mid i \in I\}$, что $\pi \cap \pi(G) \neq \emptyset$. Так как группа G не является σ -нильпотентной, то

$\pi \cap \pi(G) \neq \pi(G)$. Очевидно, группа G является $N_{\{\pi, \pi'\}}$ -критической группой. Поэтому группа G не π -разложима, но все ее собственные подгруппы являются π -разложимыми. Кроме того, ввиду леммы 2 группа G обладает главным рядом, все факторы которого являются либо π -группами, либо π' -группами. Отсюда по теореме Холла из [7] G является D_π -группой, т. е. группа G обладает по крайней мере одной холловой π -подгруппой, любые две холловы π -подгруппы группы G сопряжены и каждая π -подгруппа из G содержится в некоторой холловой π -подгруппе.

Тогда по теореме В.А. Ведерникова из [8, теорема 3] G является группой Шмидта, а потому $\pi(G) = \{p, q\}$ для некоторых простых чисел p и q . Отсюда и из $\pi \cap \pi(G) \neq \pi(G)$ следует, что либо $p \in \pi$ и $q \in \pi'$, либо $q \in \pi$ и $p \in \pi'$, т. е. простые делители порядка группы G принадлежат различным компонентам разбиения σ .

Пусть теперь G – некоторая группа Шмидта и простые делители p и q порядка группы G принадлежат различным компонентам разбиения σ . Тогда, очевидно, все собственные подгруппы группы G являются σ -нильпотентными, а сама группа G σ -нильпотентной не является.

Теорема доказана.

Литература

1. Skiba, A. N. On σ -subnormal and σ -permutable subgroups of finite groups / A. N. Skiba // J. Algebra. – 2015. – V. 436. – P. 1–16.
2. Skiba, A. N. On σ -properties of finite groups I / A. N. Skiba // Проблемы физики, математики и техники. – 2014. – № 4 (21). – С. 89–96.
3. Doerk, K. Finite soluble groups / K. Doerk, T. Hawkes. – Berlin–New York : Walter de Gruyter, 1992. – 891 p.
4. Шмидт, О. Ю. Группы, все подгруппы которых специальные / О. Ю. Шмидт // Мат. сборник. – 1924. – Т. 31, № 3–4. – С. 366–372.
5. Baer, R. Die Existenz Hallscher Normalteiler / R. Baer // Arch. Math. – 1960. – V. 11. – P. 77–87.
6. Arad, Z. A criterion for the existence of normal π -complements in finite groups / Z. Arad, D. Chillag // J. Algebra. – 1984. – V. 87. – P. 472–482.
7. Hall, P. Theorems like Sylow's / P. Hall // Proc. London Math. Soc. – 1956. – V. 6. – P. 286–304.
8. Ведерников, В. А. О π -свойствах конечных групп / В. А. Ведерников // Арифметическое и подгрупповое строение конечных групп. – Минск : Наука и техника, 1986. – С. 13–19.

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²Международный университет «МИТСО», Гомельский филиал

Поступила в редакцию 06.05.2022

Персоналии

УДК 517.2:929*В.И.Мироненко

К 80-летнему юбилею Владимира Ивановича Мироненко

М.В. СЕЛЬКИН, С.П. ЖОГАЛЬ, А.Р. МИРОТИН

В 2022 г. исполнилось 80 лет известному математику, профессору нашего университета Владимиру Ивановичу Мироненко.

Ключевые слова: В.И. Мироненко, дифференциальные уравнения, отражающая функция.

In 2022, a famous mathematician, professor of our university, Vladimir Ivanovich Mironenko, turned 80.

Ключевые слова: V.I. Mironenko, differential equations, reflecting function.



Владимир Иванович Мироненко родился 9 февраля 1942 г. в д. Бычь (ныне Октябрёво) Кормянского района Гомельской области в крестьянской семье. С серебряной медалью в 1959 г. окончил Бычанскую среднюю школу.

Сразу после окончания школы Владимир Иванович поступил на физико-математический факультет Могилевского пединститута. В своей курсовой работе он рассмотрел случай, когда уравнение Риккати может быть проинтегрировано в квадратурах. Поскольку этот случай не был описан ранее, студента Мироненко отправили на научную конференцию в БГУ. Там ему предложил поступить в аспирантуру известный белорусский и советский математик Ю.С. Богданов.

Владимир Иванович поступил в аспирантуру при кафедре дифференциальных уравнений в 1964 г. после окончания института. В том же году он был призван в ряды Советской Армии. После службы продолжил обучение в аспирантуре.

С ноября 1967 г. работал младшим научным сотрудником, старшим преподавателем, а затем доцентом кафедры высшей математики и математи-

ческой физики Белорусского государственного университета.

С 1975 по 2010 гг. заведовал кафедрой дифференциальных уравнений Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины. С 2010 г. – профессор кафедры.

Кандидатскую диссертацию на тему «Вложимые системы» защитил при Белгосуниверситете в 1970 г. под руководством профессора Богданова. Вложимыми системами диссертант назвал класс дифференциальных систем, каждое решение которых является одновременно решением некоторой линейной системы с постоянными коэффициентами. Общее решение этих нелинейных систем состоит из решений линейных систем аналогично тому, как выгнутая цилиндрическая поверхность складывается из ровных прямых.

Уже в Гомеле это понятие было обобщено. Был получен новый класс систем, который включает в себя вложимые системы, системы с алгебраическими траекториями и многие

другие. Теория этих систем изложена в монографии «Линейная зависимость функций вдоль решений дифференциальных уравнений», изданной в 1981 г. в Минске.

Работая в нашем университете, Владимир Иванович ввёл в науку дифференциальных уравнений фундаментальное понятие отражающей функции, детально разработал связанную с этим понятием теорию и методику. Отражающая функция позволяет определить будущее или прошлое состояние системы в симметричный момент времени по её состоянию в текущий момент.

Метод отражающей функции был применён Владимиром Ивановичем к изучению вопросов существования периодических решений и решений краевых задач дифференциальных систем, а также к изучению устойчивости этих решений.

Теория отражающей функции изложена в монографиях «Отражающая функция и периодические решения дифференциальных уравнений» (Минск, 1986), «Отражающая функция и исследование многомерных дифференциальных систем» (Гомель, 2004).

Сегодня ученики Владимира Ивановича разрабатывают теорию отражающей функции во многих странах. В Китае работает научная школа этого направления.

В.И. Мироненко награжден Почётной грамотой Минвуза СССР (1979 г.), нагрудным значком «За отличные успехи в работе» Минвузом СССР в 1987 г., нагрудным значком «Выдатнік адукацыі» Министерством образования Республики Беларусь (январь 2007 г.). В звании профессора утверждён в 1992 г. в России. Является заслуженным работником нашего университета (2016 г.)

С научными стажировками Владимир Иванович побывал во многих университетах мира. Это Ягеллонский университет (г. Краков, Польша), (10.1968–08.1969); Московский государственный университет им. В.М. Ломоносова (1972); Имперский колледж Лондонского университета (09.1977–02.1978); Московский государственный университет им. В.М. Ломоносова (1979, 1981, 1985); Новосибирский государственный университет (1991).

Под руководством профессора Мироненко успешно защитили кандидатские диссертации аспиранты из Беларуси, России, Китая.

Выступал на международных научных конференциях в Беларуси, Болгарии, Китае, Литве, Польше, России, Узбекистане, Украине, Чехословакии, Эстонии.

Имя Владимира Ивановича Мироненко регулярно вносится в ряд американских энциклопедий серии «Who's Who», в изданиях Кембриджского биографического центра. Это имя можно найти и в Британском энциклопедическом словаре, и в Белорусской энциклопедии.

Исключительная эрудиция, обширный кругозор, восприимчивость к новизне наряду с глубокими классическими знаниями отличают этого человека.

В восьмидесятилетний юбилей профессора Мироненко коллектив Гомельского государственного университета выражает ему самые тёплые пожелания. Мы желаем Владимиру Ивановичу крепкого здоровья, неизменного процветания и долгих лет благополучной жизни. Пусть его интеллект остаётся таким же острым, дух таким же бодрым, а творческая энергия – такой же неиссякаемой!

Технический редактор: *О.Г. Шляхтова*. Корректоры: *В.А. Бобрик, И.А. Хорсун*

Подписано в печать 06.06.2022. Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 15,81. Уч.-изд. л. 13,77. Тираж 100 экз. Заказ № 300.
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.