

ИЗВЕСТИЯ

Гомельского государственного университета
имени Ф. Скорины

Естественные науки

№ 6 (87)

Гомельский государственный университет
имени Ф. Скорины

ИЗВЕСТИЯ

Журнал зарегистрирован в Министерстве информа-
ции Республики Беларусь
(свидетельство о регистрации
№ 1/87 от 18.11.2013 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 А.В. РОГАЧЕВ, д-р хим. наук,
профессор, член-корр. НАН Беларуси
Зам. главн. редактора О.М. ДЕМИДЕНКО,
д-р тех. наук, профессор
Зам. главн. редактора М.В. СЕЛЬКИН,
д-р физ.-мат. наук, профессор

Члены редакционной коллегии:

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

Члены редакционной коллегии по естественным наукам:

В.Ф. Багинский, д-р биол. наук, проф., член-корр.
НАН Беларуси
А. Баллистер-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.В. Кириченко (Украина), 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:
246019, Беларусь, Гомель, ул. Советская, 104,
Телефоны: +375 (232) 60-73-82
E-mail: vesti@gsu.by
Интернет-адрес: <http://vesti.gsu.by>

Francisk Scorina Gomel State University

PROCEEDINGS

The Journal is registered in the Ministry of Information of
Republic of Belarus
(registration certificate
number 1/87 dated 18.11.2013)

The Journal is included in the Republic of Belarus
Higher Attestation Commission list of scientific publica-
tions of the Republic of Belarus, which publish the main
results 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 A.V. Rogachev, Sc. D. Professor, Cor-
responding Member NASB
Deputy editor-in-chief O.M. DEMIDENKO,
Sc. D., Professor
Deputy editor-in-chief M.V. SELKIN,
Sc. D., Professor

Members of editorial board:

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

Members of editorial board for the natural sciences

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.V. Kirichenko (Ukraine), Sc. D., Professor
V.P. Kudin, 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:
246019, Belarus, Gomel, Sovetskaya Str., 104,
Tel: +375 (232) 60-73-82
E-mail: vesti@gsu.by
Site: <http://vesti.gsu.by>

ИЗВЕСТИЯ

Гомельского государственного университета
имени Ф. Скорины

НАУЧНЫЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с 1999 г.
Выходит 6 раз в год

• 2014, № 6 (87) •

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

СОДЕРЖАНИЕ

Биология

Абрамова И.В., Гайдук В.Е. Структура и динамика численности гусей в период миграций в юго-западной Беларуси.....	5
Галиновский Н.Г., Крицкая А.Н. Жужелицы (Coleoptera, Carabidae) урбоценозов города Гомеля	12
Гончаренко Г.Г., Кураченко И.В., Зяцьков С.А. Жизненный цикл возбудителей диплостомоза.	21
Горбняк Л.Т. Особенности географического распространения <i>Pulsatilla grandis</i> Wender. (<i>Ranunculaceae</i>) в Европе.....	23
Гулаков А.В., Пенькевич В.А. Клинико-физиологическое состояние и структура паразитоценоза дикого кабана, обитающего на территории радиоактивного загрязнения.....	28
Дайнеко Н.М., Тимофеев С.Ф., Жадько С.В. Оценка состояния пастбищных экосистем поймы р. Припять Мозырского района.....	35
Ковалева О.В. Таксономическое и трофическое разнообразие зоопланктона малой реки в условиях поступления в нее очищенных сточных вод.....	40
Концевая И.И. Влияние тидиазурона на регенерационную способность листовых экплантов в культуре тканей редких видов рода <i>Betula</i> L.	46
Огородник А.Н., Григорьева Л.И., Томилин Ю.А. Экологическая безопасность и прогнозирование процесса ветровой эрозии на техногенных территориях.....	51
Рассашко И.Ф., Можаровская А.А. Разнообразие и структура региональной малакофауны разнотипных водных экосистем.....	55
Саварин А.А., Молош А.Н. О проблемах изучения экологии и видовой диагностики кутор (<i>Neotus</i> , <i>Soricidae</i>), обитающих на территории Беларуси.....	63
Соколов А.С. Оценка трансформации природной среды и геоэкологическое районирование Беларуси.....	69
Тимофеева Т.А. Дифференциация биогеохимических и агрохимических показателей различных фаций пойменных ландшафтов (на примере поймы р. Сож).....	75
Тюлькова Е.Г. Экспериментальная оценка содержания цинка и меди в организме сизых голубей.....	82
Храмченкова О.М., Бачура Ю.М. Цианобактериальный комплекс низкопродуктивных земель, переданных под лесные культуры.....	88
Цветкова Е.А., Ухарцева И.Ю., Арастович Т.В. Ферментативный способ получения казеина с использованием культуры дрожжей <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	96

Чеховский А.Л. <i>Обоснование применения компонентов радонового показателя для картирования радонового потенциала</i>	100
ИНФОРМАТИКА	
Быховцев В.Е., Киргинцева С.В. <i>Приближенный аналитический метод определения осадки свай-РИТ в грунтовом основании</i>	107
Воруев А.В., Кулинченко В.Н. <i>Диагностика беспроводных соединений локальных вычислительных сетей</i>	112
Демиденко О.М., Хобня А.И. <i>Концептуальная модель генерации VoIP трафика в сети NGN</i> . Жердецкий Ю.В. <i>Вероятностно-алгебраические модели технологических систем производства с элементами потенциальной опасности</i>	117
Проккопенко Д.В., Быховцев В.Е., Киргинцева С.В. <i>Аналитический метод определения несущей способности свай-РИТ в грунтовом основании</i>	129
Ратобыльская Д.В. <i>Технология автоматизированного вероятностно-алгебраического моделирования систем сетевого типа</i>	133
Хобня А.И. <i>Сравнительный анализ подходов к моделированию трафика в сетях передачи данных</i>	139
МАТЕМАТИКА	
Васильев А.Ф., Халимончик И.Н. <i>О гиперрадикальных формациях в классе конечных групп \mathfrak{X}</i>	144
Воробьев Н.Т., Семенов М.Г. <i>Множества Фиттинга и инъекторы конечной группы</i>	149
Каморников С.Ф. <i>Об одном свойстве формации всех p-нильпотентных групп</i>	156
Можаровский В.В., Кузьменков Д.С. <i>Численная реализация методики по определению напряжений и перемещений в объёмном теле применительно к техническим приложениям</i> ...	161
Монахов В.С., Чирик И.К. <i>О произведении обратимых элементов кольца классов вычетов</i> ...	166
Пыпка А.А. <i>Аналоги теорем Шура и Бэра для некоторых локально конечных групп</i>	169
Селькин В.М. <i>О собственных подформациях однопорожжденной τ-замкнутой ω-насыщенной формации</i>	174
Ходанович Д.А. <i>О p-разрешимости конечной группы с заданными индексами некоторых максимальных подгрупп</i>	177
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ	
Кубрак А.Н., Борисов П.С. <i>Метод формирования структурных помех для подавления систем радиосвязи с шумоподобными сигналами</i>	182
Кудин В.П. <i>Линейная антенная система коротковолнового диапазона на основе излучателей типа «бабочка»</i>	187
Фаняев И.А., Кудин В.П. <i>Фазированная антенная решетка кругового обзора над проводящей цилиндрической поверхностью из излучателей вертикальной поляризации</i>	191
ФИЗИКА	
Андреев В.В., Гавриш В.Ю. <i>Электромагнитные распады легких векторных мезонов</i>	199
Бабич К.С., Андреев В.В., Курилин А.С. <i>Релятивистское обобщение корнельского потенциала: непертурбативная часть</i>	205
Пинчук В.Г., Ковалев Е.А., Короткевич С.В. <i>Микроструктурные критерии разрушения при взаимодействии поверхности металлов и смазочной среды при трении</i>	211
Цянь Сонгсонг, Подалов М.А., Семченко И.В., Хахомов С.А. <i>Параметрическое моделирование оптимальных омега-элементов, обеспечивающих преобразование поляризации СВЧ волны метаповерхностью</i>	215
Шершнева Е.Б., Никитюк Ю.В., Соколов С.И., Шершнева А.Е. <i>Особенности лазерного раскалывания кристаллического кварца АТ- и ВТ-срезов</i>	220
Шнейдеров Е.Н., Боровиков С.М., Бурак И.А. <i>Выбор модели деградации функционального параметра изделий электронной техники</i>	225

PROCEEDINGS

of Francisk Scorina Gomel state university

SCIENTIFIC, PRODUCTION AND PRACTICAL JOURNAL

There are 6 times a year
Published since 1999.

• 2014, № 6 (87) •

NATURAL SCIENCES:

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

CONTENTS

BIOLOGY

I.V. Abramov, V.E. Gaiduk. <i>Structure and dynamics of the number of geese in the period of migration in southwestern Belarus</i>	5
N.H. Halinowski, A.N. Krytskaya. <i>Ground beetles (Coleoptera, Carabidae) of urbocenoses of Gomel</i>	12
G.G. Goncharenko, I.V. Kurachenko, S.A. Zyatkov. <i>The life cycle of diplostomoz pathogens ...</i>	21
L.T. Horbnyak. <i>Peculiarities of the geographical distribution of Pulsatilla grandis Wender. (Ranunculaceae) in Europe</i>	23
A.V. Gulakov, V.A. Penkevich. <i>Clinical-physiological state and structure of parasitocenoses of the wild boar living in the territory of radioactive contamination</i>	28
N.M. Dayneko, S.F. Timofeev, S.V. Zhadko. <i>Assessment of the state of pasture ecosystems of the floodplain of the Pripyat River in Mozyr region</i>	35
O.V. Kovalyova. <i>Taxonomic and trophic diversity of zooplankton in a small river in the conditions of receipt to it the cleared sewage</i>	40
I.I. Kontsevaya. <i>Effect of thidiazuron on the regenerative capacity of leaf explants in tissue culture of rare species of the genus Betula L.</i>	46
A.N. Ohorodnyk, L.I. Grigoreva, Y.A. Tomilin. <i>Environmental security and forecasting of the process of wind erosion on the technological areas</i>	51
I.F. Rassashko, A.A. Mozharovskaya. <i>Diversity and structure of regional malacofauna of different types of aquatic ecosystems</i>	55
A.A. Savarin, A.N. Molosh. <i>On the problems of studying the ecology and species diagnosis of shrews (Neomys, Soricidae), living on the territory of Belarus</i>	63
A.S. Sokolov. <i>Estimation of transformation of the natural environment and geo-ecological zoning of Belarus</i>	69
T.A. Timofeeva. <i>Differentiation of biogeochemical and agrochemical parameters of different fascia of the floodplain landscapes (for example, floodplain of the Sozh river)</i>	75
E.G. Tyulkova. <i>Experimental evaluation of the content of zinc and copper in the body of blue rock pigeons</i>	82
O.M. Khranchenkova, Y.M. Bachura. <i>Cyanobacterial complex of low-productive land transferred to forest plantations</i>	88
E.A. Tsvetkova, I.Yu. Ukhartseva, T.V. Arastovich. <i>Enzymatic means of obtaining casein using Saccharomyces cerevisiae yeast culture</i>	96

A.L. Chekhovsky. <i>Justification for the use of the components of radon index for radon potential mapping</i>	100
INFORMATION TECHNOLOGY	
V.E. Bykhautsau, S.V. Kirhintsava. <i>Approximate analytical method of definition of a precipitation of piles-RIT in the soil basis</i>	107
A.V. Voruev, V.N. Kulinchenko. <i>Diagnosis of wireless local area network connections</i>	112
O.M. Demidenko, A.I. Hobnya. <i>Conceptual model for the generation of VoIP traffic in the NGN</i> ..	117
Y.V. Zherdetsky. <i>Probabilistic and algebraic models of technological production systems with elements of potential danger</i>	123
D.V. Prokopenko, V.E. Byhovtsev, S.V. Kirgintseva. <i>Analytical method for determining the bearing capacity of the pile-RIT in subgrade</i>	129
D.V. Ratobylskaya. <i>The technology of automated probabilistic and algebraic modeling of network type</i>	133
A.I. Hobnya. <i>Comparative analysis of approaches to traffic modeling in data networks</i>	139
MATHEMATICS	
A.F. Vasiliev, I.N. Halimonchik. <i>On hyperradical formations in the class of finite groups \mathfrak{X}</i> ..	144
N.T. Vorobjov, M.G. Semenov. <i>Fitting sets and injectors of a finite group</i>	149
S.F. Kamornikov. <i>On a property of the formation of all p-nilpotent groups</i>	156
V.V. Mozharovsky, D.S. Kuzmenkov. <i>Numerical implementation of the procedure for determination of stresses and displacements in bulk body in relation to the technical annexes</i> ..	161
V.S. Monakhov, I.K. Chirik. <i>On the product of invertible elements of the residue class</i>	166
A.A. Pypka. <i>Analogues of theorems of Schur and Baer for some locally finite groups</i>	169
V.M. Selkin. <i>On own subformations of one-generated τ-closed ω-saturated formation</i>	174
D.A. Khodanovich. <i>On the p-solvability of finite groups with given indices of some maximal subgroups</i>	177
TECHNOLOGY AND COMMUNICATION	
A.N. Kubrak, P.S. Borisov. <i>Method of forming structural interference suppression for radio systems with noise-like signals</i>	182
V.P. Kudin. <i>Excitation of a plane with a variable impedance</i>	187
I.A. Fanyaev, V.P. Kudin. <i>Phased antenna array of circular view above the conductive cylindrical surface of the radiator with vertical polarization</i>	191
PHYSICS	
V.V. Andreev, V.Y. Gavrish. <i>Electromagnetic decays of light vector mesons</i>	199
K.S. Babich, V.V. Andreev, A.S. Kurilin. <i>Relativistic generalization of the Cornell potential: nonperturbative part</i>	205
V.G. Pinchuk, E.A. Kovalev, S.V. Korotkevich. <i>Microstructural fracture criteria for the interaction of metal surfaces and the lubricant by friction</i>	211
Qian Songsong, M.A. Podalov, I.V. Semchenko, S.A. Hahomov. <i>Parametric modeling of optimal omega-elements to ensure the transformation of the polarization of the microwave by meta surface</i>	215
E.B. Shershnev, Y.V. Nikitjuk, S.I. Sokolov, A.E. Shershnev. <i>Features of laser splitting of crystal quartz AT- and BT- cuts</i>	220
E.N. Schneiderov, S.M. Borovikov, I.A. Burak. <i>Model degradation selection of a functional parameter of electronic devices</i>	225

БИОЛОГИЯ

УДК 598.252

Структура и динамика численности гусей в период миграций в юго-западной Беларуси

И.В. АБРАМОВА, В.Е. ГАЙДУК

На основании многолетних данных (1967–2014 гг.) приведены сроки миграций и динамика численности 4 видов гусей (*Anser anser L.*, *Anser albifrons Scop.*, *Anser fabalis Lath.*, *Anser erythropus L.*) в юго-западной Беларуси. Сроки миграций гусей весной приходятся на третью декаду февраля – вторую декаду апреля, осенью на третью декаду сентября – первую декаду ноября. В последние годы первые пролетные стаи гусей чаще регистрировали во второй–третьей декадах февраля. Доминантом на весенней миграции в долинах рек Мухавец, Лесная и Гривда является белолобый гусь, на долю которого приходится 63,6 % стай и 64,8 % особей от всех видов гусей; осенью на пролетах доминирует гуменник – соответственно 45,2 и 47,7%, несколько ниже эти показатели у белолобого гуся. Пискулька – очень редкий малочисленный пролетный вид, за весь период исследований было зарегистрировано 4 стаи весной (37 особей) и 2 стаи осенью (23 особи).

Ключевые слова: миграция, стая, особь, вид, птица.

Timing of migration and population dynamics of four species of geese (*Anser anser L.*, *Anser albifrons Scop.*, *Anser fabalis Lath.*, *Anser erythropus L.*) in south-western Belarus are given on the basis of data (1967–2014). Timing of migration of geese in spring is on the third decade of February – the second decade of April, in autumn on the third decade of September – early November. In recent years, the first span flocks of geese are often recorded in the second or third decade of February. Dominant in the spring migration in the river valleys Mukhavets, Forest and Grivda is white-fronted goose, which accounts for 63.6 % of flocks and 64.8 % of individuals of all species of geese; in autumn spans dominated Bean – respectively 45.2 and 47.7 %, somewhat lower than the figures in the white-fronted goose. Piskulka – very rare thin migrating species, during the study period there were recorded 4 flocks in spring (37 individuals) and two flocks in autumn (23 individuals).

Keywords: migration, flock, individual, species, bird.

Введение. На миграциях в юго-западной Беларуси отмечены 4 вида гусей: серый гусь (*Anser anser L.*), белолобый гусь (*Anser albifrons Scop.*), гуменник (*Anser fabalis Lath.*) и пискулька (*Anser erythropus L.*). Весенняя миграция проходит с третьей декады февраля до второй декады апреля, осенняя – с третьей декады сентября до второй декады ноября. Доминантом на весенней миграции является белолобый гусь (64,8% особей), на осенней – гуменник (47,7% особей).

Миграциям птиц в Беларуси и других странах в последние 40 лет уделяется большое внимание, о чем свидетельствует подписанная в 1973 г. Боннская конвенция по сохранению диких видов мигрирующих животных, к которой в 2003 г. присоединилась Республика Беларусь.

Миграции птиц регулируются во времени цирканными ритмами, которые синхронизируются с ходом астрономического времени фотопериодом [1]–[3]. Он определяет у многих птиц умеренных и высоких широт время наступления общего миграционного состояния, но прямой сигнал к миграции связан с метеорологическими условиями или доступностью корма. Эндогенная программа сезонных ритмов особенно отчетливо прослежена у птиц, которые зимуют близ экватора, где фотопериод практически не изменяется.

Фотопериодическая регуляция цирканых ритмов миграционного состояния у разных экологических групп птиц имеет свои особенности [2]. У мигрантов умеренных широт весеннее миграционное состояние формируется и поддерживается под воздействием фотопериода в местах зимовок и заканчивается с приближением на места гнездования. Осеннее миграционное состояние формируется на основе автоматического отсчета времени от окончания унифакториальной фазы фотопериодического контроля.

Сведения о сроках миграций многих видов птиц Беларуси в XX в. приведены в монографиях [4], [5]. В последнее десятилетие орнитологи Беларуси и других стран начали более интенсивно изучать миграцию птиц, в большем объеме проводить кольцевание мигрирующих птиц. В работе коллектива орнитологов республики [6] рассматриваются особенности миграций водно-болотных птиц, включая и гусей. Показано, что в 1994–1995 гг. основная масса птиц этого комплекса мигрировала по Полесскому пролетному пути, вдоль долины р. Припять. Роль Полесья, центральной осью которого является пойма р. Припять, для евро-азиатско-африканских миграций водно-болотных видов птиц показана в ряде работ [7], [8].

Сроки миграции отдельных видов птиц в регионе приведены в публикациях авторов данной статьи [9], [10]. По юго-западу Беларуси пролегают миграционные маршруты четырех видов гусей: серого гуся (*Anser anser L.*), белолобого гуся (*Anser albifrons Scop.*), гуменника (*Anser fabalis Lath.*) и пискульки (*Anser erythropus L.*). Благодаря исследованиям многих орнитологов установлено, что большая часть гусей, зимующих в Европе, осенью мигрирует вдоль Балтийского побережья, а весной возвращается на места гнездования более южным путем.

Материалы и методы. Сбор материалов по миграциям гусей проводили в 1967–2014 гг. на территории Брестской области. Регулярные наблюдения за видимыми миграциями гусей вели в 1975–2013 гг. на двух стационарах: г. Брест и его окрестности (долина р. Мухавец и р. Лесная), окр. д. Любищицы Ивацевичского р-на (долина р. Гривда). Следует отметить, что стационары находятся в полосе миграции гусей, но не на центральном миграционном пути, которым является пойма р. Припять. Этим объясняется относительно небольшое количество зарегистрированных стай и особей гусей. В различные годы наблюдения за миграциями гусей региона проводили в долинах рек Западный Буг, Припять, Ясельда, на озерах Выгонощанское, Бобровичское, Ореховское, Олтушское; рыбхозах Страдочь, Селец, Новоселки, Локтыши и других местах. Учитывались все виды гусей, как транзитно пролетающие, так и останавливающиеся на ночевку или кормежку в полосе около 1,5 км. Определяли видовой состав гусей, количество особей в стае, а также дату, время и высоту пролета стай. В тех случаях, в которых видовой состав мигрирующих стай не был установлен, гусей относили к группе *Anser sp.* В период миграций наблюдения на стационарах вели не менее 4 раз в сезон на каждом из них. При определении сроков миграции гусей использовали визуальные и акустические наблюдения в течение суток в любой точке региона, включая и стационары. При специальных исследованиях миграции гусей наблюдения проводили за 30 минут до восхода солнца, их длительность составляла 4–6 часов. В период массового пролета птиц наблюдения в некоторые дни вели в течение всего светлого времени суток. При изучении миграции птиц использовали оптику: бинокль – 10×50, зрительную трубу – 25–100×60. В сборе материалов принимали участие преподаватели, студенты и выпускники биологического и географического факультетов БрГУ имени А.С. Пушкина (А.Н. Кравчук, А.Н. Кивачук, С.И. Абрамчук, А.И. Вальчук и др.), а также многие охотники (В.А. Жук, А.С. Завальнев, В.Н. Майко и др.), за что авторы выражают им благодарность.

Результаты и их обсуждение. Юго-западная Беларусь занимает одно из ключевых мест в системе евро-азиатско-африканских миграций водно-болотных и околородных птиц, которыми являются гуси. Районы гнездования белого гуся и гуменника располагаются на севере и северо-востоке России. Серый гусь распространен в большей части Палеарктики. Зимует в западной и южной Европе, северной и восточной Азии [11]. В последние годы в Беларуси гнездится небольшое количество серых гусей (100–200 пар) [12], в юго-западной ее части – 20–40 пар [9]. Ареал гнездования пискульки разорван, он охватывает крайний север Палеарктики. Зимует в западной, центральной и юго-восточной Европе и других регионах [11]. На зимовку гуси мигрируют по так называемому «Полесскому широтному миграционному пути». По этому пути летят белолобый гусь, гуменник и др., которые зимуют в странах западной и центральной Европы (Великобритания, Дания, Франция, Германия и др.). По данным А.М. Полуца [7], только через украинскую часть Полесья в период весенней миграции пролетает более 100 тыс. особей белолобых гусей, интенсивность пролета гуменника в 5–10 раз ниже.

Картина миграции гусей сложная. Гуси пролетают через регион широким фронтом. Значительная часть птиц концентрируется вдоль экологических русел: долины рек Припять, Мухавец; озер Выгонощанское, Бобровичское, Ореховское, Олтушское; рыбхозов – Страдочь, Селец, Новоселки,

Локтыши. Гуси пролетают через регион в основном без остановок, отдельные стаи останавливаются на отдых и кормежку на несколько дней и недель. На некоторых водоемах (озера, рыбхозы, водохранилища) образуют значительные скопления, достигающие сотни и тысячи особей [9]. В заказнике «Средняя Припять» в конце XX в. регистрировали 2–10 тыс. гуменников, 10–30 тыс. белолобых гусей, 50–250 особей пискульки и 20–500 особей серых гусей [13].

В ходе исследований в период миграций на стационарах мы регистрировали все 4 вида гусей, встречающиеся в Беларуси. Сведения о количестве мигрирующих стай и особей гусей в 1975–2013 гг. приведены в таблице 1. Отметим, что в значительной части стай мигрирующих гусей видовой состав не был определен. Единичные встречи с пискулкой указаны в тексте.

За весь период наблюдений в окрестностях г. Бреста весной зарегистрирована 31 стая серого гуся, осенью – 27 стай. Весной вид не регистрировался в 43,6 % сезонов, осенью – в 51,3 % сезонов. В стаях весной было 708 особей, средняя величина стаи равна 22,8 особей (размах вариации от 3 до 80 особей). Осенью количество пролетающих птиц было несколько меньше (510 особей), средняя величина стаи равна 18,9 особей (от 2 до 76 особей в одной стае).

В пойме р. Гривда было встречено 25 стай весной и 23 стаи осенью. В пяти сезонах (12,8 %) весной наблюдения не проводились. В 16 сезонах (41,0 %) мигрирующие серые гуси не встречались. Здесь было отмечено 592 особи. Средние размеры стаи весной составляли 23,7 особей, с вариациями от 5 до 60 особей. Осенью средние размеры стаи составляли 21,4 особей, количество особей в одной стае изменялось в пределах 3–50 особей. Весной на долю мигрирующих серых гусей приходится 12,1 % от общего числа мигрирующих стай и 8,0 % от общего количества особей. Осенью эти показатели соответственно равны 8,3 и 9,7 % (таблица 2). Стаи серых гусей ($n = 98$, 2156 особей), которые регистрировались весной вне стационаров, состояли из 3–70 особей, в среднем 22. Осенью было встречено 126 стай, состоящих из 2–68 особей, в среднем 28,5 (общее количество составило 3590 особей).

Весной миграция гусей в регионе происходит 28 февраля–10 апреля, в среднем 12 марта; осенью – 20 сентября–5 ноября, в среднем 15 октября [10]. В первой половине XX в. самый ранний срок прилета гусей в Беловежской пуще был зарегистрирован 15 февраля 1957 г., самый поздний – 30 марта 1956 г., в среднем за 12 лет – 13 марта [4]. Эти данные несколько отличаются от данных В.А. Дацкевича [15], по сведениям которого самая ранняя дата весеннего пролета гусей в 1945–1985 гг. была 28 февраля, самая поздняя – 10 апреля, средняя 19 марта. Осенняя миграция гусей происходила 3 сентября–23 октября, в среднем 28 сентября. В 1994 г. в Беловежской пуще было учтено 260 особей белолобого гуся, даты первых регистраций приходились на 9 марта [6].

Гуси в окрестностях озера Выгоновское в 1961–1964 гг. пролетали район озера транзитом. В период их миграций озеро довольно часто бывает покрыто льдом, однако и в пойме р. Щара, всегда разливающейся к этому времени останавливаются очень редкие стаи гусей. На осеннем пролете гуси также пролетают в основном транзитом [16].

В 1992–2002 гг. в период весенней миграции в Шацком Поозерье серый гусь регистрировался с 17 по 26 марта. Пик миграции приходился на середину марта, окончание – на начало апреля. Весной 2001–2002 гг. первые мигрирующие гуси появились 7 февраля [17].

Белолобый гусь в Беларуси – многочисленный транзитно мигрирующий вид [4]. Весной наибольшее скопление птиц регистрируется в поймах рек Припять и Сож, осенью интенсивная миграция отмечается в северных и центральных частях Беларуси [6]. В середине XX в. в регионе он являлся немногочисленным пролетным видом [4]. По данным В.А. Дацкевича [15], белолобый гусь на пролетах в 1945–1985 гг. в Беловежской пуще встречался ежегодно. Сроки миграции схожи с таковыми серого гуся.

В окрестностях г. Бреста нами этот вид был отмечен на весеннем (200 стай, 7144 особи) и осеннем пролете (67 стай, 2816 особей). Размеры стай весной колебались от 2 до 110 особей, в среднем 35,7; осенью – от 4 до 96, в среднем 42 особи (таблица 1). Стаи белолобых гусей не были встречены в 25,6 % сезонов весной и в 43,6 % сезонов осенью. В пойме р. Гривда было зарегистрировано 93 стаи белолобых гусей весной и 33 стаи осенью. Средние размеры стай весной составляли 36,5 особи, с колебаниями от 3 до 80, осенью – из 47,3 особи (2–75 особей).

Стаи птиц не регистрировались в 43,3 % сезонов весной и 51,9 % сезонов осенью. Белолобый гусь доминирует на весенней миграции на обоих стационарах, как по числу регистрируемых стай (63,6 %), так и по количеству особей (64,8 %); осенью он несколько уступает гуменнику (таблица 2). Весной размеры стай белолобого гуся ($n = 202$, 8844 особи), встреченных вне стационара, варьировали в пределах 3–110 особей, в среднем 44,0 особи, осенью (192 стаи, 8102 особи) – в пределах 2–90 особей, в среднем 46,2 особи.

Таблица 2 – Количество стай и особей (%) мигрирующих гусей в юго-западной Беларуси

Вид	Весна		Осень	
	Число стай	Число особей	Число стай	Число особей
<i>Anser anser</i>	56	1300	50	1002
<i>Anser albifrons</i>	293	10457	100	4378
<i>Anser fabalis</i>	112	4399	124	4903
Всего	461	16156	274	10283

Средние многолетние сроки миграции белолобых гусей в юго-западной Беларуси приходятся на 14.03 (22 февраля–08 апреля), осенью – на 13 октября (21 сентября–04 ноября) [10]. В отдельные годы весной (1975, 1981, 1984, 1996 гг. и др.) и осенью (1981, 1995 гг. и др.) белолобые гуси задерживались на 2–5 и более дней в микрорайоне «Ковалево» (г. Брест), в поймах рек Лесная, Мухавец, Гривда, Припять и др. [9].

Гуменник в Беларуси – обычный транзитно мигрирующий вид [4]. Весной миграция гусей в регионе приходится на 23 февраля–29 марта, в среднем 14 марта; осенью на 24 сентября–3 ноября, в среднем на 10 октября [10]. Сведения о миграции гуменника в Беларуси до середины XX в. приведены в монографии [4]. Показано, что в Беловежской пуще начало весеннего пролета приходится на 27 февраля, пролет гусей в Беларуси протекает с 1 марта по 21 апреля. Во время пролета птицы летят на высоте 200–300 м, стаями по 20–40 особей, реже 60–100. В.А. Дацкевич [15] указывал, что к началу XX в. гуменник в Беловежской пуще стал очень редок, а в отдельные годы на пролетах отсутствовал.

В пойме рек Мухавец и Лесная было выявлено 60 стай весной и 71 стая осенью, при этом в 33,3 % сезонов стаи не регистрировались весной и в 28,2 % осенью. В среднем размеры стай состояли из 40 птиц весной и 37,8 осенью. В пойме р. Гривда было встречено 50 стай весной и 54 стаи осенью, размеры которых варьировали весной в пределах 5–86 особей, в среднем 40,0; осенью – в пределах 4–94, в среднем 41,9 особи. Птицы пролетали на высоте 150–300 м. В 25,6 % сезонов весной и 35,9 % сезонов гуменник на миграции не был зарегистрирован.

Стаи гуменника ($n = 186$, 8835 особей), встреченные весной вне стационаров, состояли из 5–110 особей, в среднем 47,5; стаи гусей ($n = 152$, 7296 особей) на осенней миграции состояли из 8–78 особей, в среднем 43,0. Гуменник как по числу регистрируемых стай, так и по количеству особей на весеннем пролете несколько уступает белолобому гусю, осенью он доминирует (таблица 2).

Пискулька в Беларуси – очень редкий транзитно мигрирующий вид. Сведения о миграции этих птиц скудные и фрагментарные [4]. Нами за период наблюдений вид регистрировался 4 раза весной и 2 раза осенью (2 апреля 1996 г. в пойме р. Гривда 15 особей, 26 марта 1998 г. в пойме р. Мухавец 8 особей, 10 апреля 2011 г. в пойме р. З. Буг 6 особей, 28 марта 2005 г. в пойме р. Мухавец 8 особей, 18 октября 1999 г. в пойме р. Мухавец 5 особей, 10 октября 1996 г. в пойме р. Гривда 3 особи) [9].

За период наблюдений в регионе нами зарегистрировано 1890 стай гусей (80514 особей), видовой состав которых не был определен. Средняя величина этих стай состояла из 2,6 особей, с вариациями от 3 до 125.

Изучение соотношения численности видов гусей на весенней миграции показало [6], что в Беловежской пуще и Припятском заповеднике доминировал белолобый гусь (84 %), доля гуменника составила 13,2 %, серый гусь и пискулька представлены незначительно (по 1,6 %). В 2007 г. с 14.03 по 24.05 в пункте «Лоев» (окр. д. Абакумы Лоевского р-на Гомельской области) были зарегистрированы все 4 вида мигрирующих гусей, общей численностью 23267 особей.

Доминировал белолобый гусь (78,9 %), на долю гуменника приходилось 17,2 %, серого гуся – 3,9 %, пiskuльки – 0,03 % [18]. Эта группировка гусей мигрирует по долинам рек Сож и Днепр, которые являются продолжением Днепроовского миграционного пути. Весной основным направлением миграции птиц является северное, а осенью – южное [7], [18].

Весной 1994 г. в Беловежской пуще доля мигрирующих на восток стай гусей составило 83,3 %; на северо-восток – 12,0 % и на север – 5,0 %. В центральной части республики гуси мигрируют весной на северо-восток, а осенью – на юго-запад широким фронтом. Размеры стай гусей в весенний период составляют $43,7 \pm 4,0$ особей. Птицы летят на высоте $84,2 \pm 5,9$ м [6].

По нашим данным (1680 стай), мигрирующие гуси весной придерживаются в основном восточного направления – 81,0 %, северо-восточное направление выбирает 13,0 % гусей и 6,0 % северное направление.

В обычные дни наибольшая интенсивность мигрирующих гусей наблюдается в первые 4 часа после восхода солнца. В дни массовых миграций они летят с одинаковой интенсивностью практически в течение всего дня, часть птиц мигрирует ночью. Это отмечали многие орнитологи в других регионах. Массовый пролет гусей длится 10–15 дней. В некоторые сезоны гуси длительное время, иногда до середины мая задерживаются в Беларуси в бассейне р. Припять и др. в наиболее удобных для кормежки и отдыха местах.

Некоторое представление о сроках миграций и соотношениях численности мигрирующих гусей (транзитно пролетающие птицы не учитывались) дает анализ данных об их скоплении на рыбхозах Брестского Полесья. На рыбхозе «Локтыши» в 2003, 2008–2009 гг. в период осенней миграции было зарегистрировано 3 вида гусей. Максимальная численность за один учет у гуменника весной составила 5 особей, осенью – 100 особей; у белолобого гуся соответственно 291 и 20 особей; серый гусь регистрировался только весной [19].

На рыбхозе «Новоселки» в 2002–2006 гг. максимальная численность гусей за один учет была весной у гуменника – 130, осенью – 259 особей; белолобый гусь регистрировался только осенью – 157 особей [20].

На рыбхозе «Страдочь» в 2007–2011 гг. на весенней миграции были встречены 648 особей серого и 66 особей белолобого гуся. На осеннем пролете отмечен только серый гусь – 113 особей [21].

Сроки миграции гусей в различные годы варьируют в регионе в зависимости от погодных условий на местах зимовок, размножения и пролетных путей. В ранние весны миграция гусей начинается на 10–15 дней раньше средних многолетних сроков, в затяжные и холодные примерно на столько же дней позже. В последние 15 лет в связи с глобальным изменением климата первые стаи пролетных гусей стали чаще встречаться во второй–третьей декадах февраля. Например, в 2014 г. первые стаи гусей регистрировались 15–19 февраля.

Таблица 1 – Видовой состав и число учтенных мигрирующих гусей на стационарах (а – Брестский р-н; б – Ивацевичский р-н) в юго-западной Беларуси (в числителе – весна; в знаменателе – осень)

Годы	Виды											
	Серый гусь				Белолобый гусь				Гуменник			
	а		б		а		б		а		б	
	п стай	п гусей	п стай	п гусей	п стай	п гусей	п стай	п гусей	п стай	п гусей	п стай	п гусей
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1975	0/2	0/28	0/1	0/32	2/2	188/96	5/1	170/122	2/2	50/80	1/0	37/0
1976	1/1	10/12	0/0	0/0	5/1	410/60	3/0	98/0	2/0	78/0	1/2	65/80
1977	0/0	0/0	2/0	62/0	0/0	0/0	8/3	300/120	½	52/30	3/2	110/140
1978	0/0	0/0	1/1	33/12	10/6	350/280	3/0	80/0	1/3	24/145	0/2	0/27
1979	2/3	80/145	0/0	0/0	0/0	0/0	2/1	50/130	0/2	0/92	2/1	94/108
1980	3/2	21/15	0/0	0/0	3/0	84/0	3/2	86/82	0/0	0/0	0/0	0/0
1981	0/0	0/0	2/1	28/15	13/5	316/170	0/0	0/0	3/2	105/120	6/2	170/110
1982	4/2	40/27	0/0	0/0	0/0	0/0	1/1	25/18	1/0	7/0	2/1	32/30
1983	1/1	8/10	1/1	16/15	14/2	410/82	0/0	0/0	0/0	0/0	0/3	0/160
1984	0/0	0/0	2/1	94/53	7/6	190/260	0/0	0/0	3/2	62/95	1/2	10/120
1985	2/0	18/0	0/0	0/0	0/0	0/0	4/2	90/142	2/0	70/0	1/1	80/15
1986	1/1	17/10	0/0	0/0	12/3	420/110	0/0	0/0	0/2	0/118	0/0	0/0

Окончание таблицы 1

1987	0/1	0/12	1/1	13/25	6/2	158/42	0/0	0/0	2/4	130/198	3/2	96/57
1988	3/1	125/4	0/0	0/0	8/6	220/212	2/0	51/0	3/2	140/130	0/2	0/49
1989	0/2	0/16	2/3	28/94	12/2	240/76	2/2	50/160	3/0	102/0	2/2	62/47
1990	1/1	11/14	1/1	43/45	4/0	176/0	4/4	110/130	0/2	0/63	0/0	0/0
1991	2/0	12/0	0/0	0/0	7/1	230/36	7/1	210/18	3/3	60/22	1/2	28/27
1992	0/1	0/23	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	2/2	102/130	0/0	0/0
1993	2/0	17/0	1/1	43/6	6/4	370/170	1/0	15/0	2/0	140/0	2/0	27/0
1994	0/0	0/0	0/0	0/0	8/3	450/82	5/3	370/78	0/3	0/52	0/1	0/52
1995	0/1	0/14	1/1	14/15	0/0	0/0	4/2	410/60	2/4	105/115	2/2	120/47
1996	0/0	0/0	0/0	0/0	3/0	82/0	0/0	0/0	0/0	0/0	3/3	90/109
1997	4/2	160/66	0/0	0/0	6/0	390/0	1/0	15/0	5/3	180/90	0/0	0/0
1998	0/0	0/0	0/0	0/0	3/2	140/87	3/1	92/20	3/2	120/31	0/0	0/0
1999	1/0	8/0	2/1	74/15	0/0	0/0	0/0	0/0	0/2	0/70	3/1	190/30
2000	0/0	0/0	0/0	0/0	6/1	170/137	0/0	0/0	0/0	0/0	3/3	160/190
2001	0/0	0/0	2/3	71/75	4/0	154/0	6/1	210/60	1/1	62/110	2/1	105/87
2002	1/1	13/4	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/3	0/86	0/2	0/62
2003	0/0	0/0	1/1	13/15	10/4	375/181	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
2004	0/0	0/0	2/1	35/14	5/0	181/0	2/1	72/40	3/3	160/90	3/1	106/40
2005	0/0	0/0	0/0	0/0	8/2	210/160	1/0	65/0	3/3	120/110	2/1	72/32
2006	1/1	5/5	0/0	0/0	11/3	266/90	3/2	80/70	0/3	0/87	0/2	0/56
2007	0/0	0/0	0/0	0/0	3/1	100/64	0/0	0/0	0/0	0/0	1/1	38/22
2008	2/1	126/4	1/1	13/3	0/0	0/0	1/1	50/60	2/3	96/140	2/1	120/30
2009	0/0	0/0		5/48	7/6	296/220	0/0	0/0	3/3	110/120	1/2	38/82
2010	1/2	3/87	0/0	0/0	8/2	250/172	4/3	170/160	2/2	138/100	1/3	17/210
2011	1/0	15/10	0/0	0/0	0/0	0/0	1/1	20/17	3/3	90/115	0/0	0/0
2012	0/0	0/0	1/1	23/24	10/2	140/29	2/0	37/0	1/3	24/86	2/3	90/80
2013	1/1	12/14	1/1	14/16	3/0	68/0	5/1	190/45	2/2	70/105	1/3	30/125
Итого	34/27	708/510	25/23	592/492	200/67	7144/2816	93/33	3313/1562	60/71	2397/2681	50/54	2002/2322
В среднем		228/189		23,7/21,4		42,0/35,7		35,6/47,3		40,0/37,8		40,0/43,0

Заключение. В ходе проведения исследований в юго-западной Беларуси были выявлены 4 вида гусей: серый гусь (*Anser anser L.*), белолобый гусь (*Anser albifrons Scop.*), гуменник (*Anser fabalis Lath.*) и пискулька (*Anser erythropus L.*), установлены сроки их миграций и численность.

1. Миграция гусей весной начинается с третьей декады февраля до второй декады апреля, осенью миграция начинается с третьей декады сентября и заканчивается в первой декаде ноября.

2. Доминантом на весенней миграции в долинах рек Мухавец, Лесная и Гривда является белолобый гусь, на долю которого приходится 63,6 % стай и 64,8 % особей от всех видов гусей; осенью доминирует на пролетах гуменник – соответственно 45,2 и 47,7 %, несколько ниже эти показатели у белолобого гуся. Пискулька – очень редкий малочисленный пролетный вид, за весь период исследований было зарегистрировано 4 стаи весной (37 особей) и 2 стаи осенью (23 особи).

Литература

1. Гвиннер, Э. Цирканнуальные системы : в 2 т. / Э. Гвиннер. – М. : Мир, 1984. – Т. 2 : Биологические ритмы. – С. 55–80.
2. Дольник, В.Р. Миграционное состояние птиц / В.Р. Дольник. – М. : Наука, 1975. – 398 с.
3. Гайдук, В.Е. Основы биоритмологии / В.Е. Гайдук. – Брест : БрГУ, 2003. – 250 с.
4. Федюшин, А.В. Птицы Белоруссии / А.В. Федюшин, М.С. Долбик. – Минск : Наука и техника, – 1967. – 519 с.
5. Долбик, М.С. Ландшафтная структура орнитофауны Белоруссии / М.С. Долбик. – Минск : Наука и техника, 1974. – 312 с.
6. Особенности миграций водно-болотных птиц Беларуси / А.В. Козулин [и др.] // Сохранение разнообразия лесов Беловежской пуши, п. Каменюки, 1996 г. / редкол. : А.И. Лучков [и др.]. – Минск, 1996. – С. 283–300.

7. Полуда, А.М. Значение Полесья для евро-азиатско-африканских миграций водно-болотных видов птиц / А.М. Полуда // Экология и охрана пойм и низинных болот Полесья : материалы межд. науч. конф., Минск, 21–24 мая 1997 г. / НАН Беларуси, 1997. – Минск, 1997. – С. 6770.
8. Никифоров, М.Е. Трансконтинентальные миграции птиц : Новое в изучении и современные проблемы / М.Е. Никифоров, Н.В. Карлионова, П.В. Пинчук // Проблемы сохранения биологического разнообразия и использования биологических ресурсов : мат. Межд. научно-практ. конф. и X зоол. конф. – Ч. 2. Сб. науч. работ / под общ. ред. М.Е. Никифорова. – Минск : ООО «Мэджик» ИП Вараксин, 2009. – С. 467–471.
9. Гайдук, В.Е. Экология птиц юго-запада Беларуси. Неворобьинообразные / В.Е. Гайдук, И.В. Абрамова. – Брест : БрГУ, 2009. – 300 с.
10. Гайдук, В.Е. Биоритмы миграций водно-болотных птиц юго-западной Беларуси / В.Е. Гайдук, А.В. Абрамова // Природнае асяроддзе Палесся : асаблівасці і перспектывы развіцця : зб. навук. прац. – Брест : Альтернатива, 2010. – Вып. 3. – Т. 1. – С. 14–18.
11. Нікіфарова М.Е. Птушкі Еўропы / пад рэд. М.Е. Нікіфарова. – Варшава : Навук. выдавецтва ПВН, 2000. – 540 с.
12. Красная книга Республики Беларусь. Животные / ред. кол. Л.И. Хоружик [и др.]. – Минск : Беларуская энцыклапедыя, 2004. – 320 с.
13. Скарбы прыроды Беларусі. Тэрыторыі, якія маюць міжнароднае значэнне для захавання біялагічнай разнастайнасці / А.В. Казулін [і інш.]. – Мінск : Беларусь, 2002. – С. 160.
14. Гайдук, В.Е. Редкие и исчезающие водно-болотные птицы Брестского Полесья / В.Е. Гайдук [и др.] // Антропогенная трансформация ландшафтов и проблемы сохранения и устойчивого использования биологического разнообразия : материалы Междунар. на-уч.-практ. конф., Минск, 1–2 дек. 2004 г. / БГПУ ; редкол.: И.Э. Бученков [и др.]. – Минск, 2004. – С. 114.
15. Дацкевич, В.А. Исторический очерк и некоторые итоги орнитологических исследований в Беловежской пушке (1945–1985 гг.) / В.А. Дацкевич. – Витебск : ВГУ, 1998. – 115 с.
16. Падутов, Е.Е. Динамика численности водоплавающих на озере Выгоновском в период весеннего и осеннего пролетов / Е.Е. Падутов // Беловежская пушка. Исследования. – Вып. 3. – Минск : Урожай, 1969. – С. 192–204.
17. Шацьке Поозер'я : характарыстыка абіотычных і біотычных кампанентаў экосістэм / За ред. Й.В. Царіка. – Львів : Евросвіт, 2008. – С. 155–156.
18. Кусенков, А.Н. Весенняя миграция водоплавающих и водно-болотных птиц в междуречье Днепра и Сожа в 2007 г. / А.Н. Кусенков, И.А. Шелякин [и др.] // Современное состояние растительного и животного мира стран Еврорегиона «Днепр», их охрана и рациональное использование : материалы науч.-практ. конф., Гомель, 14–16 ноября 2007 г. / ГГУ им. Ф. Скорины ; редкол.: А.Н. Кусенков (отв. ред.) [и др.]. – Гомель, 2007. – С. 169–176.
19. Абрамчук, С.В. Структура и динамика населения птиц рыбхоза «Локтыши» / С.В. Абрамчук, В.Е. Гайдук // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Сер. прыродазнўчых навук. – 2010. – № 2. – С. 26–32.
20. Абрамчук, С.В. Экология водно-болотной орнитофауны рыбхоза «Новоселки» / С.В. Абрамчук, В.Е. Гайдук // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Сер. прыродазнўчых навук. – 2009. – № 2 (33). – С. 68–72.
21. Абрамова, И.В. Структура и динамика населения птиц рыбхоза «Страдочь» в период весенней миграции / И.В. Абрамова, В.Е. Гайдук, С.И. Вальчук // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Сер. прыродазнўчых навук. – 2012. – № 2. – С. 10–20.

Жужелицы (Coleoptera, Carabidae) урбоценозов города Гомеля

Н.Г. Галиновский, А.Н. Крицкая

Факторы, связанные с урбанизацией и относящиеся к ее прессе, имеют огромное влияние на численность, видовой состав и структуру фауны. Жужелицы, являясь важным компонентом наземных и почвенных экосистем, играют существенную роль в процессах регуляции численности различных видов растительноядных беспозвоночных, в том числе вредителей сельского и лесного хозяйства. Актуальность изучения этих животных диктуется их обилием и важной ролью в биоценозах, чуткостью к изменениям природных режимов, а также недостаточной изученностью их фауны в городах. Гомель в этом отношении не является исключением. Новые данные по фауне этой группы жесткокрылых городских территорий на фоне трансформации урбоценозов могут быть использованы в области экологического мониторинга за состоянием городских экосистем.

Ключевые слова: жужелицы, город Гомель, урбоценоз, ареал, гигропреферendum, биопреферendum.

The factors connected with urbanization and concerning its press, have huge influence on number, specific structure and fauna structure. Ground beetles, being an important component of land and soil ecosystems, play an essential role in the processes of a number of regulations of various species of herbivorous invertebrates, including pests of agriculture and forestry. The urgency of studying of these animals is dictated by their abundance and an important role in biocenosis, keenness to changes of natural modes, and also an insufficient level of study of their fauna in cities. Gomel in this respect is not an exception. The new data on fauna of this group of coleoptera of city territories against transformation of urbocenosis can be used in the field of ecological monitoring of the state of urban ecosystems.

Keywords: ground beetles, Gomel-city, urbocenosis, natural habitat, gigropreferendum, biopreferendum.

Введение. Жужелицы – одно из крупнейших семейств жесткокрылых, насчитывающее порядка 3 тыс. видов в Европе и около 50 тыс. видов во всём мире [12, с. 28]. В Беларуси это семейство на текущий момент включает 314 видов [2], [11]. Жужелицы разнообразны как по видовому составу, так и многочисленны во всех наземных экосистемах, в том числе и городских. Они играют также важную роль в трофических взаимоотношениях комплексов и экосистем, а также могут иметь индикаторное значение при оценке антропогенного влияния на окружающую среду. Ряд видов из этого семейства являются редкими и охраняемыми и включены в Красную книгу Республики Беларусь.

Гомель является вторым по промышленному потенциалу и населению городом Беларуси но, к сожалению, следует согласиться с тем, что до недавнего времени практически не было работ, за исключением нескольких публикаций, посвящённых полному изучению его колеоптерофауны. Значительный вклад в познании видового состава и экологических параметров жужелиц карабидокомплексов Гомеля внесли публикации Л.П. Молодовой [6]–[9]. Данные работы позволили сделать предварительную оценку видового состава жужелиц в сообществах беспозвоночных г. Гомеля. Авторами предпринимались ряд попыток дополнить сведения о видовом составе жужелиц фауны г. Гомеля [3], [4], [10], но в то же время вопрос о каталожном списке видового состава жужелиц фауны города всё ещё остаётся актуальным.

Материалы и методы. Исследования проводились в период с 2006 по 2013 гг. включительно на 22 участках в пределах границы г. Гомеля, объединённых в 4 группы урбоценозов: газоны, парки и лесопарки, берега водоёмов (р. Сож, водохранилище), промышленная зона (отвалы фосфогипса, внешняя территория заводов «Центролит» и «Гомсельмаш»). Жужелицы собирались с использованием почвенных ловушек. Кроме того, нами были использованы данные, полученные при предыдущих исследованиях фауны города [6]–[9], а также ранее опубликованные данные авторов [3], [4], [10]. Латинские названия видов, а также таксономический порядок в аннотированном списке приведены согласно каталога жесткокрылых Палеарктики [13]. Типология ареалов, гигропреферendum, встречаемость и сезонная активность видов в аннотированном списке указаны согласно работе О.Р. Александровича [1].

Виды в аннотированном списке, не встреченные авторами во время проведения исследований и выявленные лишь Л.П. Молодовой, отмечены знаком (*), при этом вид *Agonum toestum* (Duftschmid, 1812), отмеченный Л.П. Молодовой для фауны города [7, с. 188], [9, с. 99] в результате анализа, проведенного В.А. Цинкевичем и О.Р. Александровичем [11] на самом деле является видом *Agonum afrum* (Duftschmid, 1812).

Аннотированный список жужелиц города Гомеля

Семейство CARABIDAE Latreille, 1802

Подсемейство Nebriinae Laporte, 1834

Триба Nebriini Laporte, 1834

Род *Leistus* Frölich, 1799

L. (s. str.) ferrugineus (Linnaeus, 1758). Еврокавказский мезофильный лесной вид. Нередок. Зимует имаго. V–X. Отвалы фосфогипса.

L. (s. str.) terminatus Panzer, 1793. Евро-сибирско-центральноазиатский гигрофильный лесной вид. Обычен. Зимует имаго. VI–X. Лесопарк, берег р. Сож и отвалы фосфогипса.

Род *Nebria* Latreille, 1802

N. (s. str.) brevicollis (Fabricius, 1792). Западноевропейско-кавказский мезофильный вид. Обитает в лесах, местами обычен. VII–X. Отмечен в парковой зоне и на берегу р. Сож.

N. (Paranebria) livida livida (Linnaeus, 1758). Трансевразийский суббореальный гигрофильный береговой вид. Редок и спорадичен. Зимует имаго. V–VIII. Берег р. Сож.

Триба Notiophilini Motschulsky, 1850

Род *Notiophilus* Duméril, 1806

N. aquaticus (Linnaeus, 1758). Циркумтемператный мезофильный лесо-луговой вид. Редок. Зимует имаго. V–VIII. Газон ГГТУ и берег р. Сож.

N. palustris (Duftschmid, 1812). Евро-сибирско-центральноазиатский мезофильный лесной вид. Зимует имаго. IV–IX. Парки и берег реки.

Подсемейство Loricarinae Bonelli, 1810

Триба Loricerini Bonelli, 1810

Род *Loricera* Latreille, 1802

L. (s. str.) pilicornis pilicornis (Fabricius, 1775). Циркумпольярный бореальный гигрофильный луго-болотный вид. Зимует имаго. V–X. Все урбоценозы г. Гомеля.

Подсемейство Cicindelinae Latreille, 1802

Триба Cicindelini Latreille, 1802

Подтриба Cicindelina Latreille, 1802

Род *Cicindela* Linnaeus, 1758

C. (s. str.) campestris campestris (Linnaeus, 1758). Западно-центрально-палеарктический мезоксерофильный луго-полевой вид. Редок. Зимует имаго. V–IX. Отвалы фосфогипса.

C. (s. str.) hybrida hybrida Linnaeus, 1758. Евро-сибирско-центральноазиатский ксерофильный луговой вид. Зимует имаго. V–IX. Берег реки и отвалы фосфогипса.

Род *Cylindera* Westwood, 1831

C. (s. str.) germanica germanica Linnaeus, 1758. Евро-казахстанский мезоксерофильный луго-полевой вид. В целом редок. V–IX. В Гомеле – везде, кроме парков.

Подсемейство Carabinae Latreille, 1802

Триба Carabini Latreille, 1802

Род *Calosoma* Weber, 1801

C. (s. str.) inquisitor inquisitor (Linnaeus, 1758)*. Западнопалеарктический мезофильный лесной вид. Зимует имаго. V–VIII. Указан Л.П. Молодовой для завода «Гомсельмаш» [7].

C. (Campalita) auropunctatum auropunctatum (Herbst, 1784). Западнопалеарктический мезофильный полевой вид. Зимует имаго. V–VIII. Везде, кроме берега р. Сож.

C. (Charmosta) investigator investigator (Illiger, 1798). Трансевразийский суббореальный мезоксерофильный луго-полевой вид. Редок. VI–VIII. Лесопарк окраины, отвалы фосфогипса.

Род *Carabus* Linnaeus, 1758

C. (Archicarabus) nemoralis nemoralis O.F. Müller, 1764. Европейский мезофильный лесо-полевой вид. Зимует имаго. IV–VI, VIII–X. Во всех урбоценозах г. Гомеля.

C. (s. str.) arcensis arcensis Herbst, 1784. Трансевразийский суббореальный мезоксерофильный лесной вид. Зимует имаго. V–VIII. Газоны, лесопарк и отвалы фосфогипса.

C. (s. str.) granulatus granulatus Linnaeus, 1758. Трансевразийский суббореальный мезогигрофильный берегово-болотный вид. Зимует имаго. IV–X. Во всех урбоценозах.

C. (Megodontus) violaceus violaceus Linnaeus, 1758. Евроказахстанский мезофильный лесной вид. Редок. Зимуют имаго и личинки. V–X. Лесопарк окраины.

C. (Oreocarabus) glabratus glabratus (Paykull, 1790). Европейский мезофильный лесной вид. Обычен. Зимуют личинки и имаго. VI–X. Окраинный лесопарк и отвалы фосфогипса.

C. (Oreocarabus) hortensis hortensis Linnaeus, 1758. Европейский мезофильный лесной вид. Зимуют имаго и личинки. VI–X. Окраинный лесопарк и отвалы фосфогипса.

C. (Procrustes) coriaceus coriaceus Linnaeus, 1758. Западноевропейский мезофильный лесной вид. Редок. Зимуют имаго и личинки V–X. Лесопарк на окраине города.

C. (Tachypus) cancellatus cancellatus (Illiger, 1798). Евробайкальский мезофильный лесо-луговой вид. Обычен. Зимует имаго. V–IX. Отмечен во всех урбоценозах.

Триба Cychrini Laporte, 1834

Род *Cychnus* Fabricius, 1794

C. caraboides (Linnaeus, 1758). Европейский мезофильный лесной вид. Достаточно редок. Зимует имаго. VII–X. Лесопарк на окраине города.

Подсемейство Elaphrinae Erichson, 1837

Триба Elaphrini Erichson, 1837

Род *Blethisa* Bonelli, 1810

B. multipunctata multipunctata (Linnaeus, 1758). Циркумпольярный бореальный гигрофильный берегово-болотный вид. Редок. Зимует имаго. V–VIII. Газон вдоль автодороги.

Род *Elaphrus* Fabricius, 1775

E. (s. str.) riparius (Linnaeus, 1758). Циркумтемператный гигрофильный береговой вид. Зимует имаго. V–X. Парк и берег р. Сож.

E. (Neoelaphrus) uliginosus Fabricius, 1792. Евроказахстанский гигрофильный болотный вид. Очень редок. Зимует имаго. V–X. Берег р. Сож.

Подсемейство Omophroninae Bonelli, 1810

Триба Omophronini Bonelli, 1810

Род *Omophron* Latreille, 1802

O. (s. str.) limbatum (Fabricius, 1777). Западно-центрально-палеарктический гигрофильный береговой вид. Редок. Зимует имаго. V–VIII. Берег р. Сож и отвалы фосфогипса.

Подсемейство Scaritinae Bonelli, 1810

Триба Clivinini Rafinesque, 1815

Подтриба Clivinina Rafinesque, 1815

Род *Clivina* Latreille, 1802

C. fossor fossor (Linnaeus, 1758). Циркумтемператный мезофильный луго-полевой вид. Обычен. Зимует имаго. V–VIII. Газоны, парк и берег р. Сож.

Триба Dyschiriini W. Kolbe, 1880

Род *Dyschirius* Bonelli, 1810

D. (Dyschiriodes) intermedius Putzeus, 1846. Европейский гигрофильный береговой вид. Редок. V–VIII. Берег р. Сож.

D. (s. str.) arenosus (Stephens, 1827). Европейский мезогигрофильный береговой вид. Зимует имаго. V–VIII. Парк, берег р. Сож и отвалы фосфогипса.

Подсемейство Broscinae Hope, 1838

Триба Broscini Hope, 1838

Подтриба Broscina Hope, 1838

Род *Broscus* Panzer, 1813

B. cephalotes (Linnaeus, 1758). Евро-сибирско-центральноазиатский ксерофильный луго-полевой вид. Обычен. V–VIII. Во всех урбоценозах Гомеля.

Подсемейство Trechinae Bonelli, 1810**Триба Bembidiini Stephens, 1827****Подтриба Bembidiina Stephens, 1827****Род *Asaphidion* Gozis, 1886**

A. flavipes (Linnaeus, 1761). Субголарктический мезогигрофильный береговой вид. Зимует имаго. IV–X. Берег р. Сож и отвалы фосфогипса.

Род *Bembidion* Latreille, 1802

B. (s. str.) quadrimaculatum quadrimaculatum (Linnaeus, 1761). Циркумтемператный мезофильный луго-полевой вид. В массе. Зимует имаго. IV–IX. Все урбоценозы г. Гомеля.

B. (Bracteon) velox (Linnaeus, 1761). Евро-сибирско-центральноазиатский мезогигрофильный береговой вид. Нередок. V–VIII. Берег р. Сож.

B. (Diplocampa) assimile Gyllenhal, 1810. Западнопалеарктический гигрофильный луговой вид. Редок. Зимует имаго. IV–VI. Парки.

B. (Emphanes) azurescens azurescens (Dalla Torre, 1877). Европейский гигрофильный береговой вид. V–VIII. Отвалы фосфогипса.

B. (Metallina) lampros (Herbst, 1784). Циркумтемператный мезофильный луго-полевой вид. В массе. Зимует имаго. V–IX. Все урбоценозы г. Гомеля.

B. (Metallina) properans (Stephens, 1828). Циркумтемператный мезофильный луго-полевой вид. В массе. Зимует имаго. IV–X. Все урбоценозы г. Гомеля.

B. (Notaphus) varium (Olivier, 1795). Западно-центрально-палеарктический гигрофильный береговой вид. V–VIII. Все урбоценозы г. Гомеля.

B. (Peryphus) andreae Fabricius, 1787. Еврокавказский гигрофильный береговой вид. Редок. V–VIII. Парк, отвалы фосфогипса, берег р. Сож.

B. (Peryphus) femoratum femoratum Sturm, 1825. Евро-сибирско-центральноазиатский мезогигрофильный береговой вид. Част. Зимует имаго. V–IX. Все урбоценозы г. Гомеля.

B. (Philochthus) biguttatum (Fabricius, 1779). Еврокавказский гигрофильный болотный вид. Зимует имаго. IV–VIII. Берег р. Сож.

B. (Testedium) bipunctatum bipunctatum (Linnaeus, 1761). Западно-центрально-палеарктический гигрофильный береговой вид. Берег р. Сож.

B. (Trepanedoris) doris (Panzer, 1796). Евроказахстанский гигрофильный луго-болотный вид. Зимует имаго. V–IX. Берег р. Сож.

B. (Trepanes) articulatum (Panzer, 1796). Трансевразийский температурно-южносибирский гигрофильный луго-болотный вид. Зимует имаго. V–VIII. Отвалы фосфогипса.

Триба Trechini Bonelli, 1810**Подтриба Trechina Bonelli, 1810****Род *Blemus* Dejean, 1821**

B. discus discus (Fabricius, 1792)*. Трансевразийский температурно-южносибирский мезофильный луго-береговой вид, калькофил. VI–IX. Указан Л.П. Молодовой для территории парка [8].

Род *Trechus* Clairville, 1806

T. (Eraphius) secalis secalis Paykull, 1790. Евроказахстанский мезофильный лесной вид. VI–VIII. Отвалы фосфогипса.

Подсемейство Harpalinae Bonelli, 1810**Триба Chlaeniini Brullé, 1834****Подтриба Chlaeniina Brullé, 1834****Род *Chlaenius* Bonelli, 1810**

Ch. (Chlaeniellus) nigricornis (Fabricius, 1787)*. Евробайкальский гигрофильный луго-береговой вид. Зимует имаго. IV–VIII. Указан Л.П. Молодовой для территории парка [9].

Ch. (Chlaeniellus) nitidulus (Schrank, 1781). Европейский гигрофильный береговой вид. Обычен. Зимует имаго. IV–VIII. Берег р. Сож.

Ch. (Chlaeniellus) tibialis Dejean, 1826. Европейский гигрофильный береговой вид. Берег р. Сож.

Ch. (Chlaeniellus) tristis tristis (Schaller, 1783). Транспалеарктический полизонально-южносибирский гигрофильный береговой вид. Нередок. V–VII. Берег р. Сож, парк и газоны.

Ch. (Chlaeniellus) vestitus (Paykull, 1790). Западнопалеарктический гигрофильный береговой вид. V–VIII. Берег р. Сож.

Триба Harpalini Bonelli, 1810
Подтриба Anisodactylina Lacordaire, 1854
Род Anisodactylus Dejean, 1829

A. (s. str.) binotatus (Fabricius, 1787). Западнопалеарктический мезогигрофильный луго-береговой вид. Обычен. Зимует имаго. IV–VIII. Газон, парковая и промышленная зона.

A. (Pseudanisodactylus) signatus (Panzer, 1796). Трансевразийский суббореальный ксерофильный луго-полевой вид. В целом обычен. IV–VIII. Газон, парки и промзона.

Подтриба Harpalina Bonelli, 1810
Род Harpalus Latreille, 1802

H. (s. str.) affinis (Schrank, 1781). Трансевразийский суббореальный мезоксерофильный луго-полевой вид. Зимует имаго. V–VIII. Все урбоценозы г. Гомеля.

H. (s. str.) anxius (Duftschmid, 1812). Евробайкальский ксерофильный луго-полевой вид. Нередок. V–VIII. Все урбоценозы г. Гомеля.

H. (s. str.) distinguendus distinguendus (Duftschmid, 1812). Трансевразийский суббореальный ксерофильный луго-полевой вид. Редок. IV–VI. Парки, берег реки и промышленная зона.

H. (s. str.) flavescens (Piller et Mitterpacher, 1783). Европейский мезоксерофильный луго-полевой вид. Псаммофил. Редок и спорадичен. V–VII. Берег р. Сож.

H. (s. str.) laevipes (Zetterstedt, 1828). Циркумтемператный мезофильный лесной вид. Обычен. V–VII, IX–X. Берег р. Сож.

H. (s. str.) latus (Linnaeus, 1758). Трансевразийский суббореальный мезофильный лесной вид. Редок. V–VII. Все урбоценозы г. Гомеля.

H. (s. str.) rubripes (Duftschmid, 1812). Трансевразийский суббореальный мезоксерофильный луго-полевой вид. Редок. V–VIII. Все урбоценозы г. Гомеля.

H. (s. str.) smaragdinus (Duftschmid, 1812). Евроказахстанский ксерофильный луго-полевой вид. Нередок. VI–VIII. Все урбоценозы г. Гомеля, кроме промзоны.

H. (s. str.) solitarius Dejean, 1829. Циркумбореальный бореомонтанный мезоксерофильный полевой вид. Очень редок. V. Центральный парк.

H. (s. str.) tardus (Panzer, 1797). Еврокавказский мезоксерофильный луго-полевой вид. Обычен. IV–VIII. Все урбоценозы г. Гомеля.

H. (s. str.) xanthopus winkleri Schaubерger, 1923*. Трансевразийский суббореальный мезофильный вид. Указан Л.П. Молодовой для окрестностей парка [7].

H. (Pseudoophonus) calceatus (Duftschmid, 1812)*. Трансевразийский суббореальный ксерофильный полевой вид. В целом редок. VII–VIII. Указан Л.П. Молодовой для газонов [9] и территории завода [7].

H. (Pseudoophonus) griseus (Panzer, 1796). Транспалеарктический полизонально-южносибирский ксерофильный луго-полевой вид. Редок. VI–VIII. Газоны и промзона.

H. (Pseudoophonus) rufipes (DeGeer, 1774). Евро-сибирско-центральноазиатский мезофильный луго-полевой вид. Зимуют имаго и личинки. V–IX. Все урбоценозы г. Гомеля.

Род Ophonus Dejean, 1821

O. (Metophonus) puncticollis (Paykull, 1798)*. Евробайкальский ксерофильный луговой вид. Редок. V–VIII. Был отмечен Л.П. Молодовой на газонах [9].

Подтриба Stenolophina Kirby, 1837

Род Acupalpus Latreille, 1829

A. (s. str.) flavicollis (Sturm, 1825). Еврокавказский гигрофильный берегово-болотный вид. Редок. Зимует имаго. IV–IX. Отвалы фосфогипса.

A. (s. str.) meridianus (Linnaeus, 1761)*. Еврокавказский гигрофильный луго-береговой вид. Редок. Зимует имаго. IV–IX. Указан Л.П. Молодовой для парка [9].

Род Anthracus Motschulsky, 1850

A. consputus (Duftschmid, 1812). Евроказахстанский гигрофильный берегово-болотный вид. Редок. IV–VIII. Берег р. Сож.

Род Stenolophus Dejean, 1821

S. (s. str.) mixtus (Herbst, 1784). Западнопалеарктический гигрофильный болотный вид. Зимует имаго. IV–VIII. Берег р. Сож и отвалы фосфогипса.

S. (s. str.) teutonius (Schrank, 1781)*. Западнопалеарктический мезогигрофильный берегово-болотный вид. Редок. Зимует имаго. IV–IX. Указан Л.П. Молодовой для парка [9].

Триба Lebiini Bonelli, 1810

Подтриба Dromiina Bonelli, 1810

Род *Microlestes* Schmidt-Göbel, 1846

M. maurus maurus (Sturm, 1827). Евроказахстанский мезоксерофильный луго-полевой вид. Очень редок. V–VII. Берег р. Сож.

M. minutulus (Goeze, 1777). Транспалеарктический полизонально-южносибирский мезоксерофильный болотный вид. В целом редок. Зимует имаго. V–VIII. Отвалы фосфогипса.

Род *Paradromius* Fowler, 1887

P. (Manodromius) linearis linearis (Olivier, 1795)*. Западнопалеарктический ксерофильный луго-береговой вид. Редок. Зимует имаго. VI–VII. Указан Л.П. Молодовой для парка [9].

Род *Philorhizus* Hope, 1838

Ph. sigma (R. Rossi, 1790)*. Транспалеарктический полизонально-южносибирский мезоксерофильный береговой вид. Редок. Зимует имаго. V–VIII. Указан Л.П. Молодовой для парка [9].

Подтриба Lionychina Jeannel, 1948

Род *Syntomus* Hope, 1838

S. truncatellus (Linnaeus, 1761)*. Евроленский мезоксерофильный луго-полевой вид. В целом редок. V–VIII. Указан Л.П. Молодовой для парка и газонов [9].

Триба Licinini Bonelli, 1810

Подтриба Licinina Bonelli, 1810

Род *Badister* Clairville, 1806

B. (s. str.) bullatus (Schrank, 1798). Транспалеарктический полизонально-южносибирский мезофильный лесной вид. Редок. Зимует имаго. VI–VIII. Все урбоценозы г. Гомеля.

B. (s. str.) lacertosus (Sturm, 1815). Европейский мезофильный лесной вид. Редок. VI–IX. Берег р. Сож.

B. (s. str.) unipustulatus (Bonelli, 1813). Еврокавказский гигрофильный луго-береговой вид. Редок. Зимует имаго. IV–VIII. Все урбоценозы г. Гомеля.

B. (Baudia) peltatus peltatus (Panzer, 1796). Транспалеарктический полизонально-южносибирский гигрофильный болотный вид. Нередок. Зимует имаго. IV–VIII. Берег р. Сож.

Триба Oodini LaFerté-Sénectère, 1851

Род *Oodes* Bonelli, 1810

O. helopioides helopioides (Fabricius, 1792). Западнопалеарктический гигрофильный болотный вид. Обычен. Зимует имаго. IV–VIII. Все урбоценозы, кроме промышленной зоны.

Триба Panagaeini Bonelli, 1810

Род *Panagaeus* Latreille, 1802

P. (s. str.) bipustulatus (Fabricius, 1775). Европейский мезоксерофильный вид. Очень редок. Берег р. Сож и промышленная зона.

P. (s. str.) cruxmajor (Linnaeus, 1758). Западнопалеарктический гигрофильный лесобереговой вид. Редок. Зимует имаго. VI–VIII. Берег р. Сож.

Триба Platynini Bonelli, 1810

Род *Agonum* Bonelli, 1810

A. (s. str.) afrum (Duftschmid, 1812)*. Евроленский гигрофильный береговой вид. Крайне редок. Указан Л.П. Молодовой для парка и газонов [9].

A. (s. str.) impressum (Panzer, 1796). Трансевразиатский температно-южносибирский гигрофильный берегово-болотный вид. Зимует имаго. V–VIII. Все урбоценозы, кроме промышленной зоны.

A. (s. str.) sexpunctatum (Linnaeus, 1758). Евробайкальский мезогигрофильный луго-полевой вид. Обычен. Зимует имаго. V–VIII. Все урбоценозы, кроме газонов.

A. (s. str.) versutum Sturm, 1824. Евробайкальский мезогигрофильный болотный вид. Нередок. Зимует имаго. IV–VIII. Берег р. Сож.

A. (Europhilus) fuliginosum (Panzer, 1809). Евробайкальский гигрофильный береговой вид. Зимует имаго. IV–VIII. Отвалы фосфогипса.

Род *Anchomenus* Bonelli, 1810

A. (s. str.) dorsalis (Pontoppidan, 1763). Евробайкальский мезогигрофильный луго-полевой вид. Зимует имаго. V–VIII. Все урбоценозы г. Гомеля.

Род *Oxypselaphus* Chaudoir, 1843

O. obscurus (Herbst, 1784). Циркумтемператный гигрофильный лесной вид. Обычен. Зимует имаго. IV–X. Парки и отвалы фосфогипса.

Род *Platynus* Bonelli, 1810

P. (s. str.) assimilis (Paykull, 1790). Европейский гигрофильный лесной вид. Зимует имаго. IV–IX. Все урбоценозы, кроме промзоны.

Триба Pterostichini Bonelli, 1810**Род *Poecilus* Bonelli, 1810**

P. (s. str.) cupreus cupreus (Linnaeus, 1758). Евробайкальский мезофильный луго-полевой вид. Обычен. Зимует имаго. IV–X. Все урбоценозы г. Гомеля.

P. (s. str.) lepidus lepidus (Leske, 1785). Евро-обский ксерофильный луго-полевой вид. Обычен. V–VIII. Все урбоценозы г. Гомеля, кроме береговых.

P. (s. str.) versicolor (Sturm, 1824). Евробайкальский мезофильный луго-полевой вид. Зимует имаго. IV–X. Все урбоценозы г. Гомеля.

Род *Pterostichus* Bonelli, 1810

P. (Adelosia) macer macer (Marsham, 1802). Евроказахстанский ксерофильный полевой вид. V–VIII. Берег р. Сож.

P. (Argutor) vernalis (Panzer, 1796). Западно-центральнопалеарктический мезогигрофильный берегово-болотный вид. Нередок. Зимует имаго. V–VII. Все урбоценозы г. Гомеля.

P. (Bothriopterus) oblongopunctatus oblongopunctatus (Fabricius, 1787). Трансевразийский температурный мезофильный лесной вид. Обычен. IV–IX. Зимует имаго. Все урбоценозы.

P. (Bothriopterus) quadrioveolatus Letzner, 1852. Еврокавказский мезоксерофильный лесной вид. Очень редок. V–VIII. Отвалы фосфогипса.

P. (Melanius) aterrimus aterrimus (Herbst, 1784). Западнопалеарктический гигрофильный болотный вид. Очень редок. VI–VII. Берег р. Сож.

P. (Morphnosoma) melanarius (Illiger, 1798). Субголарктический мезофильный луго-полевой вид. Обычен. Зимуют имаго и личинки. V–IX. Все урбоценозы г. Гомеля.

P. (Phonias) strenuus (Panzer, 1796). Евробайкальский мезогигрофильный береговой вид. Обычен. Зимует имаго. V–IX. Все урбоценозы г. Гомеля.

P. (Platysma) niger niger (Schaller, 1783). Еврокавказский мезофильный лесной вид. Повсеместен. Зимуют имаго и личинки. V–IX. Все урбоценозы г. Гомеля.

P. (Pseudomaseus) anthracinus anthracinus (Illiger, 1798)*. Европейский гигрофильный берегово-болотный вид. Обычен. Зимует имаго. V–VIII. Указан Л.П. Молодовой для территории парка «Фестивальный» и газона вдоль автотрассы [9].

P. (Pseudomaseus) nigrita (Paykull, 1790). Трансевразийский суббореальный гигрофильный болотный вид. Обычен. Зимует имаго. V–VIII. Все урбоценозы г. Гомеля, кроме газонов.

Триба Sphodrini Laporte, 1834**Подтриба Calathina Laporte, 1834****Род *Calathus* Bonelli, 1810**

C. (s. str.) fuscipes fuscipes (Goeze, 1777). Западнопалеарктический мезофильный луго-полевой вид. Обычен. Зимуют имаго и личинки. V–IX. Все урбоценозы г. Гомеля.

C. (Neocalathus) ambiguus ambiguus (Paykull, 1790). Евробайкальский мезоксерофильный луго-полевой вид. Обычен. Зимуют личинки и имаго, VII–IX. Все урбоценозы г. Гомеля.

C. (Neocalathus) erratus erratus (C.R. Sahlberg, 1827). Евробайкальский мезоксерофильный луго-полевой вид. Зимуют имаго и личинки. V–IX. Все урбоценозы г. Гомеля.

C. (Neocalathus) melanocephalus melanocephalus (Linnaeus, 1758). Западно-центрально-палеарктический мезофильный луго-полевой вид. Обычен. Зимуют имаго и личинки. V–IX. Все урбоценозы г. Гомеля.

C. (Neocalathus) micropterus (Duftschmid, 1812). Трансевразийский температурно-южносибирский мезофильный лесной вид. Обычен. Зимуют имаго и личинки. VI–VIII. Все урбоценозы г. Гомеля.

Подтриба Dolichina Audouin & Brullé, 1834**Род Dolichus Bonelli, 1810**

D. halensis (Schaller, 1783). Трансевразийский температурно-южносибирский мезофильный луго-полевой вид. Обычен. VII–VIII. Парковая и промышленная зоны, берег р. Сож.

Подтриба Synuchina Lindroth, 1956**Род Synuchus Gyllenhal, 1810**

S. (s. str.) vivalis vivalis (Illiger, 1798). Евробайкальский мезоксерофильный луго-полевой вид. Обычен. VII–IX. Берег р. Сож и отвалы фосфогипса.

Триба Zabryni Bonelli, 1810**Подтриба Amarina C. Zimmermann, 1831****Род Amara Bonelli, 1810**

A. (s. str.) aenea (DeGeer, 1774). Евроказахстанский ксерофильный луго-полевой вид. Обычен. Зимует имаго. V–VIII. Все урбоценозы г. Гомеля.

A. (s. str.) communis (Panzer, 1797). Трансевразийский суббореальный мезофильный луговой вид. Обычен. Зимует имаго. IV–VIII. Все урбоценозы г. Гомеля.

A. (s. str.) eurynota (Panzer, 1796)*. Западно-центрально-палеарктический мезофильный луго-полевой вид. Обычен. V–IX. Указан Л.П. Молодовой для парка и газонов [9].

A. (s. str.) famelica C. Zimmermann, 1832*. Еврокавказский мезогигрофильный луго-полевой вид. В целом редок. V–VIII. Указан Л.П. Молодовой для парка и газона [9].

A. (s. str.) familiaris (Duftschmid, 1812)*. Циркумпозитональный мезофильный луго-полевой вид. Обычен. Зимует имаго. V–VIII. Указан Л.П. Молодовой для парка, газона и промышленной зоны [9].

A. (s. str.) nitida Sturm, 1825*. Европейский мезоксерофильный луго-полевой вид. Редок. V–VIII. Указан Л.П. Молодовой для газона [9].

A. (s. str.) ovata (Fabricius, 1792)*. Трансевразийский суббореальный мезофильный луго-полевой вид. Редок. V–VII. Указан Л.П. Молодовой для газона и промышленной зоны [6].

A. (s. str.) similata (Gyllenhal, 1810)*. Транспалеарктический полизонально-южносибирский мезофильный луго-полевой вид. Обычен. Зимует имаго. V–IX. Указан Л.П. Молодовой для газона [6].

A. (s. str.) spreata Dejean, 1831*. Евробайкальский мезоксерофильный луговой вид. Обычен. Зимует имаго. V–VIII. Указан Л.П. Молодовой для парка и газонов [9].

A. (s. str.) tibialis (Paykull, 1798). Евробайкальский мезоксерофильный луго-полевой вид. Редок. IV–VII. Газон вдоль автотрассы и около ГГТУ им. Сухого, берег р. Сож.

A. (Bradytus) fulva (O.F. Müller, 1776). Евро-обский мезоксерофильный луго-полевой вид. Обычен. V–VIII. Все урбоценозы г. Гомеля, кроме промышленной зоны.

A. (Bradytus) majuscula Chaudoir, 1850. Трансевразийский суббореальный мезофильный луго-полевой вид. Обычен. V–IX. Все урбоценозы г. Гомеля, кроме промзоны.

A. (Celia) bifrons (Gyllenhal, 1810). Западнопалеарктический мезоксерофильный луго-полевой вид. Нередок. V–IX. Газоны, парковая и промышленная зоны.

A. (Celia) brunnea (Gyllenhal, 1810). Циркумтемператный мезофильный лесной вид. Обычен. V–X. Отвалы фосфогипса.

A. (Celia) ingenua (Duftschmid, 1812)*. Евро-сибирско-среднеазиатский мезофильный луго-полевой вид. В целом редок. V–IX. Зимует имаго и личинки. Указан Л.П. Молодовой для газонов, береговой зоны и территории промпредприятия [9].

A. (Curtonotus) aulica (Panzer, 1796). Евро-обский мезофильный луго-полевой вид. Обычен. V–VIII. Все урбоценозы г. Гомеля.

A. (Zezea) plebeja (Gyllenhal, 1810). Трансевразийский суббореальный мезогигрофильный луго-полевой вид. Обычен. Зимует имаго. IV–VIII. Все урбоценозы г. Гомеля.

A. (Zezea) tricuspидata Dejean, 1831*. Евроказахстанский мезогигрофильный луговой вид. Очень редок. Указан Л.П. Молодовой для газона [9].

Таким образом, для территории г. Гомеля характерно присутствие 131 вида жужелиц, из которых 5 видов: *Calosoma investigator*, *C. inquisitor*, *Carabus cancellatus*, *C. violaceus* и *C. coriaceus* включены в список охраняемых видов Республики Беларусь [5].

Авторы благодарят профессора О.Р. Александровича (г. Слупск, Республика Польша) и доцента В.А. Цинкевича (г. Минск, Беларусь) за ценные консультации и помощь в определении некоторых видов.

Литература

1. Александрович, О.Р. Жуки жужелицы (Coleoptera, Carabidae) фауны Белоруссии / О.Р. Александрович // Фауна и экология жесткокрылых Белоруссии. – Мн : Навука і тэхніка, 1991. – С. 37–78.
2. Александрович, О.Р. Каталог жесткокрылых (Coleoptera, Insecta) Беларуси / О.Р. Александрович [и др.]. – Мн : ФФИ РБ, 1996. – 103 с.
3. Галиновский, Н.Г. Жесткокрылые (Ectognatha, Coleoptera) прибрежных урбоценозов р. Сож / Н.Г. Галиновский // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2010. – № 3. – С. 166–172.
4. Галиновский, Н.Г. Жужелицы центральных парков крупных городов Беларуси / Н.Г. Галиновский // Наука и инновации. – 2012. – № 2. – С. 58–62.
5. Красная книга Республики Беларусь : Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды диких животных / ред. кол. Г.П. Пашков (гл. ред.) [и др.]. – Мн. : БелЭн, 2004. – 320 с.
6. Молодова, Л.П. Структура фауны жесткокрылых-герпетобионтов в биотопах Гомеля / Л.П. Молодова // Вестник БГУ. Сер. 2 : Химия. Биология, География. – 1990. – № 3. – С. 39–42.
7. Молодова, Л.П. Количественная и качественная характеристика жуков герпетобионтов в районе крупного промышленного объединения в Гомеле / Л.П. Молодова // Фауна и экология жесткокрылых Белоруссии. – Мн : Навука і тэхніка, 1991. – С. 185–192.
8. Молодова, Л.П. Жужелицы лесопарковой зоны в Гомельском центральном парке / Л.П. Молодова // Проблемы изучения, сохранения и использования биологического разнообразия животного мира : тез. докл. VII зоологической конф., Минск, 27–29 сентября 1994 г. – Мн : Навука і тэхніка, 1994. – С. 136–138.
9. Молодова, Л.П. К фауне жужелиц города Гомеля / Л.П. Молодова, Е.А. Ковдерко // Фауна Белорусского Полесья : тез. докл. научно-практ. конференции. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 1997. – С. 98–101.
10. Самарченко, А.С. Карабидокомплексы окрестностей отвалов фосфогипса Гомельского химического завода / А.С. Самарченко, А.Н. Крицкая, Н.Г. Галиновский // Молодёжь в науке. Приложение к журналу «Вестні Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі». 2010. – Ч. 4. – С. 239–241.
11. Цинкевич, В.А. Новые и редкие виды жесткокрылых (Insecta : Coleoptera) фауны Беларуси / В.А. Цинкевич, О.Р. Александрович // Вестник БГУ. Сер. 2 : Химия. Биология, География. – 2002. – № 2. – С. 30–33.
12. Aleksandrovich, O.R. Biegaczowate (Carabidae) / O.R. Aleksandrovich // Fauna Polski – charakterystyka i wykaz gatunków. – MiZ PAN. – Warszawa. – P. 28–31.
13. Catalogue of Palaearctic Coleoptera. Archostemata – Myxophaga – Adepaga / Edited by I. Lóbl & A. Smetana. – Vol. 1. – Stenstrup : Apollo Books, 2003. – 819 s.

Жизненный цикл возбудителей диплостомоза

Г.Г. ГОНЧАРЕНКО, И.В. КУРАЧЕНКО, С.А. ЗЯТЬКОВ

Описаны основные этапы жизненного цикла трематод из рода *Diplostomum*. Показано, что диплостомозами поражаются все виды пресноводных и проходных рыб, но наиболее восприимчивы к ним лососевые, сиговые, осетровые и большинство карповых, включая всех интродуцентов. Кроме того отмечено, что идентификация видов *Diplostomum spp.* весьма затруднена на всех стадиях жизненного цикла паразита, вследствие их фенотипической пластичности. Показана особая актуальность методов ДНК-идентификации паразитов-диплостомид на любой стадии их жизненного цикла.

Ключевые слова: диплостомоз, трематоды, моллюски, рыба, ДНК-идентификация.

This paper describes the main stages of the life cycle of the trematode genus *Diplostomum*. It is shown that diplostomozami affects all species of freshwater and anadromous fishes, but the most susceptible to them salmon, whitefish, sturgeon and most carp species. Furthermore, it is noted that the identification of species *Diplostomum spp.* very difficult at all stages of the life cycle of the parasite because of their phenotypic plasticity. Shows the special relevance of methods of DNA identification diplostomid parasites at any stage of their life cycle.

Keywords: dipotamos, trematodes, shellfish, fish, DNA identification.

Трематодозы (trematodoses) – это гельминтозы, вызываемые плоскими червями класса Trematoda. Согласно классификации К.И. Скрябина и др. трематодозы относятся к биогельминтозам (развитие личинок происходит в организме 1 или 2 промежуточных хозяев) [1]. Одним из опасных трематодозов на территории Беларуси остается диплостомоз – широко распространенное заболевания пресноводных рыб и птиц, вызываемое метацеркариями трематод рода *Diplostomum* (сем. Diplostomidae). В настоящее время в фауне СНГ выявлено 17 видов этого рода [2], [3].

Жизненный цикл трематод рода *Diplostomum* сложный, протекающий с участием трех хозяев: промежуточных – моллюски семейства Прудовиков (*Lymnaeidae*), дополнительных или вторых промежуточных – рыбы и круглоротые и окончательных – рыбацкие птицы, преимущественно чайковые и утиные (*Laridae* и *Anatidae*) (рисунок 1).

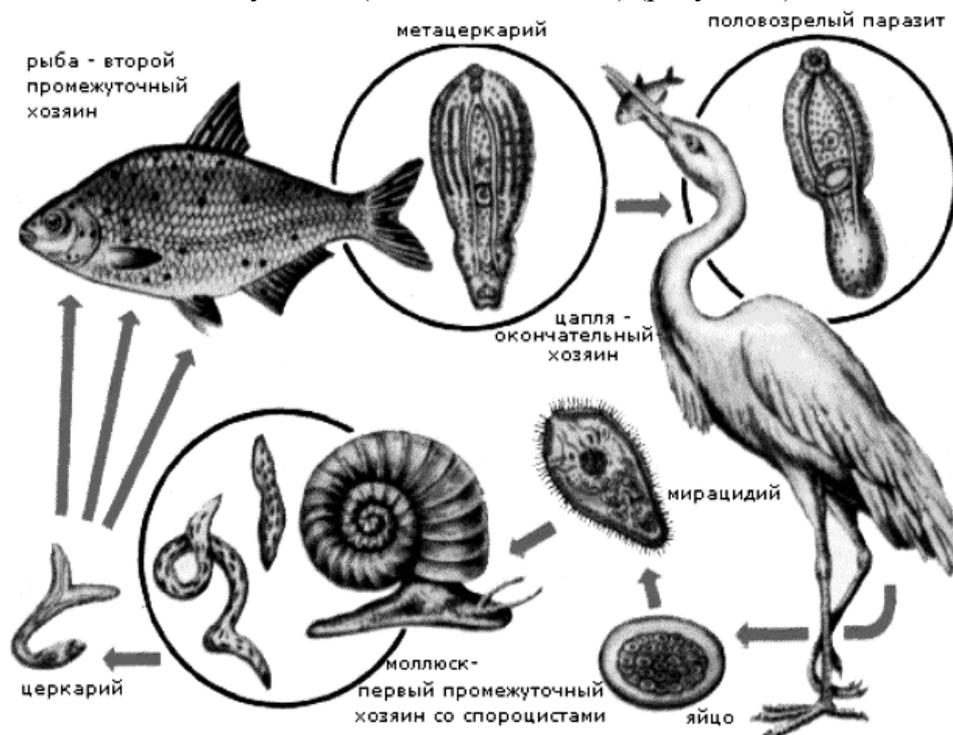


Рисунок 1 – Цикл развития диплостомид

Половозрелые трематоды (мариты) паразитируют в кишечнике птиц. Продуцируемые ими яйца вместе с экскрементами птицы выделяются во внешнюю среду и, попав в воду, начинают эмбриональное развитие. Через 15–20 суток (при температуре 20 °С) в них формируются мирацидии, которые выходят в воду, где внедряются в моллюсков-прудовиков. В печени моллюска мирацидии превращаются в спороцисты (рисунок 1).

Внутри спороцист (партеногенетически) развивается новое дочернее поколение – редии. Из редий формируются церкарии, которые активно покидают тело моллюска и переходят к свободному образу жизни в воде (рисунок 1). За 1 сутки зараженный моллюск производит до 50 тыс., а за всю жизнь – более 10 млн церкарий. В воде церкарии живут немногим более суток. Для дальнейшего развития они должны внедриться в рыбу, где проникают в глазное яблоко рыбы и внедряются в хрусталик. Здесь через 1,5–2,0 месяца церкарии превращаются в метацеркарий, способных жить в рыбе до 5–6 лет.

Рыбоядные птицы заражаются диплостомами при поедании инвазированных рыб. Половой зрелости паразит достигает в кишечнике птиц через 5 суток. Срок его жизни в птице ограничен 1–2 месяцами. За это время каждый паразит продуцирует до 5000 яиц.

Диплостомозами поражаются все виды пресноводных и проходных рыб, но наиболее восприимчивы к ним лососевые, сиговые, осетровые и большинство карповых, включая всех интродуцентов (белый амур, толстолобик и др.). Наибольшую опасность они представляют для личинок, мальков и сеголеток прудовых рыб [4].

Потенциально неблагополучными по диплостомозам могут быть все водоемы, в которых обитают моллюски-прудовики и которые посещаются рыбоядными птицами – чайками, крачками, утками, крохальями, цаплями.

Заболевания протекают в двух формах: в острой (церкариозные диплостомозы) и в хронической (паразитарная катаракта). Первая вызывается внедрением церкарий в рыб и их миграцией в организме рыбы, вторая – развивающимися и инвазионными метацеркариями. При острой форме могут поражаться практически все органы и ткани рыбы, включая центральную нервную и кровеносную системы, при хронической форме – главным образом хрусталики глаз. Все меры борьбы с этими заболеваниями сводятся к сокращению численности возбудителей на паразитических и свободноживущих стадиях развития с учетом специфики их жизненных циклов.

Необходимо подчеркнуть, что идентификация видов *Diplostomum spp.* весьма затруднена на всех стадиях жизненного цикла паразита, вследствие их фенотипической пластичности, недостаточной изученности морфологических особенностей разных стадий развития. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка методов ДНК-идентификации паразитов-диплостомид на любой стадии их жизненного цикла. Данные молекулярно-генетические методы успешно показали себя весьма эффективным инструментом в идентификации многих гельминтов [5], [6].

Литература

1. Дайтер, А.Б. Паразитарные болезни / А.Б. Дайтер, А.Ф. Тум. – М., 1980. – 116 с.
2. Шигин, А.А. Трематоды фауны СССР. Род *Diplostomum*. Метацеркарии / А.А. Шигин. – М. : Наука, 1986. – Т. XIV – 254 с.
3. Шигин, А.А. Трематоды фауны России и сопредельных регионов. Род *Diplostomum*. Мариты / А.А. Шигин. – М. : Наука, 1993. – 208 с.
4. Лебедева, Д.И. Трематоды рода *Diplostomum Nordmann, 1832* рыб Ладожского озера / Д.И. Лебедева // Паразитология. – 2008 – Т. 42, Вып. 4. – С. 292–299.
5. Galazzo, D.E. Molecular systematics of some North American species of *Diplostomum* (Digenea) based on rDNA-sequence data and comparisons with European congeners / D.E. Galazzo, S. Dayanandan, D.J. Marcogliese, J.D. McLaughlin // *Canadian Journal of Zoology*. – 2002. – Vol. 80 (12). – P. 2207–2217.
6. Brusentsov, I. Low Genetic Diversity in Wide-Spread Eurasian Liver Fluke *Opisthorchis felineus* / I. Brusentsov, A. Katokhin, S. Shechovtsov, S. Borovikov, G. Goncharenko [et al.]. // *PLoS ONE*, 2013. – 8(4):e62453. doi:10.1371.

УДК 582.675(4)

Особенности географического распространения *Pulsatilla grandis* Wender. (*Ranunculaceae*) в Европе

Л.Т. ГОРБНЯК

В результате анализа гербариев, литературных источников и собственных исследований проанализировано географическое распространение *Pulsatilla grandis* Wender. в Европе. Установлено, что происходит изменение условий произрастания и сокращение ареала *P. grandis*. Вид требует неотложной охраны всех мест произрастания из-за чрезмерного антропогенного воздействия.

Ключевые слова: географическое распространение, *Pulsatilla grandis* Wender., Европа.

The analysis of herbarium specimens, literature and our own research the geographical distribution of *Pulsatilla grandis* Wender. in Europe is analyzed. It has been established that there is a change of growth conditions and the reduction of area of *P. grandis*. This type of plants requires urgent protection of all habitat due to excessive anthropogenic impact.

Keywords: geographic distribution, *Pulsatilla grandis* Wender., Europe.

Введение. Одной из важных проблем охраны окружающей среды является сохранение и рациональное использование редких и исчезающих видов растений. Типичным представителем редких видов Европы является *Pulsatilla grandis* Wender. (*Ranunculaceae*). Вид включен в Список видов, охраняемых в Европе [4]. *P. grandis* занесен в Красную книгу Германии, Чехии, Словении, Хорватии, Молдовы, Румынии, Словакии и Украины [12], [18]–[22], [28], [30], а в Венгрии охраняется на региональном уровне [27].

Ареал вида охватывает умеренную зону северного полушария (Европа) и вообще отсутствует в южном полушарии [8]–[12], [15]. Несмотря на высокий созологический статус *P. grandis*, исчезают его первичные места произрастания, резко сокращается ареал вида, главным образом, в результате антропогенного воздействия. Большинство сведений о географическом распространении вида являются устаревшими и неполными. Поэтому проведение исследований с целью уточнения географического распространения *P. grandis* в Европе приобрело особую актуальность.

Целью исследования был анализ и уточнение географического распространения *P. grandis* в Европе и изучение современного состояния его ареала.

Материалы и методика исследований. Ареал и географическое распространение *P. grandis* в Европе представлены на основе обработки литературных источников и гербарных фондов Венгерского музея естествознания (ВР), Института ботаники им. М.Г. Холодного НАН Украины (KW), Ботанического сада им. А.В. Фомина Киевского национального университета им. Тараса Шевченка (KWHU), Ботанического сада им. Н.Н. Гришка НАН Украины (KWHNA), Института экологии Карпат НАН Украины (LWKS), Государственного музея естествознания НАН Украины (LWD), Днепропетровского национального университета им. Олеса Гончара (DSU), Черновицкого национального университета им. Ю. Федьковича (CHER), Национального дендрологического парка «Софиевка» НАН Украины (SOF), Национального природного парка «Подольские Толтры» (PTR), Каменец-Подольского ботанического сада Подольского государственного аграрно-технического университета (PDH). Также осуществлены собственные исследования *P. grandis*.

Результаты исследований и их обсуждение. *P. grandis* – центральноевропейский борео-меридиональный вид, ареал которого охватывает пространство от Германии, Австрии, Чехии, Словении, Венгрии, Словакии, Польши, Хорватии, Боснии и Герцеговины, Сербии, Румынии, Молдовы, Литвы до Украины [8]–[12], [15], [24], [35].

Центром формирования видов рода *Pulsatilla* Adans., в том числе и *P. grandis*, были горы Центральной Европы и Сибири [3]. Развитие видов от предковой формы состоялось в не-

скольких направлениях: на запад во Францию, на север в Скандинавию и на восток к Северной Америке. Возникновение этих растений связывают с поздним неогеном [3], [14]. По Л.М. Кемулария-Натадзе [5], расцвет этих растений приходился на четвертичный период.

В целом для видов рода *Pulsatilla* характерен дизъюнктивный палеарктический ареал и широкая экологическая амплитуда, вызванная главным образом изменением климата в послеледниковый период [3], [35].

Род *Pulsatilla* по данным разных авторов насчитывает от 35 до 45 видов, большинство из которых встречаются на территории бывшего СССР [8]–[11], [35]. Ареал рода охватывает внетропические и полярные области северного полушария. Большинство видов растет в Евразии и только два вида распространены в Северной Америке. Во флоре Украины известно по разным данным 6–7 видов этого рода (*P. grandis* Wender., *P. patens* (L.) Mill., *P. pratensis* (L.) Mill., *P. taurica* Juz., *P. alba* Reichenb., *P. ucrainica* (Ugrinsky) Wissjul., ? *P. Wolfgangiana* Bess) [8]–[11].

С. Юзепчук в «Флоре СССР» [9] приводит всеобщее распространение *P. grandis*: Средняя Европа (Австрия, Венгрия, Южная Германия), Европейская часть СССР, юго-запад Европы.

В Европе существует много картосхем распространения родственного вида *Pulsatilla vulgaris* Mill. Но ареал *P. vulgaris* значительно больше. Так, на территории Великобритании проходит северо-западная граница ареала *P. vulgaris*, который здесь встречается на высоких меловых холмах и известняковых пастбищах в Йоркшире, Беркшире, Оксфорде и Суффолке. Северная граница географического распространения вида проходит по южному побережью Балтийского моря от Швеции к Германии. Восточной границей распространения вида является Россия, где он встречается в Удмуртии.

Ареал *P. grandis* значительно уже. Так, северная граница распространения вида проходит через Германию, восточная – в Украине. Нет данных о его распространении в Великобритании, России, Швеции и на островах Балтийского моря. Ареал *P. vulgaris* несколько смещен к северу по сравнению с *P. grandis*. Вне сплошного распространения известны места произрастания *P. vulgaris* в Словении, Боснии и Герцеговине [6], [8]–[11], [24], [31], [35].

Одни исследователи [8]–[10] рассматривают *P. grandis* как единственный европейский вид, другие относят к *P. grandis* только украинские популяции, а европейские – к *P. vulgaris* [15]. Или относят к *P. vulgaris* не только украинские, но и европейские популяции [11], [16], [24].

Приоритет должен был быть названию *P. vulgaris*. Но для популяций этого вида также характерна значительная изменчивость признаков, в связи с чем эти два вида могут быть отделены друг от друга. На основании этого Т.Г. Тутин [35] выделяет три подвида *P. vulgaris*:

– subsp. *vulgaris* – листья появляются одновременно с цветами, их размер > 100 мм. Базальные листья обычно разделены на более чем 100 частей. Листочки околоцветника узко эллиптические. Подвид имеет наибольший ареал, который тянется от севера Швеции до г. Бордо (Франция), а также от г. Глостершир (Англия) к г. Познань (Западная Польша), где он заменяется subsp. *grandis*;

– subsp. *grandis* – листья появляются после цветения, их размер < 40 мм. Базальные листья разделены на 40 частей. Листочки околоцветника широко эллиптические;

– subsp. *gotlandica* приуроченный к известняковым склонам на шведском острове Готланд.

Большинство ученых [8], [9], [13] придерживается мнения о том, что *P. vulgaris* является сингамеонимом, под которым, согласно В. Гранта [2], понимают сумму видов или подвидов, которые связаны между собой частой или эпизодической гибридизацией. Поэтому в состав *P. vulgaris* относят европейские популяции, известные под названием *Pulsatilla vulgaris* Mill. subsp. *grandis* (Wend.) Zamels и украинские популяции описаны как *Pulsatilla grandis* Wender. Мы разделяем это мнение и будем рассматривать ареал *P. grandis* как *Pulsatilla vulgaris* subsp. *grandis* в Европе и как *P. grandis* в Украине.

Приводим описание границ ареала *P. grandis* на основе критического анализа материалов «Flora Europaea» [35], монографии Aichele D., Schwegler H.W. [15] и других публикаций [1], [6]–[12], [17]–[34] (рисунок 1).

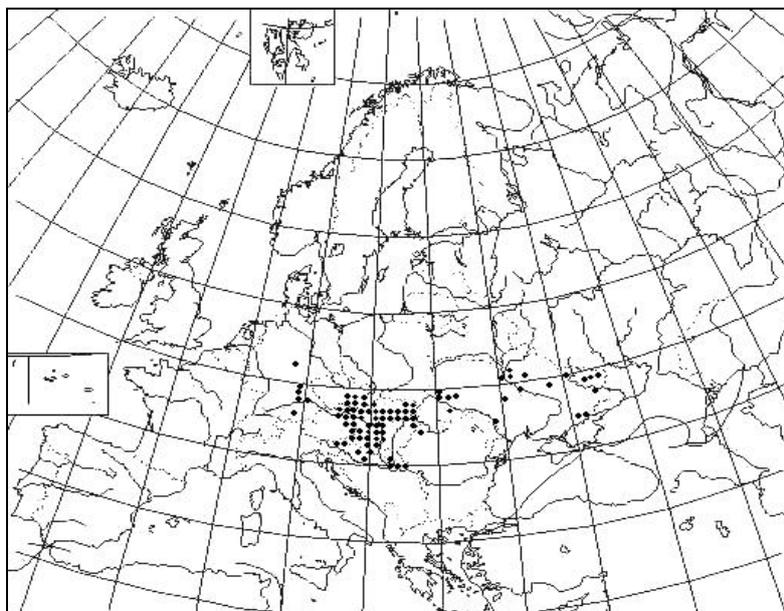


Рисунок 1 – Географическое распространение *P. grandis* в Европе по «Flora Europaea» [35]

Северная и западная граница распространения *P. grandis* проходит в Германии, которая является родиной вида. Растения здесь можно найти на территории Баварии в окрестностях городов Мюнхен, Нюрнберг, Аугсбург, Вюрцбург и Регенсбург. Вид занесен в Красную книгу Германии как таковой, что находится под угрозой исчезновения [17], [23], [28].

Далее ареал проходит в Австрии, где вид встречается на востоке страны в окрестностях г. Вена [23]. *P. grandis* изображен на гербе г. Трнава (Чехия), так как в его окрестностях есть большая популяция этих растений. Здесь известно около 200 мест произрастания с несколькими десятками тысяч особей, но их количество постоянно снижается из-за чрезмерного антропогенного воздействия (сбор на букеты, выкапывания, распашка земель, облесение степных склонов, выпас скота) [20], [21], [23], [29].

В Словении *P. grandis* имеет четыре места произрастания с несколькими сотнями особей: неподалеку населенных пунктов Бок, Болетин, Лубикно, Латек. Все они расположены в Субпаннонской ботанико-географической области в северо-восточной части Словении. Растения защищены и их количество остается стабильным. Вид занесен в Красную книгу Чехии и Словении [20], [21], [23].

Далее ареал *P. grandis* охватывает территорию от Сербии, Хорватии к Боснии и Герцеговине, где и проходит южная граница его распространения. В Сербии распространен вокруг г. Белград и г. Фрушка. В Хорватии вид растет в окрестностях г. Позега и вдоль побережья Адриатического моря. Классифицируется как находящийся под небольшой угрозой. В Боснии и Герцеговине *P. grandis* имеет сплошное распространение [19], [23], [26].

Через территорию Румынии ареал вида проходит в Молдову. В Румынии *P. grandis* встречается среди известняковых скал Рункула и Скаришоара-Белиоара, а также в окрестностях городов Салай, Сармазан [22], [30], [32]. В Молдове вид распространен в районах Унген, Кишинев, Лапушна, Дубоссары. Популяции немногочисленны, испытывают антропогенное влияние. Растет на средней и верхней части южной экспозиции известнякового склона урочища «Глубокая Долина» и на степных участках урочища «Бугорный» Каменского района, что в Приднестровье. Приводится также для окрестностей населенных пунктов Буторы, Колосово и Шипка Григориопольского района, Рашково Каменского района. Новое место произрастания – окрестности населенного пункта Новая Лунга Дубоссарского района [7], [18], [23].

В Словакии *P. grandis* растет многочисленными популяциями вблизи городов Кошице, Прешов, Зволен, Преvidза, Пьештяны. Известны также места произрастания вида у Скалице, на Брезовских горах, южной части Стразовских холмов, Словацком Рудогорьи и Низких Бескидах. Встречается в Паннонии, южной части Словакии и в предгорьях Западных Карпат [20], [21], [25], [34]. В Молдове, Румынии и Словакии вид охраняется как уязвимый [18], [20]–[22], [30].

В Венгрии растет в окрестностях городов Альфельд, Земплен, Бюкк, Матра, Буяк, Баконь. Охраняется на региональном уровне. Известно от 4 млн. до 5 млн. особей, количество которых медленно снижается [23], [27], [33]. Поэтому популяции *P. grandis* в Венгрии требуют значительной охраны.

Для Литвы указывается только одно место произрастания *P. grandis* в окрестностях г. Вильнюс [6].

В Польше *P. grandis* встречается на Польской низменности. На западе Польши *Pulsatilla vulgaris* subsp. *vulgaris* заменяется subsp. *grandis*. Так, вид обнаружен у Боянова и Девичьей Горы в Познани [31].

Далее ареал *P. grandis* охватывает территорию Украины, где и проходит восточная граница его распространения. Занесен в Красную книгу Украины как уязвимый [12]. Известно около 105 мест произрастания *P. grandis*. Большинство локалитетов вида сконцентрированы в 10 областях Украины: Зона широколиственных лесов – Ивано-Франковская, Львовская, Тернопольская, Хмельницкая, Черновицкая области; Лесостепная зона – Винницкая область; Прикарпатье – Черновицкая, Ивано-Франковская области; Степная зона – Днепропетровская и Одесская области. Вид исчез в Донецкой, Киевской и Черкасской областях [1], [8]–[11].

Ареал *P. grandis* в Украине испытывает регрессивные изменения, происходит сокращение численности его популяций. Исчезновение вида обусловлено антропогенным воздействием и природными факторами. Примерами антропогенного воздействия является срывание на букеты, выкапывания, вытаптывания растений, выпас скота, сенокос, выжигание, застройка и расширение границ населенных пунктов. Так, в результате застройки уничтожены большие по площади популяции *P. grandis* в окрестностях г. Ставище Киевской области; г. Киев, с. Николаевка Донецкой области; пгт. Игрень Днепропетровской области; г. Днепропетровск, с. Цецино Черновицкой области; с. Гнильче и с. Красилово Тернопольской области; г. Котовск Одесской области; с. Яблоновка Черкасской области. Через зарастания кустарников подавлено развитие вида в урочище «Воловье Северное» Тернопольской обл. Вследствие выжигания растительности значительно сократились площади популяций у с. Заволока Черновицкой области; с. Подлесье Львовской области; г. Каменец-Подольский Хмельницкой области; с. Межигорцы Ивано-Франковской области. Кроме того, вид уничтожается неконтролируемым сбором цветов на букеты и выкапыванием растений для переноса в сады во всех местах произрастания [1].

Выводы. По результатам исследований приведено географическое распространение *Pulsatilla grandis* Wender. в Европе и уточнены границы его ареала. Вид встречается в странах Центральной и Восточной Европы: Германии, Австрии, Чехии, Словении, Венгрии, Словакии, Польши, Хорватии, Боснии и Герцеговине, Сербии, Румынии, Молдове, Литве и Украине. Установлено, что ареал *P. grandis* рассматривается как *Pulsatilla vulgaris* subsp. *grandis* в Европе и как *P. grandis* в Украине. Популяции вида подвергаются значительному антропогенному воздействию. В разных странах Европы происходит инсультация популяций и сокращения ареала *P. grandis*. Вид имеет относительно ограниченное распространение и считается под угрозой исчезновения в таких странах, как Германия, Чехия, Словения. В Хорватии классифицируется как находящийся под небольшой угрозой. В Молдове и Словакии вид охраняется как уязвимый. В Венгрии охраняется на региональном уровне, но не введен в Красную книгу. В Украине классифицируется как уязвимый. *P. grandis* нуждается в охране во всех местах произрастания.

Литература

1. Горбняк, Л.Т. Поширення *Pulsatilla grandis* Wender. (*Ranunculaceae*) в Україні / Л.Т. Горбняк // Укр. ботан. журн. – 2012. – Т. 69. – № 3. – С. 371–379.
2. Грант, В. Видообразование у растений / В. Грант. – М. : Мир, 1984. – 528 с.
3. Зиман, С.Н. Морфология и филогения семейства лютиковые / С.Н. Зиман. – Киев : Наук. думка, 1985. – 248 с.
4. Каталог видів флори і фауни України, занесених до Бернської конвенції про охорону дикої флори і фауни та природних середовищ існування в Європі. Вип. I. Флора / під ред. В.І. Чопика. – К., 1999. – С. 13.

5. Кемулари-Натадзе, Л.М. Раналиевые на Кавказе и их таксономия / Л.М. Кемулари-Натадзе. – Тбилиси : Мецниереба, 1966. – 170 с.
6. Красная книга СССР / А.М. Бородин, А.Г. Банников, В.Е. Соколов [и др.]. – Ч. 2. – М. : Лесная промышленность, 1984. – 478 с.
7. Тищенко, В.С. Флористические раритеты Украины в «Петрофильном комплексе Рашково» / В.С. Тищенко // Актуальні проблеми ботаніки та екології : матеріали міжнар. конф. – Тернопіль : Підручники і посібники, 2009. – С. 86–87.
8. Флора Восточной Европы : в 30 т. / под ред. Н.Н. Цвелева. – СПб. : Мир и Семья, 2001. – X т. – С. 90–91.
9. Флора СССР : в 30 т. / под ред. Б.К. Шишкина. – М.–Л. : Изд-во АН СССР, 1937. – VII т. – С. 293–294.
10. Флора УРСР : в 12 т. / под ред. М.В. Клокова, О.Д. Вісюліної. – К. : Вид-во АН УРСР, 1953. – V т. – С. 86–87.
11. Флора Средней и Южной России. / под ред. И. Шмальгаузена. – К., 1895. – I т. – С. 8–9.
12. Червона книга України. Рослинний світ / під ред. Я.П. Дідуха. – К. : Глобалконсалтинг, 2009. – С. 564.
13. Черепанов, С.К. Сосудистые растения СССР / С.К. Черепанов. – Л. : Наука, 1981. – 510 с.
14. Чупов, В.С. Биосистематические исследования в трибе *Anemoneae* : автореф. дис. ... канд. биол. наук / В.С. Чупов. – Л., 1975. – 22 с.
15. Aichele, D. Taxonomie der Gattung *Pulsatilla* / D. Aichele, H. Schwegler // Feddes Repert. – 1957. – № 60. – 230 p.
16. Besser, W. Enumeration plantarum hucusque in Volhynia, Podolia, gub. Kioviensi, Bessarabia cis Thyraica et circa Odessam collectarum simul cum observationibus in rimitias Florae Galicia Austriaceae / W. Besser. – Vilnae, 1822. – 111 p.
17. Bundesamt für Naturschutz, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Natura 2000 in Deutschland – Edelsteine der Natur. Korrigierte Auflage. – 2010. – Т. 2. – 75 p.
18. Cartea Roşie a Republicii Moldova. – Ch. : Ştiinţa, 2002. – 288 p.
19. Crvena Knjiga biljnih vrsta Republike Hrvatske / ed. J. Sugar. – Zagreb, 1994. – 522 p.
20. Červená kniha ohrozených a vzácných druhů rostlin a Živočichů SR a CR. Vyšší rostliny. Příroda a. s. / ed. J. Čeřovský. – Bratislava, 1999. – Vol. 5. – 456 p.
21. Červená kniha ohrozených druhov rastlin a živočíchov SR a CR. / ed. F. Kotlaba. – Bratislava, 1995. – Vol. 4. – 221 p.
22. Dihoru, G. Plante rare, periclitare și endemice în Flora României. Lista roşie / G. Dihoru, A. Dihoru. – Bucureşti : Acta Bot. Horti Bucurest., 1994. – P. 173–197.
23. Dostalova, A. *Pulsatilla grandis*. IUCN Red List of Threatened Species [Electronic resource] / A. Dostalova. – Version 2013. – Mode of access : www.iucnredlist.org. – Date of access : 03.01.2014.
24. Hegi, G. Illustrierte Flora von Mitteleuropa / G. Hegi. – Berlin : Verlag Paul Parey, 1975. – Vol. 3. – P. 335–337.
25. Janisová, M. Travinnobylinná vegetácia Slovenska – elektronický expertný systém na identifikáciu syntaxónov. / M. Janisová. – Bratislava : Botanický ústav SAV, 2007. – 263 p.
26. Josifovic, M. Flora of SR Serbia. Ed. I–IX / M. Josifovic. – Beograd : SANU, 1970–1977.
27. Király, G. Vörös Lista A magyarországi edényes flóra veszélyeztetett fajai / G. Király. – Sopron, 2007. – 75 p.
28. Korneck, D. Rote Liste der Farn- und Blütenpflanzen (Pteridophyta et Spermatophyta) Deutschland / D. Korneck, M. Schnittler, I. Vollmer. – Münster : Landwirtschaftsverlag, 1996. – 207 p.
29. Moravek, J. Rostlinná společenstva České republiky a jejich ohrožení / J. Moravek. – Příloga, 1995. – Vyd. 2, ed. 2. – 206 p.
30. Oltean, M. Lista roşie a plantelor superioare din România. Studii, Sinteze, Documentații de Ecologie / M. Oltean. – Acad. Română, 1994. – 52 p.
31. Polska czerwona księga roślin. Paprotniki i rośliny kwiatowe / R. Kazmierczakowa, K. Zarzycki. – Cracow, 2001. – P. 138.
32. Pop, I. Vegetatia solurilor saraturoase din Romania / I. Pop // Contrib. Bot. – 2002. – Vol. 35. – 332 p.
33. Soó, R. A magyar flóra és vegetáció rendszertani – növényföldrajzi kézikönyve. Ed. I–VI / R. Soó. – Budapest : Akadémiai Kiadó, 1964–1980. – 655 p.
34. Stanová, V. Katalog Biotopov Slovenska / V. Stanová, M. Valachovic. – Bratislava : Daphne – Inštitut aplikovanej ekológie, 2002. – 225 p.
35. Tutin, T.G. Flora Europaea / T.G. Tutin, V.E. Heywood, N.A. Burges. – Cambridge, 1976. – 230 p.

УДК 599.731.1:576.89(476.2)

Клинико-физиологическое состояние и структура паразитоценоза дикого кабана, обитающего на территории радиоактивного загрязнения

А.В. Гулаков¹, В.А. Пенькевич²

Представлены данные по физиологическому состоянию и структуре паразитоценоза дикого кабана, обитающего на территории с высокой плотностью радиоактивного загрязнения. Отмеченные нарушения физиологического состояния дикого кабана в первые годы наблюдения могут быть вызваны радиационным поражением данных животных в начальный период аварии на Чернобыльской АЭС. Однако наблюдаемые в последние годы различия гематологических показателей животных, добытых в зоне отчуждения и отселения по сравнению с дикими копытными, отстрелянными на территории контрольного района, вероятно, обусловлены различиями в дозовых нагрузках, полученными животными в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС. У дикого кабана, обитающего на территории радиоактивного загрязнения, было выявлено 24 вида паразитов: 17 видов гельминтов и 7 – паразитических простейших. Паразитарная система данного вида характеризуется как нематодозно-протозоозная.

Ключевые слова: дикий кабан, физиологическое состояние, структура паразитоценоза, авария на Чернобыльской АЭС.

The data on physiological condition and frame parasitocenoses of the wild boar living in the territory with high density of radioactive contamination are presented. Reported violations of the physiological state of the wild boar in the early years of observation may be caused by radiation injury of these animals in the initial period of the Chernobyl accident. However, in recent years the observed differences in hematological parameters of the animals caught in the zone of exclusion and resettlement as compared to wild ungulates, shoot in the territory of the control area, are probably due to the differences in radiation doses received by animals in remote period after the accident at the Chernobyl nuclear power plant. At the wild boar dwelling in terrain of radioactive contamination, 24 species of parasites have been revealed: 17 species of helminthes and 7 – the parasitic elementary. The parasitic system of the yielded species is characterized as nematosis-protozooz.

Keywords: a wild boar, a physiological condition, structure of parasitocenosis, failure on the Chernobyl atomic power station.

Введение. В результате катастрофы и загрязнения обширной территории радиоактивными выбросами Чернобыльской АЭС дикие животные подверглись хроническому воздействию как внешнего, так и инкорпорированного облучения.

В настоящее время в большинстве случаев, при которых организмы подвергаются воздействию радиации, как от естественных, так и от техногенных источников, речь идет об облучении в небольших дозах. Поэтому главную тревогу вызывают последствия радиационного воздействия в малых дозах, особенности биологических эффектов которых до сих пор являются мало изученными [1], [2], [3].

Состояние иммунной системы организмов, подвергшихся воздействию радиационного фактора, играет важную роль в формировании патологий и осложнений после аварии. Относительно мало сведений о последствиях радиационных аварий и инцидентов, а также хронического воздействия малых доз ионизирующего излучения на иммунитет [4].

Произошедшая техногенная катастрофа привела также к появлению естественного полигона с новым фактором воздействия на паразитоценозы: повышенный уровень ионизирующего излучения, прекращение хозяйственной деятельности, введение охранного режима. В результате сложились своеобразные экологические условия: хорошая кормовая база, отсутствие фактора беспокойства на протяжении четверти века, большая площадь (216,2 тыс. га), оказывающие огромное влияние на фауну и флору данного региона.

Материал и методика исследований. Радиоэкологический мониторинг отдельных популяций диких промысловых животных проводился на территории Белорусского Полесья. Белорусское Полесье занимает площадь около 6,1 млн. га, или 30 % общей площади землепользования Республики Беларусь, и включает 28 административных районов: 12 – Гомельской, 12 – Брестской, 3 – Минской и 1 – Могилевской областей [5].

Основным объектом исследований являлся дикий кабан, обитающий на территории радиоактивного загрязнения после катастрофы на Чернобыльской АЭС. Исследования проводились как на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника, так и на местности с невысоким уровнем радиоактивного загрязнения.

Оценку клинико-физиологического состояния животных проводили согласно общепринятым методикам. Общее состояние животных определяли визуально во время кормежки или отдыха животных (дыхание, координацию движений, обоняние, остроту зрения, поедаемость корма).

Сразу после убоя животных определяли упитанность, состояние шерстного покрова, видимых слизистых оболочек, лимфатических узлов. Учитывали возраст животного, вес, половые различия, количество и состояние молодняка.

При патологоанатомическом обследовании учитывали правильность расположения внутренних органов, их величину, структуру, новообразования, поражения от различных инфекций и инвазий. Кровь у диких животных отбирали сразу после убоя из яремной вены, а при быстрой свертываемости из сердца, в стеклянные пробирки – со стабилизатором (1 % раствор гепарина) для гематологических исследований и без стабилизатора для получения сыворотки крови (биохимические исследования). Состав крови определяли по общепринятым методикам. Выведение лейкограммы крови проводили с помощью микроскопа на окрашенных мазках крови по Романовскому [6].

Биохимические показатели определяли: общий белок (рефрактометрическим методом), белковые фракции (турбидиметрическим методом), калий и натрий (методом пламенной фотометрии), альфа-амилазу (методом Каровея).

Проведены гельминтологические вскрытия по К.И. Скрябину и копроскопия их экскрементов следующими методами: Калантарян с насыщенным раствором азотнокислого натрия (селитры), последовательных сливов и Бермана [7], [8].

Результаты исследований и их обсуждение. При проведении радиоэкологического мониторинга за дикими копытными, определенный интерес представляла оценка клинического состояния отдельных популяций животных, обитающих на местности с высоким уровнем радиоактивного загрязнения.

Клиническое состояние животных в целом за весь период исследований не имело существенных отклонений от физиологической нормы. Визуальный осмотр и наблюдение за животными в природной среде показали, что у них хорошее обоняние, острота зрения, не нарушена координация движения и частота дыхания, отмечается хорошая поедаемость корма. Не приходилось встречать животных с аномальным развитием (уродства, гигантизм, карликовость). За время наблюдения за отдельными популяциями диких животных встречались особи разных возрастных групп. У кабана наблюдали и добывали особей не старше 5–7 лет. Не было отмечено нарушений внутриутробного развития плода у дикого кабана, у самок отстрелянных животных было от 4 до 9 эмбрионов.

В результате послеубойного осмотра было установлено, что у всех добытых животных упитанность хорошая, кожные покровы чистые, эластичные, шерстный покров густой и прочно удерживается. Органы и ткани находились в естественном положении без изменений, кроме пулевых ранений.

Анализ крови диких кабанов показал, что у животных, добытых в сезон 1990–1991 гг. в зоне отчуждения и зоне отселения, наблюдалось несущественное снижение количества лейкоцитов до уровня 6,7–7,3 тыс./мкл. В то время как у животных, обитающих на территории Гомельского района (контроль), их количество составило 9,3 тыс./мкл.

В период 1992–1993 гг. у кабанов из зоны отчуждения отмечены аналогичные изменения в составе крови с существенным снижением количества лейкоцитов до 3,5 тыс./мкл. При проведении дальнейших исследований количество лейкоцитов у животных, добытых на территории с высоким уровнем радиоактивного загрязнения, составляло у диких кабанов зоны отчуждения 3,4–4,9 тыс./мкл и зоны отселения 3,1–4,9 тыс./мкл соответственно. Данный показатель был в среднем в 1,5–2,0 раза ниже по сравнению с животными, обитающими на относительно «чистой» территории, у которых количество лейкоцитов составляло около 8,0 тыс./мкл.

Остальные форменные элементы крови добытых диких кабанов не выходили за пределы нормы. Так количество эритроцитов у кабанов, обитающих на территории зоны отчуждения, составляло 4,9–6,4 млн./мкл и 5,8–6,2 млн./мкл у животных зоны отселения. Наибольшее количество эритроцитов отмечалось у животных, отстрелянных на территории контрольного района – 5,7–7,7 млн./мкл.

Содержание гемоглобина составляло 11,7–16,4 г % у животных, добытых на территории зоны отчуждения, и 10,3–16,0 г % у дикого кабана зоны отселения.

Следует отметить, что процентное содержание сегменто-ядерных нейтрофилов у дикого кабана было в 2–3 раза ниже физиологических параметров независимо от территории обитания.

Животные, добытые в Гомельском районе в 1999–2000 гг., имели гематологические показатели, существенно не отличающиеся от нормативных значений.

Однако, наблюдалось значительное колебание уровня α -амилазы в крови диких кабанов в зависимости от территории обитания. Концентрация α -амилазы у кабанов, добытых на территории зоны отселения была в среднем в два раза ниже, чем у животных зоны отчуждения – $297,4 \pm 29,2$ г/час:л и $608,3 \pm 144,4$ г/час:л соответственно.

В период 1996–1997 гг. нами было отмечено более значительное снижение уровня α -амилазы до $145,4 \pm 34,7$ г/час:л. для животных зоны отчуждения и $65,8 \pm 11,5$ г/час:л – для зоны отселения. В 1998–1999 гг. у кабанов зоны отчуждения уровень амилазы снизился до $26,9–70,5$ г/час:л., а в 2000 г. вырос до $134,9 \pm 19,0$ г/час:л., в то время, как в зоне отселения он составил $67,7 \pm 7,1$ г/час:л. и у животных, обитающих на территории контрольного района – $35,9 \pm 5,4$ г/час:л.

Также нами было изучено состояние паразитоценозов дикого кабана, обитающего на территории радиоактивного загрязнения.

Кабан (*Sus scrofa* L., 1758) регистрируется на всей территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника. Численность составляет около 1650 особей, при плотности 8,3 ос./1000 га пригодной для обитания вида площади. В заповеднике обитает около 4 % популяции этого вида в республике или около 15 % численности в Гомельской области [9].

Широкое распространение и ущерб, причиняемый паразитами кабана, выдвигает их изучение в число актуальных задач популяционной экологии.

До аварии на Чернобыльской АЭС у кабана, обитающего на Полесье, насчитывалось – 12 видов паразитических червей [10]. После аварии, в созданном Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике, только отмечалось о широком распространении в популяции кабана таких гельминтов, как *Metastrongylus elongatus*, *M. pudendotectus*, *M. salmi*, *Dicrocoelium lanceatum*, *Ascaris suum*, *Trichinella spiralis*, *Taenia hydatigena larvae* [11].

Нами у кабана выявлено 24 вида паразитов. Гельминты представлены 17 видами: *Fasciola hepatica* (2,3 %), *Alaria alata larvae* (2,3 %), *Sparganum spiromenra erinacei* (50,6 %), *Echinococcus granulosus larvae* (17,8 %), *Taenia hydatigena larvae (Cysticercus tenuicollis)* (10,0 %), *Metastrongylus elongatus* (77,7 %), *Metastrongylus pudendotectus* (77,7 %), *Metastrongylus salmi* 77,7 %), *Globocephalus urosbulatus* (26,6 %), *Ascaris suum* (16,1 %), *Oesophagostomum dentatum* (10,5 %), *Ascarops strongylina* (9,2 %), *Physocephalus sexalatus* (15,2 %), *Trichocephalus suis* (33,3 %), *Strongyloides ransomi* (12,6 %), *Trichinella spiralis* (5,3 %), *Macracanthorhynchus hirudinaceus* (54,0 %).

У кабана обитают 7 видов паразитических простейших: в толстом кишечнике – *Balantidium suis* (42,9 %), *Trichomonas suis* (7,1 %), в тонком кишечнике – *Eimeria deblicki*, *E. perminuta*, *E. polita*, *Isospora suis* (46,1 %), в мышцах – *Sarcocystis (suicanis) mischeriana* (9,2 %).

Нематоды представлены одиннадцатью видами (64,7 %), цестоды – тремя (17,6 %), трематоды – двумя (11,8 %) и один вид (5,9 %) акантоцефал. Исходя из этого, паразитарную систему данного вида можно охарактеризовать как нематодозно-протозоозную (рисунок 1).

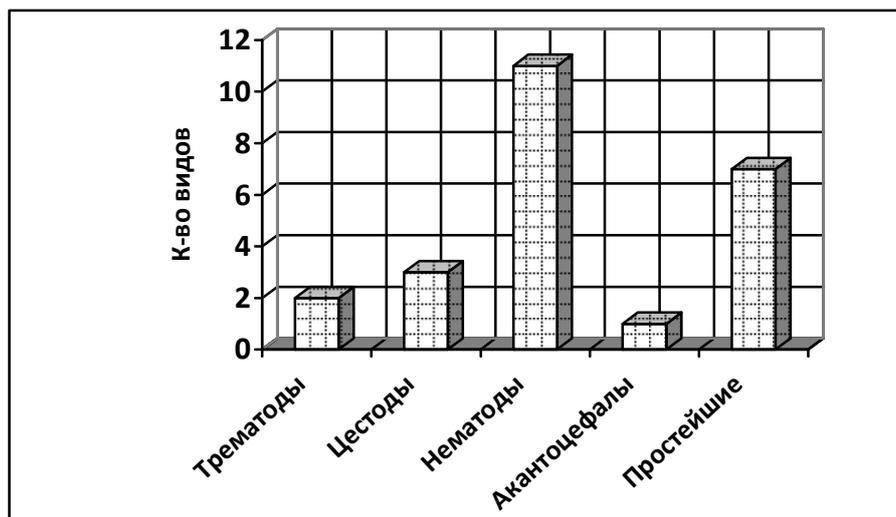


Рисунок 1 – Паразитарная система кабана

В кишечнике обитает 8 (47,1 %) видов гельминтов: нематод 6 – *Globocephalus urosubulatus* (5–34 экз.), *Ascaris suum* (1–4 экз.) (рисунок 2).

Рисунок 2 – Нематоды *Ascaris suum*

Oesophagostomum dentatum (16–97 экз.), *Ascarops strongylina* (2–19 экз.), *Physocephalus sexalatus* (3–35 экз.), *Trichocephalus suis* (8–39 экз.) (рисунок 3), *Strongyloides ransomi* (2–12 экз.), акантоцефал один – *Macracanthorhynchus hirudinaceus* (6–65 экз.) (рисунок 4), в легких четыре вида (23,5 %): нематод три – *Metastrongylus elongatus*, *Metastrongylus pudendotectus*, *Metastrongylus salmi* (11–1128 экз.) и трематод один вид – *Alaria alata larvae* (1–2 экз.); в печени два вида (11,8 %): трематод один – *Fasciola hepatica* (2–4 экз.), цестод один – *Echinococcus granulosus larvae* (1–5 экз.); в подкожной клетчатке и на серозных покровах по одному виду цестод, соответственно – *Sparganium spiromenra erinacei* (3–107 экз.) и *Taenia hydatigena larvae (Cysticercus tenuicollis)* (1–4 экз.). В мышцах один вид (5,8 %) – личинки нематод *Trichinella spiralis* (3–14 экз.).



Рисунок 3 – Нематоды *Trichocephalus suis*

У кабана основу гельминтокомплекса составляют метастронгилиды (легочные нематоды) и макраканторинхусы (колючеголовые) или скребни (гельминты кишечника). Основу протозоозов – эймерии, изоспоры (46,1 %) и балантидии (42,9 %) – (гельминты кишечника).

Нематоды: *Metastrongylus elongatus*, *M. pudendotectus* и *M. salmi*, отмеченные у 80,5 % животных, с ИИ от 11 до 1128 экз. Все виды метастронгилид встречаются в легких (рисунок 5) в смешанной инвазии, но преобладает вид – *Metastrongylus pudendotectus* (5–579 экз.).



Рисунок 4 – Скребни *Macracanthorhynchus hirudinaceus* в тонком кишечнике кабана

Анализ исследования кабана показывает, что в 100 % случаев у кабана встречается смешанная инвазия – паразитоценоз. Паразитирует сочетание паразитов (от 2 до 8 видов на животное). Паразитирование только двух видов зарегистрировано у 4,7 % животных. У большинства животных одновременно встречались три (19,0 %), четыре (33,3 %) и пять (23,8 %) видов паразитов. Шесть видов отмечено у 9,5 %, семь и восемь – у 4,8 % кабанов.



Рисунок 5 – Метастронгилюсы в бронхиолах легких кабана

Заключение. Таким образом, в результате проведенных исследований было установлено, что у диких копытных, добытых на территории зоны отчуждения в более ранний период исследований, отмечен ряд изменений физиологического состояния, которые менее выражены или отсутствовали у животных аналогичных видов из зоны отселения и контрольного района. Воздействие радиационного фактора, в комплексе с другими неблагоприятными факторами окружающей среды, на систему кроветворения диких животных проявилось в виде выраженной лейкопении и эозинофилии, особенно у копытных в период 1990–1993 гг., с нередко выраженным лимфоцитозом и снижением процента сегментоядерных нейтрофилов. Изменения уровня тиреоидных гормонов в сыворотке крови копытных из зоны отчуждения и зоны отселения свидетельствуют о нарушении функции щитовидной железы.

Отмеченные нарушения в физиологическом состоянии диких копытных в первые годы наблюдения (1990–1993 гг.) могут быть вызваны радиационным поражением данных животных в начальный период аварии на Чернобыльской АЭС.

У кабана заповедника обнаружено 24 вида паразитов: 17 видов гельминтов: *Fasciola hepatica*, *Alaria alata* larvae, *Sparganum spiromenra erinacei*, *Echinococcus granulosus* larvae, *Taenia hydatigena* larvae (*Cysticercus tenuicollis*), *Metastrongylus elongatus*, *Metastrongylus pudendotectus*, *Metastrongylus salmi*, *Globocephalus urosubulatus*, *Ascaris suum*, *Oesophagostomum dentatum*, *Ascarops strongylina*, *Physocephalus sexalatus*, *Trichocephalus suis*, *Strongyloides ransomi*, *Trichinella spiralis*, *Macracanthorhynchus hirudinaceus*. 7 – паразитических простейших – *Balantidium suis*, *Trichomonas suis*, *Eimeria deblicki*, *E. perminuta*, *E. polita*, *Isospora suis*, и *Sarcocystis (suicanis) mischeriana*. Паразитарная система данного вида характеризуется как нематодозно-протозоозная.

Литература

1. Бурлакова, Е.Б. Эффект сверхмалых доз / Е.Б. Бурлакова // Вестник РАН. – 1994. – Т. 64. – № 5. – С. 425.
2. Спитковский, Д.М. Концепция действия низких доз ионизирующей радиации на клетки и ее возможное использование для интерпретации медико-биологических последствий аварии на ЧАЭС / Д.М. Спитковский // Радиационная биология. Радиоэкология. – 1992. – Т. 32. – № 3. – С. 382–400.
3. Шевченко, В.А. Генетические последствия действия ионизирующих излучений / В.А. Шевченко, М.Д. Померанцева. – Москва : Наука. – 1985. – 279 с.
4. Шарабчиев, Ю.Т. Состояние иммунологической реактивности у лиц, пострадавших от радиационных аварий / Ю.Т. Шарабчиев, Н.В. Базулько // Чернобыль-индекс. Междисциплинарный указатель литературы по проблемам Чернобыля. – Минск : Университетское, 1991. – Вып. 1. – С. 68–83.
5. Ильина, З.М. Использование мелиорированных земель Полесья / З.М. Ильина, П.Г. Чухольский, О.М. Трифонова. – Минск : Ураджай, 1998. – 77 с.
6. Дервиз, Г.В. Количественное определение гемоглобина крови посредством аппарата ФЭК-М / Г.В. Дервиз, А.И. Воробьев // Лабораторное дело – 1959. – № 3. – С. 3.

7. Ивашкин, В.М. Методы сбора и изучения гельминтов наземных млекопитающих / В.И. Ивашкин, В.Л. Контримавичус, Н.С. Назарова. – М. : Наука, 1971. – 124 с.
8. Ятусевич, А.И. Паразитология и инвазионные болезни животных / А.И. Ятусевич., Н.Ф. Карасев, В.А. Пенькевич. – Минск : Дизайн ПРО, 2004. – 240 с.
9. Кучмель, С.В. Видовой состав млекопитающих отрядов насекомоядные, зайцеобразные, хищные, грызуны и парнокопытные Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / С.В. Кучмель // Фаунистические исследования в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике: сборник научных трудов. – Гомель : РНИУП «Институт радиологии», 2008. – С. 38–64.
10. Анисимова, Е.И. Численность и распространение эпидемически и эпизоотически опасных видов паразитов в зоне аварии ЧАЭС / Е.И. Анисимова [и др.] // Актуальные проблемы медицинской и ветеринарной паразитологии : тезисы докладов Международной научной конференции. – Витебск, 1993. – С. 120–121.
11. Одинцова, Т.М. Особенности динамики гельминтоценозов диких копытных в условиях ПГРЭС / Т.М. Одинцова // 10 лет Полесскому государственному радиационно-экологическому заповеднику : сборник статей. – Минск, 1998. – С. 221–224.

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

²Полесский государственный радиозэкологический заповедник

Поступила в редакцию 27.06.2014

УДК 57.03:581.526.45(282.247.322)(476.2-37Мозырь)

Оценка состояния пастбищных экосистем поймы р. Припять Мозырского района

Н.М. ДАЙНЕКО, С.Ф. ТИМОФЕЕВ, С.В. ЖАДЬКО

Изученные пастбищные экосистемы поймы р. Припять обладают высокой продуктивностью травостоя, оптимальной онтогенетической структурой и агроботаническим составом и хорошим кормовым достоинством.
Ключевые слова: пойма, луговые экосистемы, продуктивность, онтогенетическая структура, зоотехнический анализ.

The pastures under study have high grass productivity, optimal developmental structure and good feeding properties.

Keywords: floodplain, grasslands, productivity, developmental structure, zootechnical analysis.

Введение. В настоящее время реализуется Государственная программа социально-экономического развития и комплексного использования природных ресурсов Припятского Полесья на 2010–2015 гг. Одним из важных вопросов является повышение эффективности использования естественных пойменных лугов для развития мясного скотоводства и получения качественной говядины [1].

Пойменные угодья в Гомельской области занимают 92,1 тыс. га или более половины (54,6 %) всех пойменных лугов Беларуси. Из них на выпас используется 12,2 тыс. га. В настоящее время на пойменных землях Гомельской области сконцентрировано около 12 тыс. голов скота, из которых более 4 тыс. относится к чисто мясному направлению [2].

Методика исследований. При выполнении исследований почвенно-грунтовые условия луговых экосистем, агрохимический анализ почвы, зоотехнический анализ кормов, продуктивность травостоев изучались общепринятыми в геоботанике методами [3], [4], [5], [6]. Флористический состав изучали по методу А.А. Корчагина [7]. Классификация луговых экосистем выполнена на основе эколого-флористических методов Браун-Бланке [8].

Результаты исследований и анализ. В вегетационный период 2013 г. нами изучались луговые экосистемы левобережной поймы р. Припять Мозырского района при четырехкратном пастбищном использовании. Ниже приводится характеристика 8 исследуемых объектов.

Координаты изучаемых луговых экосистем р. Припять: N 52° 06' 756"; E 29° 11' 305".

Объект 1. Выровненное понижение левобережной центральной поймы, 100×200 м. Проектное покрытие 100 %. Высота травостоя 70–80 см. Почва перегнойно-иловато-глеевая. По эколого-флористической классификации луговая экосистема отнесена к ассоциации *Caricetum gracilis*, вариант *Glyceria maxima*, субвариант *typica*. Диагностическим видом ассоциации является *Carex acuta*. Диагностическими видами варианта – *Glyceria maxima*, *Galium palustre*, *Ranunculus flamula*, *Glyceria fluitans*, *Poa palustris*, *Carex vesicaria*. В травостое также встречались *Ranunculus repens*, *Myosotis palustris*, *Agrostis stolonifera*, *Eleocharis palustris*, *Alisma lanceolata*, *Mentha arvensis*, *Carex vulpine*, *Juncus atratus*, *Lysimachia nummularia*, *Potentilla anserine*, *Stellaria palustris*, *Iris pseudacorus*.

Объект 2. Грива левобережной поймы, ширина 10 м, длина 100 м. Проектное покрытие 80 %. Высота травостоя 50–60 см. Почва дерновая, слаборазвитая, супесчаная. По эколого-флористической классификации луговая экосистема отнесена к ассоциации *Agrostietum tenuis*. Диагностическим видом ассоциации является *Agrostis tenuis*. Диагностическими видами *Molinio-Arrhenatheretea* – *Vicia cracca*, *Plantago lanceolata*; диагностическим видом союза *Molinion* – *Allium angulosum*; диагностический вид *Agropyro* – *Rumicion crispi* – *Leontodon autumnalis*. Диагностический вид – *Rumex acetosella*. Также встречаются виды: *Juncus atratus*, *Tanacetum vulgare*, *Hieracium umbellatum*, *Rumex thyrsoiflorus*, *Gratiola officinalis*, *Ranunculus flamula*.

Объект 3. Склон гривы левобережной центральной поймы. Проектное покрытие 90 %. Высота травостоя 70–80 см. Почва дерново-глееватая. По эколого-флористической классификации

луговая экосистема отнесена к ассоциации *Poo palustris* – *Alopecuretum pratensis*, вариант *Agrostis canina*. Диагностическими видами ассоциации являются *Poa palustris*, *Juncus atratus*, *Hieracium umbellatum*; Д.в. варианта – *Agrostis canina*, *Plantago lanceolata*, *Eleocharis palustris*. Д.в. Molinion – *Allium angulosum*, *Cnidium dubium*. Д.в. Caltion – *Myosotis palustris*; *Agropyro* – *Rumicion crispi* – *Ranunculus repens*, *Potentilla anserine*, *Leontodon autumnalis*. Также встречаются *Lysimachia nummularia*, *Rumex thyriflorus*, *Mentha arvensis*.

Объект 4. Межгрядное понижение, ширина 15 м, длина 100 м. Проектное покрытие – 100 %, высота 90 см. По эколого-флористической классификации луговая экосистема отнесена к ассоциации *Caricetum vesicariae* Br.-Bl. et Denis 1926, союзу *Magnocaricion elatae* Koch 1926, порядку *Magnocaricetalia Pignatti* 1953, классу *Phragmito-Magnocaricetea Klika* in *Klika et Novak* 1941.

Объект 5. Плоская грива левобережной центральной поймы шириной 25 м, длиной 150 м. Проектное покрытие – 90 %, высота травостоя 60–65 см. Почва дерново-глееватая супесчаная. Аспект травостоя зеленоватый с пепельным оттенком от соцветий полевицы виноградниковой. Продуктивность 20–25 ц/га сена. По эколого-флористической классификации луговая экосистема отнесена к ассоциации *Agrostis vinealis*, субассоциации *Koelerietosum delavignei*, вариант *Allium angulosum*. Диагностический вид ассоциации *Agrostis vinealis*, диагностический вид субассоциации – *Koeleria delavignei*, *Poa angustifolia*; диагностический вид варианта – *Allium angulosum*, *Vicia cracca*, *Potentilla erecta*, *Ranunculus repens*, *Ranunculus acris*, *Dianthus borbasii*. Диагностическим видом *Molinio-Arrhenatheretea* – *Plantago lanceolata*. Также встречаются *Rumex thirsiflorus*, *Stellaria graminea*, *Festuca rubra*, *Prunella vulgaris*, *Juncus atratus*.

Объект 6. Межгрядное понижение, ширина 15 м, длина 100 м. Проектное покрытие 85–90 %. По эколого-флористической классификации луговая экосистема отнесена к ассоциации *Caricetum vulpinae* Novynski 1927, вариант *Agrostis canina*, союзу *Magnocaricion elatae* Koch 1926, порядку *Magnocaricetalia Pignatti* 1953, классу *Phragmito-Magnocaricetea Klika* in *Klika et Novak* 1941.

Объект 7. Плоское понижение левобережной поймы, ширина 20 м, длина 150 м. Проектное покрытие 80–90 %, высота 120–130 см. Почва дерново-глееватая супесчаная. По эколого-флористической классификации луговая экосистема отнесена к ассоциации *Phalaroidetum arundinacea* Libbert 1931, союзу *Magnocaricion elatae* Koch 1926, порядку *Magnocaricetalia Pignatti* 1953, классу *Phragmito-Magnocaricetea Klika* in *Klika et Novak* 1941.

Объект 8. Плоская равнина левобережной центральной поймы. Проектное покрытие 80–90 %, высота 70–80 см. По эколого-флористической классификации луговая экосистема относится к ассоциации *Poo palustris-Alopecuretum pratensis*, вариант *Agrostis canina*, союзу *Alopecurion pratensis* Passarge 1964, порядку *Molinietalia W. Koch* 1926, классу *Molinio-Arrhenatheretea R. Tx.* 1937.

Результаты исследований луговых экосистем использования поймы р. Припять показали, что почвы пастбищных угодий сильнокислые, характеризуются очень низким содержанием подвижного фосфора и подвижного калия. Особенностью почв является высокое содержание органического вещества, что, несомненно, связано с периодическим затоплением луга (таблица 1).

Таблица 1 – Агрохимический анализ почвы ассоциаций луговых экосистем р. Припять

Ассоциация	Определяемые показатели			
	pH _{KCl}	Калий (подвижный), мг/кг	Фосфор (подвижный), мг/кг	Органическое в-во (гумус), %
1	2	3	4	5
<i>Caricetum gracilis</i>	4,30	125	13	6,71
<i>Agrostietum tenuis</i>	4,10	36	49	2,38
<i>Agrostis vinealis</i>	3,84	55	28	5,71
<i>Poo palustris-Alopecuretum pratensis</i> , вариант <i>Agrostis canina</i>	4,21	103	20	4,20
<i>Agrostietum vinealis</i>	3,97	48	13	4,37
<i>Caricetum vulpinae</i>	4,14	89	34	6,12
<i>Phalaroidetum arundinacea</i>	4,56	96	19	4,96
<i>Poo palustris-Alopecuretum pratensis</i> , вариант <i>Agrostis canina</i>	4,21	103	20	4,20

Анализ ассоциаций (таблица 2) луговых экосистем пастбищного использования показал, что наиболее высокая продуктивность травостоя отмечена у ассоциации *Phalaroidetum arundinacea* и *Caricetum gracilis*.

Таблица 2 – Продуктивность ассоциаций луговых экосистем поймы р. Припять при пастбищном использовании

Название ассоциации	Продуктивность, ц/га сух. массы
<i>Caricetum gracilis</i>	46,4
<i>Agrostietum tenuis</i>	26,7
<i>Poa palustris – Alopecuretum pratensis</i>	38,9
<i>Caricetum vesicariae</i>	41,3
<i>Agrostietum vinealis</i>	27,8
<i>Caricetum vulpinae</i>	35,6
<i>Phalaroidetum arundinacea</i>	52,1
<i>Poa palustris-Alopecuretum pratensis</i> , вариант <i>Agrostis canina</i>	37,6

Анализ участия агроботанических групп (таблица 3) в составе ассоциаций луговых экосистем показал, что из восьми ассоциаций у пяти преобладала группа злаков – 80–90 %, а у трех ассоциаций – группа осок: 70–80 %. Во всех ассоциациях группа бобовых отсутствовала. Участие группы разнотравья в составе ассоциаций колебалось от 5 до 15 %.

Таблица 3 – Участие агроботанических групп (%) в составе ассоциаций поймы р. Припять

Название ассоциации	Агроботанические группы			
	злаки	осоки	бобовые	разнотравье
<i>Caricetum gracilis</i>	18,3	71,5	-	10,2
<i>Agrostietum tenuis</i>	85,5	-	-	14,5
<i>Poa palustris – Alopecuretum pratensis</i>	80,1	6,7	-	13,2
<i>Caricetum vesicariae</i>	15,2	78,6	-	6,2
<i>Agrostietum vinealis</i>	89,2	-	-	10,8
<i>Caricetum vulpinae</i>	13,6	81,3	-	5,1
<i>Phalaroidetum arundinacea</i>	92,4	-	-	7,6
<i>Poa palustris-Alopecuretum pratensis</i> , вариант <i>Agrostis canina</i>	78,4	8,7	-	12,9

Анализ онтогенетической структуры видов-доминантов ассоциаций луговых экосистем пойменного луга р. Припять при пастбищном использовании (таблица 4) показал, что в ассоциации *Caricetum gracilis*, в ценопопуляции доминантного вида осоки острой преобладали средневозрастные генеративные растения g_2 (36,1 %). Количество особей имматурных и старых генеративных растений было практически равным (19,3 %). Всего в онтогенетическом составе насчитывалось четыре онтогенетические группы.

В ассоциации *Agrostietum tenuis* у доминирующего вида *Agrostis tenuis* находилось пять онтогенетических групп с преобладанием g_2 растений – 35,9 %. Примерно равным было соотношение плотности виргинильных и молодых генеративных растений – 20,5 % и 18,6 %.

В ассоциации *Poa palustris-Alopecuretum pratensis* у ценопопуляции доминантного вида *Poa palustris* отмечено пять онтогенетических групп, наибольшее участие принимали g_2 растения – 33,5 % и виргинильные – 24,2 %. Сходный онтогенетический состав наблюдался и у ценопопуляции *Alopecurus pratensis*, у них была похожая реакция на пастбищное использование.

В ассоциации *Caricetum vesicaria* у ценопопуляции *Carex vesicaria* зафиксировано четыре онтогенетические группы с доминированием g_2 – 37,8 %, соотношение других онтогенетических групп было более равномерным.

В ассоциации *Agrostietum vinealis* доминант *Agrostis vinealis* включала четыре онтогенетические группы с преобладанием g_2 – 38,7 %. У виргинильных растений и молодых генеративных были практически одинаковые величины. Следует отметить, относительно невысокое участие старых генеративных растений.

В ассоциации *Caricetum vulpinae* у доминирующей ценопопуляции *Carex vulpina* онтогенетический спектр состоял также из четырех онтогенетических групп, где наибольшее участие было у g_2 – 39,2 %, участие g_1 – 29,1 %, а g_3 – 12,1 %.

В ассоциации *Phalaroidetum arundinaceae* у ценопопуляции *Phalaroides arundinacea* в онтогенетической составе находилось 4 онтогенетические группы с преобладанием g_2 – 37,6 %, v – 29,3 %, g_1 – 13,6 %, g_3 – 19,7 %.

В ассоциации *Poa palustris* – *Alopecuretum pratensis* у доминирующей ценопопуляции *Poa palustris* в онтогенетической спектр входило пять онтогенетических групп. Наибольшее участие принимали g_2 – 34,2 % и g_1 – 22,6 %. Также в этой ценопопуляции отмечено появление иматурных особей – 11,4 %. У содоминанта *Alopecurus pratensis* отмечены сходные закономерности онтогенетического состава. Плотность особей лисохвоста лугового на 3,1 особь/м² выше, чем у *Poa palustris*.

При пастбищном использовании травостоя происходит адаптация онтогенетического состава к этому режиму использования, создаются условия для прорастания семян и пополнения молодыми особями. Устойчивость ценопопуляций обеспечивается преобладанием в онтогенетическом спектре средневозрастных генеративных растений, а также наличием иматурных и виргинильных растений, что свидетельствует о благоприятных условиях развития.

Зоотехнический анализ травяных кормов ассоциаций луговых экосистем (таблица 5) выявил их относительно высокую питательную ценность. Наибольшим содержанием кормовых единиц характеризовались ассоциации *Poa palustris* – *Alopecuretum pratensis*, *Poa palustris* – *Alopecuretum pratensis*, вариант *Agrostis canina* и *Caricetum gracilis*.

Таблица 4 – Онтогенетическая структура видов-доминантов ассоциаций луговых экосистем пойменного луга р. Припять

Название ассоциации	Онтогенетическая структура							
	Проростки (р)	Ювенильные (j)	Иматурные (im)	Виргинильные (v)	Молодые генеративные (g ₁)	Средневозрастные (g ₂)	Старые генеративные (g ₃)	Всего на 1 м ²
<i>Caricetum gracilis</i>	-	-	-	4,7±0,28	6,5±0,39	8,8±0,53	4,4±0,25	24,4
<i>Agrostietum tenuis</i>	-	-	3,9±0,2	8,4±0,46	7,6±0,42	14,7±0,88	6,4±0,32	41,0
<i>Poa palustris</i> – <i>Alopecuretum pratensis</i>	-	-	$\frac{4,4±0,19}{7,6±0,38}$	$\frac{12,2±0,67}{14,4±0,72}$	$\frac{9,9±0,54}{7,8±0,35}$	$\frac{16,9±0,92}{18,4±0,93}$	$\frac{7,1±0,42}{6,1±0,27}$	$\frac{50,5}{54,3}$
<i>Caricetum vesicariae</i>	-	-	-	6,2±0,29	9,2±0,41	14,7±0,69	8,8±0,38	38,9
<i>Agrostietum vinealis</i>	-	-	-	12,9±0,56	12,6±0,51	20,9±1,11	7,6±0,33	54,0
<i>Caricetum vulpinae</i>	-	-	-	6,4±0,30	9,4±0,41	12,7±0,61	3,9±0,17	42,4
<i>Phalaroidetum arundinacea</i>	-	-	-	11,6±0,52	5,4±0,29	14,9±0,91	7,8±0,35	39,7
<i>Poa palustris</i> – <i>Alopecuretum pratensis</i> , вариант <i>Agrostis canina</i>	-	-	$\frac{6,2±0,27}{9,4±0,42}$	$\frac{9,1±0,41}{11,3±0,44}$	$\frac{12,3±0,51}{14,4±0,54}$	$\frac{18,6±0,67}{15,6±1,13}$	$\frac{8,3±0,37}{6,9±0,38}$	$\frac{54,5}{57,6}$

Примечание – В ассоциации *Poa palustris* – *Alopecuretum pratensis* в числителе данные по *Poa palustris*, в знаменателе – *Alopecurus pratensis*.

Таким образом, результаты исследований показали, что почвы сильно кислые и поэтому нуждаются в известковании, слабо обеспечены подвижными соединениями калия и фосфора, что требует внесения фосфорно-калийных удобрений в дозе P₆₀K₆₀ кг/га. Следует отметить, что ряд луговых ассоциаций обладает высокой естественной продуктивностью – *Phalaroidetum arundinacea*, *Caricetum gracilis*, *Caricetum vesicariae*. Структура агроботанических групп отражала флористический состав исследуемых пастбищных ассоциаций. При пастбищном использовании травостоя происходит адаптация онтогенетического состава к этому режиму использования, создаются условия для прорастания семян и пополнения моло-

дыми особями. Устойчивость ценопопуляций обеспечивается преобладанием в онтогенетическом спектре средневозрастных генеративных растений, а также наличием иматурных и виргинильных растений, что свидетельствует о благоприятных условиях развития. Пастбищный корм пойменного луга р. Припять отвечал зоотехническим требованиям кормления сельскохозяйственных животных.

Таблица 5 – Зоотехнический анализ травяных кормов ассоциаций поймы р. Припять

Ассоциация	Определяемые показатели, % абс.сух.в.										Обменная энергия	Кормовые единицы
	Сырая клетчатка	Сырой протеин	Переваримый протеин	Сырая зола	Сырой жир	Фосфор	Калий	Магний	Кальций	Натрий		
<i>Caricetum gracilis</i>	30,6	11,81	8,89	8,8	3,08	0,14	0,55	0,32	0,33	0,52	7,38	0,64
<i>Agrostietum tenuis</i>	37,4	8,15	7,96	4,2	2,48	0,12	0,29	0,19	0,16	0,09	4,31	0,51
<i>Poo palustris – Alopecuretum pratensis</i>	26,9	12,21	9,40	8,8	3,03	0,22	0,76	0,32	0,35	0,74	7,72	0,72
<i>Caricetum vesicariae</i>	34,7	13,42	8,33	6,7	2,15	0,18	0,80	0,18	0,15	0,32	8,73	0,56
<i>Agrostietum vinealis</i>	36,9	9,39	8,02	7,0	1,75	0,17	0,36	0,19	0,14	0,17	5,35	0,52
<i>Caricetum vulpinae</i>	33,0	12,38	8,56	8,3	2,69	0,25	0,90	0,26	0,37	1,11	7,86	0,59
<i>Phalaroidetum arundinacea</i>	32,9	13,69	8,57	6,9	2,56	0,26	0,56	0,34	0,26	1,10	8,96	0,60
<i>Poo palustris-Alopecuretum pratensis</i> , вариант <i>Agrostis canina</i>	29,9	16,93	8,99	7,7	2,34	0,24	0,78	0,29	0,34	0,98	11,68	0,65

Литература

1. Нацыянальны атлас Беларусі : Карты. – Мінск : Белкартаграфія, 2002. – 292 с.
2. Дайнеко, Н.М. Ресурсный потенциал пойменных лугов Белорусского Полесья / Н.М. Дайнеко, С.Ф. Тимофеев // П.К. Козлов и современные исследования природного и историко-культурного наследия регионов : сборник научных статей / редкол. : В.А. Шкаликов (отв. ред.). – Смоленск : Изд-во «Смоленская городская типография», 2013. – С. 31–37.
3. Методика полевых геоботанических исследований / отв. ред. Б.Н. Городков. – М. : Изд-во АН СССР, 1938. – 215 с.
4. Ярошенко, П.Д. Геоботаника. Основные понятия, направления и методы / П.Д. Ярошенко. – М. : Наука, 1961. – 476 с.
5. Крупномасштабное агрохимическое и радиологическое обследование почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь : Методические указания / Под ред. акад. И.М. Богдевича. – Минск, 2006. – 64 с.
6. Методические указания по оценке качества и питательности кормов / В.Г. Сычев, В.В. Лепешкин. – М. : ЦИНАО, 2002. – 76 с.
7. Корчагин, А.А. Видовой (флористический) состав растительных сообществ и методы его изучения / А.А. Корчагин // Полевая геоботаника : сб. науч. ст. – Л. : Наука, 1964. – Т. 3. – с. 39.
8. Braun-Blanquet, J. Pflanzensociologie / J. Braun-Blanquet. – Wien – New-York : Springer-Verlag, 1964. – 865 p.

Таксономическое и трофическое разнообразие зоопланктона малой реки в условиях поступления в нее очищенных сточных вод

О.В. КОВАЛЕВА

Исследования проведены в течение 2010–2012 гг. на очистных сооружениях города Гомель и реке Уза. Установлено, что в целом, очистные сооружения работают удовлетворительно – эффективность механической очистки составляет до 94,93 % по различным веществам. В зоопланктоне реки обнаружено 57 видов и вариететов, относящихся к 4 отрядам, 16 семействам и 32 родам. В видовом разнообразии зоопланктона доминируют коловратки. Влияние сточных вод на реку приводит к изменению таксономической и трофической структуры зоопланктона, увеличению видов-индикаторов загрязнения.

Ключевые слова: малая река, сточные воды, зоопланктон, видовое разнообразие, экологические группы.

The studies were conducted during 2010–2012 at the treatment facilities of the city of Gomel and the river Uza. It was found that, in general, treatment facilities are operating satisfactorily – mechanical cleaning efficiency is up to 94.93% for different substances. In a zooplankton of the river it is revealed 57 types and varieties relating to 4 groups, 16 families and 32 genera. Rotifers dominate in species diversity of zooplankton. Influence of wastewater to the river leads to changes in the taxonomic and trophic structure of zooplankton, increasing pollution indicator species.

Keywords: small river, sewage, zooplankton, specific variety, ecological groups.

Введение. Уза – река в Буда-Кошелевском и Гомельском районах Гомельской области, правый приток р. Сож. Длина – 76 км, площадь водосбора – 944 км², среднегодовой расход воды в устье – 3,4 м³/с, густота речной системы – 0,23 км/км² [1, с. 423]. Русло реки канализованное, спрямлено, углублено; в нижнем течении русло естественное, умеренно извилистое. Тип донных отложений – заиленный песок (по полученным данным: песок – 90 %, ил – 10 %). Уза по многолетним данным является самым загрязненным притоком р. Сож, что связано с поступлением в реку сточных вод, сбрасываемых с городских очистных сооружений и других предприятий Гомеля.

Материал и методика исследований. Исследования проведены в течение 2010–2012 гг. на очистных сооружениях г. Гомель и р. Уза. На городские очистные сооружения канализации поступают хозяйственно-бытовые сточные воды от населения и коммунально-бытового хозяйства в объёме 117267 м³/сут. Всего в 2012 г. в Гомеле было отведено 49 млн. м³ сточных вод, из которых 48,7 млн. м³ было отведено в поверхностные водные объекты, а 0,3 млн. м³ – в недра и подземные воды [2]. Очищенные сточные воды по сбросному трубопроводу, длина которого 1000 м а диаметр 1500 мм, подаются в отводной канал длиной 1000 м, затем в Мильчанскую канаву длиной 6700 м, а после в р. Уза, которая впадает в р. Сож (рисунок 1). Для проведения настоящих исследований на реке выбраны 2 створа – выше и ниже поступления с водами Мильчанской канавы очищенных и разбавленных сточных вод г. Гомель.



Рисунок 1 – Схема движения очищенных сточных вод от очистных сооружений к водоёмам-приёмникам [3]

Сбор, обработку проб и определение видов зоопланктона проводили стандартными, принятыми в гидробиологии методами [4]. Экологические и трофические группы зоопланктона выделяли по А. В. Крылову [5, с. 7–8]. При оценке экологического состояния водотоков использовали метод Пантле-Букка в модификации Сладечека [6]. Изучалось также содержание загрязняющих веществ в сточных водах на двух ступенях очистки: механической и биологической, что позволило рассчитать эффективность очистки.

Результаты исследований и их обсуждение. Установлено, что в целом очистные сооружения работают удовлетворительно – эффективность механической очистки составляет 4,1–93,6 %, биологической – 9,6–94,93 % по различным веществам (рисунки 2, 3). Анализируя динамику за 3 года, можно говорить о повышении эффективности очистки практически по всем загрязняющим веществам начиная, с 2010 по 2012 гг. Последнее, вероятно, объясняется тем фактом, что городские очистные сооружения проходят реконструкцию, на них внедряются новые технологии очистки сточных вод.

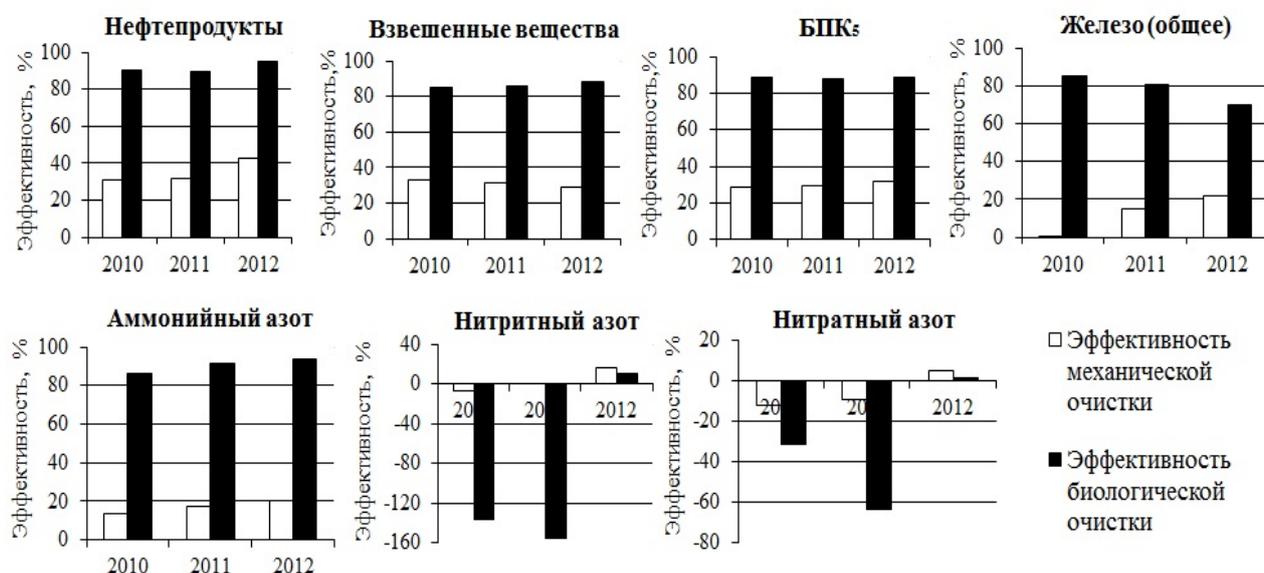


Рисунок 2 – Динамика эффективности очистки сточных вод за период с 2010 по 2012 гг.

Нами также были произведены расчеты индекса загрязненности воды (ИЗВ) и кратности превышения ПДК загрязняющих веществ в р. Уза ниже впадения Мильчанской канавы. Установлено, что река загрязнена железом общим (1,2–2,8 ПДК), азотом аммонийным (1,1–2,36 ПДК), азотом нитритным (1,1–2,04 ПДК), цинком (1,11–1,19 ПДК), фосфором фосфатным (1,11–1,24 ПДК). Рассчитанный ИЗВ (1,8–2,3) позволяет отнести воду реки к III классу качества (умеренно загрязненные).

В зоопланктоне реки обнаружено 57 видов и вариантов, относящихся к 4 отрядам, 16 семействам и 32 родам (таблица 1).

В видовом разнообразии зоопланктона доминируют коловратки – 32 вида и варианта (56,1 %), ветвистоусые ракообразные составляют 22,8 % (13 видов), веслоногие – 10,5 % (6 видов) (таблица 2). Сравнение таксономической структуры зоопланктона по створам показывает, что разнообразие коловраток в реке ниже поступления очищенных сточных вод возрастает: в створе 1 они составляют 53,8 % видового разнообразия зоопланктона, в створе 2 – 62,5 %. При этом, видовое разнообразие ветвистоусых ракообразных снижается с 34,9 % в створе 1 до 27,0 % в створе 2. Доля веслоногих ракообразных в общем видовом разнообразии зоопланктона Узы выше и ниже впадения Мильчанской канавы различается незначительно – 11,6 и 10,4 % соответственно.

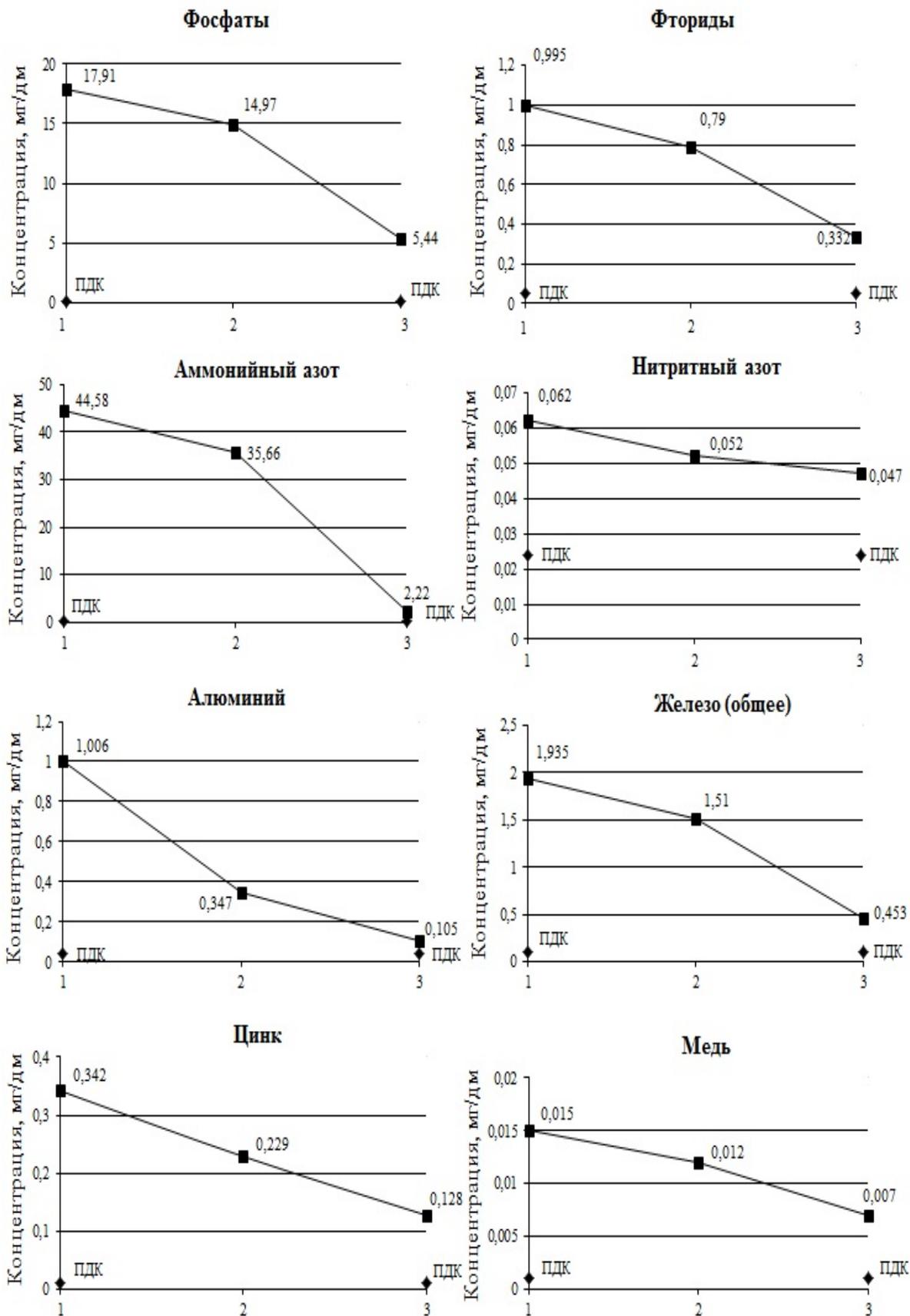


Рисунок 3 – Динамика концентраций загрязняющих веществ
 1 – приемная камера очистных сооружений; 2 – после первичных отстойников; 3 – выпуск из очистных сооружений

Таблица 1 – Видовой состав зоопланктона исследованных рек

Виды зоопланктона	Створы на р. Уза	
	Створ 1	Створ 2
1	2	3
Rotifera:		
<i>Asplanchna priodonta</i> Gosse, 1850	+	+
<i>A. sieboldi</i> (Leydig, 1854)	+	+
Bdelloidea		
в том числе		
<i>Philodina</i> sp.	+	+
<i>Rotaria</i> sp.		+
<i>Brachionus angularis</i> Gosse, 1851	+	+
<i>Br. calyciflorus amphyceros</i> Ehrenberg, 1838	+	+
Br. c. anuraephormis Brehm, 1909		+
Br. c. calyciflorus Pallas, 1766	+	+
Br. c. spinosus Wierzejsky, 1891		+
Br. diversicornis diversicornis (Daday, 1883)	+	+
Br. d. homoceros (Wierzejski, 1891)		+
Br. quadridentatus ancylognatus Schmarda, 1859		+
Br. q. brevispinus Ehrenberg, 1832		+
Br. q. quadridentatus Hermann, 1783	+	+
Cephalodella fluviatilis (Zavadowsky, 1962)	+	+
Conochilus unicornis Rousselet, 1892		+
Dipleuchlanis propatula (Gosse, 1886)	+	+
Filinia longiseta longiseta (Ehrenberg, 1834)	+	+
Kellicottia longispina longispina (Kellicot, 1879)	+	+
Keratella cochlearis cochlearis (Gosse, 1851)	+	+
K. c. tecta (Gosse, 1851)	+	+
K. quadrata quadrata (Muller, 1786)	+	+
Lecane (s.str.) flexilis (Gosse, 1886)	+	+
L. (s.str.) inermis (Bryce, 1892)		+
<i>L. (s.str.) luna</i> (Muller, 1776)	+	
<i>L. (s.str.) tenuiseta tenuiseta</i> (Harring, 1914)	+	+
<i>L. (Monostyla) bulla bulla</i> (Gosse, 1832)	+	
<i>L. (M.) copies</i> (Harring et Myers, 1926)		+
<i>L. (M.) hamata</i> (Stokes, 1869)	+	+
<i>Polyartra dolichoptera</i> Idelson, 1925	+	+
<i>Synchaeta pectinata</i> Ehrenberg, 1832	+	+
<i>Tr. (s.str.) pusilla</i> (Lauterborn, 1898)	+	+
Cladocera:		
<i>Alona rectangula</i> Sars, 1862	+	
<i>Al. quadrangularis</i> (O.F.Muller, 1785)	+	
<i>Bosmina longirostris</i> (O.F.Muller, 1785)	+	+
<i>Bosminopsis deitersi zernovi</i> Linko, 1901	+	+
Ceriodaphnia affinis Lilljeborg, 1862	+	+
Cr. reticulata (Jurine, 1820)		+
Chydorus sphaericus sphaericus (O.F.Muller, 1785)	+	+
Daphnia cucullata Sars, 1862	+	+
Dp. longispina (O.F.Muller, 1785)	+	+
Dp. pulex Leydig, 1860		+
<i>Diaphanosoma brachyurum</i> (Lievin, 1848)	+	
Disparalona rostrata (Koch, 1841)	+	
Hyocryptus sordidus (Lievin, 1848)		+
Macrothrix hiscuticornis Norman et Brady		+
Pleuroxus striatus Schoedler, 1858	+	
<i>Pl. truncatus truncatus</i> (O.F.Muller, 1785)	+	+
Pl. trigonellus (O.F.Muller, 1785)	+	
<i>Pl. trigonellus</i> (O.F.Muller, 1785)	+	
Scapholeberis mucronata (O.F.Muller, 1785)	+	+
Simocephalus vetulus (O.F.Muller, 1776)	+	+

Окончание таблицы 1

	1	2	3
Copepoda:			
Cyclopoida:			
Ec. serrulatus (Fischer, 1851)		+	+
Macrocylops albidus (Jurine, 1820)		+	+
Mesocyclops leuckarti (Claus, 1857)		+	+
Paracyclops fimbriatus (Fischer, 1853)		+	
Thermocyclops crassus (Fischer, 1853)			+
Th.oithonoides (Sars, 1863)		+	+cerolodella
<i>Всего</i>		43	48

Таблица 2 – Таксономическая структура зоопланктона р. Уза

Таксономические единицы	Группы			Всего
	Rotifera	Cladocera	Copepoda	
Отряды	2	1	1	4
Семейства	10	5	1	16
Роды	14	13	5	32
Виды	25	19	6	50
Виды и варианты	32	13	5	57

Под влиянием очищенных и разбавленных городских сточных вод возрастает количество видов-индикаторов сапробности (с 70 до 77 %). При этом в створе 1 доминируют олигосапробные виды (индикаторы чистых вод) – 43,5 %, о-β-мезосапробные виды составляют 13,5 %, β-о-мезосапробные – 10 %, β-мезосапробные – 23 %, β-α-мезосапробные – 10 %. В створе 2 олигосапробные виды составляют 30,5 %, о-β-мезосапробные – 11 %, β-о-мезосапробные – 8 %, β-мезосапробные (индикаторы загрязненных вод) – 35 %, β-α-мезосапробные – 13,5 %, α-мезосапробные (индикаторы грязных вод) – 2,5 % (рисунок 4).

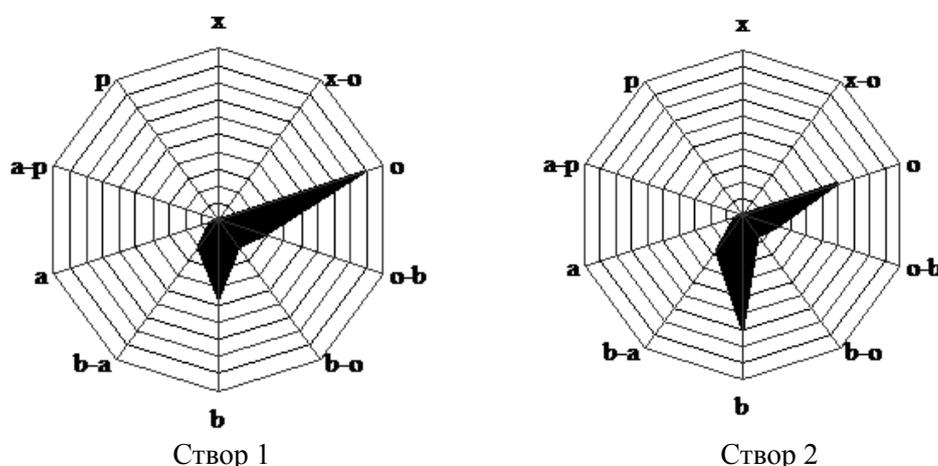


Рисунок 4 – Распределение числа видов зоопланктона исследованных рек в зависимости от индикаторной принадлежности

x – ксеносапробы (индикаторы очень чистых вод); о – олигосапробы (индикаторы чистых вод);
 b – бетамезосапробы (индикаторы загрязненных вод); а – альфамезосапробы (индикаторы грязных вод);
 p – полисапробы (индикаторы очень грязных вод)

Рассчитанный индекс сапробности в разные периоды исследований составляет 1,1–2,38 (створ 1), 1,1–2,56 (створ 2). Средние величины индекса (1,67 – выше и 1,83 – ниже поступления сточных вод) характеризуют р. Уза как «умеренно (слабо) загрязненную», что соответствует III классу качества воды, за исключением лета и осени, когда индекс сапробности в створе 2 возрастает до 2,51–2,56, характеризуя реку на указанном участке как «загрязненную», то есть относящуюся к IV классу качества.

Поступление в Узу сточных вод вызывает изменения в трофической структуре и экологических группах зоопланктона. Так, в створе 1 преобладающей группой являются вторичные фильтраторы, добывающие пищу с поверхности субстрата, многочисленны также вертикаторы

и первичные фильтраторы, добывающие пищу в толще воды (таблица 3). В литературе отмечают, что фильтраторы исчезают из состава зоопланктона вследствие засорения фильтрационного аппарата при загрязнении вод [1, с. 98]. В створе 2 доминируют вертикаторы, добывающие пищу с поверхности субстрата за счет массового развития коловраток рода *Brachionus*. Антропогенное воздействие в виде сброса в реку сточных вод проявляется в высоком количественном обилии групп организмов, добывающих пищу с поверхности субстрата и снижении обилия групп организмов, добывающих пищу в толще воды.

Таблица 3 – Распределение видов на экологические группы (в %) по способам передвижения и захвата пищи

Группа	Под-группа	Способы передвижения и питания	Своры на р. Уза	
			Створ 1	Створ 2
Добывающие пищу в толще воды	1	а) Плавание / вертикация	13,4	10,0
		б) Плавание / первичная фильтрация	13,4	14,0
	2	Плавание / захват + всасывание	4,4	4,0
	3	Плавание / активный захват	-	-
Добывающие пищу с поверхности субстрата	4	а) Плавание + ползание / вертикация	11,1	24,0
		б) Плавание + ползание / вертикация + всасывание	11,1	10,0
	5	а) Ползание + плавание / всасывание	8,9	8,0
		б) Ползание + плавание / вторичная фильтрация	15,6	4,0
	6	а) Ползание + плавание / собиратели-фито-, детритофаги	-	4,0
		б) Ползание + плавание / собиратели-эврифаги	4,4	2,0
7	Ползание + плавание / активный захват	6,7	8,0	
Прикрепленные к субстрату и способные к плаванию	8	Плавание + прикрепление к субстрату / первичная фильтрация	4,4	4,0
	9	Прикрепление к субстрату + плавание / вертикация	2,2	4,0
Смешанные по способам питания и передвижения	10	а) Смешанная по способу передвижения группа	2,2	2,0
		б) Смешанная по способу передвижения и питания группа	2,2	2,0

Заключение. Исследованиями установлено, что в целом очистные сооружения работают удовлетворительно – эффективность очистки достаточно высока. В зоопланктоне Узы обнаружено 57 видов и вариететов, относящихся к 4 отрядам, 16 семействам и 32 родам. В видовом разнообразии зоопланктона преобладают коловратки. Под влиянием очищенных и разбавленных сточных вод города в реке отмечается увеличение разнообразия коловраток, снижение такового ветвистоусых ракообразных, возрастание количества видов-индикаторов сапробности, сокращение количества олигосапробных видов и рост β-мезосапробных, наблюдаются изменения в трофической структуре и смена доминирующих экологических групп зоопланктона: вторичные фильтраторы, добывающие пищу с поверхности субстрата, вертикаторы и первичные фильтраторы, добывающие пищу в толще воды, сменяются на вертикаторов, добывающих пищу с поверхности субстрата за счет массового развития коловраток рода *Brachionus*.

Литература

1. Блакітны скарб Беларусі : Рэкі, азёры, вадасховішчы, турысцкі патэнцыял водных аб'ектаў / Ю.А. Тарэеў, У.І. Цярэнцьеў. – Мінск : БелЭн, 2007. – 480 с.
2. Отведение сточных вод и очистные сооружения, Гомель, 2012 [Электронный ресурс] / РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов».- ЦНИИКИВР, 2013. – Режим доступа : <http://www.cricuwr.by>. – Дата доступа : 10.09.2014.
3. Технологический регламент очистных сооружений города Гомеля. – Гомель, 2011. – 89 с.
4. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / под ред. В. А. Абакумова. – Л. : Гидрометеиздат, 1983. – 240 с.
5. Крылов, А.В. Зоопланктон равнинных малых рек / А.В. Крылов. – М. : Наука, 2005. – 263 с.
6. Pantle, R. Die biologische Urewachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse / R. Pantle, H. Buck // Gas und Wasserfach. – 1955. – Bd. 96, № 18. – P. 604.

УДК 582.632.1:57.085.1:581.4

Влияние тидиазурона на регенерационную способность листовых эксплантов в культуре тканей редких видов рода *Betula* L.

И.И. КОНЦЕВАЯ

Исследуется влияние гормонального состава среды и генотипа исходного материала на морфогенетические реакции листовых эксплантов в культуре тканей редких видов березы. В результате исследований определены оптимальные способы регенерации адвентивных побегов с использованием в составе питательной среды тидиазурона. Констатируется, что дифференциация адвентивных структур осуществлялась только в каллусной ткани.

Ключевые слова: тидиазурон, регенерация, каллусогенез, морфогенез *in vitro*, листовые экспланты.

The influence of the hormonal composition of the medium and the genotype of the starting material for the morphogenetic response of leaf explants in tissue culture of rare species of birch is described. The studies identified the best ways to regenerate adventitious shoots using thidiazuron as a part of the culture medium. It is stated that the differentiation of adventitious structures was carried out only in the callus tissue.

Keywords: thidiazuron, regeneration, callusogenesis, morphogenesis *in vitro*, leaf explants.

Введение. Культура клеток и тканей различных видов рода *Betula* L. привлекает внимание исследователей и находит значительное практическое применение, поскольку позволяет размножать уникальные деревья, гибридные генотипы, отбирать и сохранять ценные мутантные формы. В этом направлении наиболее активно развиваются исследования на березе повислой (*B. pendula* Roth.) и березе карельской (*B. pendula* Roth. var. *carelica* Merckl.) [1]–[6].

Особый интерес представляет редкая генетическая разновидность *B. pendula* – *B. pendula* Roth. var. *carelica*. В странах Северной и Центральной Европы ее древесина ценится из-за своей узорчатости. Беларусь относится к странам с богатым естественным генетическим потенциалом и значительными ресурсами карельской березы. Однако в результате антропогенных и природных воздействий насаждения карельской березы уменьшаются [7]. Диплоидная береза карликовая (*Betula nana* L.), произрастающая в Беларуси, относится к редким, охраняемым растениям [8]. Береза чернокорая (*B. obscura* Kotula ex Fiek) произрастает на Украине, в России, Польше, Чехии, Словакии. В Беларуси встречается сравнительно редко. На территории республики выявлено свыше 30 ее местонахождений в 12 физико-географических районах. Для *B. obscura* характерна высокая декоративность древесины, что делает ее экономически важной культурой. В связи с малочисленностью, вероятным реликтовым происхождением и в силу своих биологических особенностей, очень остро стоит вопрос о сохранении чернокорой березы [9].

Во многих развитых странах в программах по селекции древесных лесных растений, в том числе и березы, широко используются биотехнологические методы. Это позволяет не только ускорить селекционный процесс, но сохранить и расширить генетическое разнообразие растений. Однако следует подчеркнуть, что развитие различных способов микроклонального размножения березы невозможно без знаний о морфогенезе *in vitro* конкретных ее видов.

Эффективность питательных сред, используемых на этапе мультипликации побегов, оценивают по коэффициенту размножения. В последнее десятилетие при работе с культурой тканей березы повислой стали чаще использовать в качестве цитокинина тидиазурон (TDZ) [4], [6], [10]. Тем не менее, отсутствуют работы по выявлению эффекта тидиазурона на других видах березы. Поэтому разработка более эффективных систем регенерации для ценных и/или редких видов березы с использованием в качестве гормонов тидиазурона остается нерешенной и востребованной.

Цель наших исследований – выявление наиболее оптимальных концентраций тидиазурона, определяющих высокую регенерационную активность листовых эксплантов некоторых редких видов берез.

Материал и методы исследования. Объектами исследования явились клоны березы карельской (*Betula pendula* Roth var. *carelica* Merckl.): 76, 81, клон ч 1 березы чернокорой (*B. obscura* Kotula ex Fiek) и клон 2 а березы карликовой (*Betula nana* L.). Субкультивирование тес-

тируемого материала выполняли каждые 30 дней на свежие безгормональные среды. В асептических условиях нарезали листья, которые помещали нижней стороной на поверхность среды. Основу питательной агаризованной среды составляла смесь неорганических солей, оптимизированная для древесных (WPM) [11]. Витамины, микроэлементы добавляли по прописи Мура-сиге и Скуга [12]. рН среды перед стерилизацией доводили до 5,6–5,8. Автоклавировали среды при 1,1 атм в течение 20 мин. В стерильных условиях в охлажденную до 45 °С агаризованную среду добавляли раствор тидиазурона (1-phenol-3-(1,2,3,-Thiadiazol-5-YL)UREA). Тестировали следующие его концентрации: 0,0005; 0,005; 0,05; 0,5; 1,0 мг/л. Для контроля использовали модифицированную среду WPM, без гормональных добавок. Материал культивировали при температуре 25±1 °С, с фотопериодом 16 часов и освещенностью 2,5–3,5 тыс. лк. Число повторностей в каждом варианте – 30.

Длительность первого пассажа составляла 30 дней. Наблюдения за состоянием и ростом культур осуществляли каждые 10 дней. Учитывали процент некротизированных эксплантов, способность эксплантов к органогенезу, количество адвентивных почек и побегов на 1 эксплант. Каллус оценивали по цвету, консистенции, интенсивности роста по 3-х балльной шкале.

Для определения регенерационной способности экспланты пассировали вместе с полученными структурами на свежую безгормональную среду, на которой культивировали при оптимальных условиях 20 дней. По окончании данного пассажа подсчитывали число почек, корней. Полученные данные обрабатывали с помощью компьютерных программ Microsoft Excel 2010, StatSoft Statistica 7.0.

Результаты исследования и их обсуждение. Полученные результаты наблюдений представлены в таблице. В первом пассаже первые признаки пролиферации на листьях были отмечены спустя 20 дней культивирования. Наблюдалось увеличение размеров эксплантов и образование каллусной ткани на месте среза черешка. При дальнейшем культивировании отмечали появление каллуса на новых эксплантах и рост каллусной культуры. Следует отметить, что в 100 % случаев листья клона ч 1 березы чернокорой формировали каллусную ткань и на безгормональной среде (таблица 1). Интенсивность роста каллуса зависела от генотипа экспланта и от концентрации тидиазурона в питательной среде.

Таблица 1 – Влияние тидиазурона на морфогенез в культуре листовых эксплантов березы

Концентрация TDZ, мг/л	Число эксплантов, %			Интенсивность роста каллуса	Min-max число на экспланте		Среднее число почек на эксплант (x±Sx), шт. ¹
	с каллусом	с корнями	с почками		почек	корней	
клон 76 березы карельской							
0 (контроль)	0	100	0	0	–	1-4	–
0,0005	100	46,7	93,3	1	5-15	1-3	6,9± 1,40***
0,005	100	0	50,0	3	1-5	–	1,5± 0,30*
0,05	100	0	50,0	3	1-5	–	0,5± 0,05
0,5	100	0	0	3	–	–	–
1,0	100	0	0	1,2	–	–	–
клон 81 березы карельской							
0 (контроль)	0	50,0	0	0	–	1-3	–
0,0005	12,5	0	13,3	1	1-3	–	0,2± 0,05
0,005	100	0	0	2	–	–	–
0,05	100	0	0	2	–	–	–
0,5	100	0	0	1	–	–	–
1,0	100	0	0	1	–	–	–
клон ч1 березы чернокорой							
0 (контроль)	100	63,4	51,2	1	1-10	1-4	2,8± 0,72
0,0005	75,0	0	60,0	1	5-15	–	6,5± 1,00*
0,005	100	50,0	100	2	3-35	3-5	20,3±2,00***
0,05	100	0	13,3	3, 2	5-10	–	1,0 ± 0,20
0,5	100	0	0	3	–	–	–
1,0	100	0	0	3	–	–	–
клон 2а березы карликовой							

Окончание таблицы 1

0 (контроль)	0	0	0	0	–	–	–
0,0005	0	0	0	0	–	–	–
0,005	0	0	0	0	–	–	–
0,05	0	0	0	0	–	–	–
0,5	100	0	15,0	3, 2	1-4	–	0,4± 0,20
1,0	100	0	5,0	2, 1	1-2	–	0,1± 0,05

Примечание – рост каллуса оценен в баллах: 0 – отсутствует, 1 – плохой, 2 – хороший, 3 – очень хороший;

¹ от всех эксплантов;

*, **, *** отличия от контроля значимы при $P < 0,05$; $0,01$; $0,001$

Изученные генотипы можно расположить в порядке убывания каллусогенной активности следующим образом: клон ч 1 березы чернокорой, клон 76 березы карельской, клон 81 березы карельской, клон 2 а березы карликовой. Очень хороший рост каллуса отмечен у березы чернокорой на средах, содержащих 0,05–1,0 мг/л тидиазурана. Для клона 76 березы карельской оптимальная концентрация гормона для каллусообразования составляла 0,005–0,5 мг/л, для клона 2 а березы карликовой – 0,5 мг/л.

Помимо каллусогенеза, на листьях отмечали образование органогенных структур: адвентивных почек и побегов, и адвентивных корней. Активность регенерационных процессов зависела как от генотипа исходного растения, так и среды культивирования. У карликовой березы ризогенез не был выявлен ни на контрольной среде, ни на средах опытных вариантов. У остальных генотипов образование корней отмечали у 50–100 % листовых эксплантов, культивированных на среде без гормонов. У клона 76 березы карельской и клона ч 1 березы чернокорой ризогенез также наблюдали на средах с 0,0005 и 0,005 мг/л тидиазурана, соответственно. Число корней на экспланте варьировало от 1 до 4. Чаще всего формирование корней наблюдали напрямую из клеток среза черешка или тканей листовой пластинки, в то время как регенерацию побегов наблюдали из только каллуса. Аналогичные процессы выявлены другими исследователями на березе повислой [1]–[3], [6].

В результате наблюдений было установлено, что сформированный каллус проявлял среднюю и высокую побегообразующую активность у клона 76 березы карельской и клона ч 1 березы чернокорой, в зависимости от концентрации тидиазурана в среде. Наиболее оптимальная концентрация варьировала в пределах 0,0005–0,005 мг/л. Так, у березы чернокорой число эксплантов с адвентивными почками составило 60–100 %, а среднее число почек на экспланте было равно 6,5–20,3. Все апробированные концентрации тидиазурана оказались неэффективными для индукции побегообразования у клона 81 березы карельской и клона 2 а березы карликовой.

Анализ литературных данных показывает, что разработка способа размножения для каждого конкретного объекта требует творческого поиска, поскольку технология и тип размножения могут быть специфичными не только для отдельных видов, но и генотипов лесных древесных пород [13]. 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 донорных растений в годичном цикле их развития позволило бы реализовать морфогенетические процессы в культуре тканей. Но при этом сохраняется востребованность в получении знаний об экзогенном эффекте гормонов естественного и синтетического происхождения на ткани растений в условиях *in vitro*.

В литературе имеются многочисленные данные о том, что развитие древесных культур *in vitro* определяется в большой мере взаимодействием двух факторов: генотипа и гормонального состава питательной среды [14], [15]. Поэтому для исследователей важно получить сведения о морфогенетической оценке каждого генотипа, который представляет тот или иной интерес.

При исследовании Н. Glock с соавторами [16] влияния генотипа и условий культивирования на рост и окраску каллусных культур березы повислой было показано, что оба изученных показателя в сильной степени зависят от генотипа клона, и незначительно изменяются под воздействием состава среды культивирования. Ими было высказано предположение, что раз-

личия в росте каллуса связаны с ядерным геномом березы, а различия в окраске определяются совместным действием ядра и цитоплазмы. Результаты наших исследований, выполненных на разных видах березы, подтверждают приоритет генотипа над составом питательной среды.

Полученные в эксперименте каллусные культуры характеризовались большой гетерогенностью по морфологическим параметрам и морфогенетическим потенциям. По аналогии с работой О.С. Машкиной с соавторами [17], выполненной в культуре изолированных пыльников у разных видов берез, культивируемых на средах с тидиазуном, в нашем исследовании также можно выделить три морфотипа каллусных культур. Один из морфотипов отличался повышенной зеленой окраской, блестящей поверхностью, гранулированностью, органогенной способностью. Это было свойственно для эксплантов, культивируемых на средах с тидиазуном в концентрации 0,0005–0,005 мг/л. Второй тип, отмеченный у изученных клонов берез, кроме березы карликовой, культивируемых на средах, содержащих тидиазурон в концентрации 0,5–1,0 мг/л, отличался либо желто-кремовой окраской, либо бело-зеленой, он характеризовался отсутствием регенерационной активности. Третий тип по внешнему виду похожий на второй, отличался все же слабой органогенной активностью на средах с 0,05 мг/л тидиазурона.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о существенном, хотя и неоднозначном влиянии генотипа на морфогенез в культуре тканей. Следует еще раз подчеркнуть, что видовая принадлежность исходного растения, сезон, возраст и орган, из которого изолирован тканевой эксплант, гетерогенность или единообразие клеточного состава экспланта – все это оказывает влияние на способность культивируемых тканей и клеток к морфогенезу, а иногда и определяет, какой тип морфогенеза будет доминирующим в данной культуре [18].

Процессы каллусообразования и органогенеза у изученных генотипов протекали с разной интенсивностью (таблица 1). Присутствие гормона в составе питательной среды обычно всегда стимулировало процесс каллусогенеза. Несомненно, это в немалой степени связано с реакцией эксплантов на ранение, повреждение тканей в процессе пассирования материала. Индуцирующее действие тидиазурона на ризогенез у листовых эксплантов изученных генотипов березы практически отсутствует. Интенсивность же побегообразования зависела от генотипа материала и концентрации гормона. Следует подчеркнуть, что во всех вариантах опыта дифференциация адвентивных почек и побегов осуществлялась только в каллусной ткани. Поэтому применение тидиазурона нежелательно при массовом производстве посадочного материала методом клонального размножения и оправдано при создании новых генетически улучшенных форм методами клеточной селекции и биотехнологии.

Закключение. На основании выполненных исследований отмечено существенное влияние генотипа исходного материала и гормонального состава среды на морфогенетические реакции листовых эксплантов у изученных клонов березы. Тестируемые концентрации тидиазурона (0,0005–1,0 мг/л) оказались неэффективными для индукции побегообразования у клона 81 березы карельской и клона 2 а березы карликовой. Определена органогенная способность листовых эксплантов клона 76 березы карельской и клона ч 1 березы чернокорой. Для данных клонов оптимальная концентрация тидиазурона в питательной среде, индуцирующая процесс побегообразования в культуре листьев *in vitro*, составила 0,0005–0,005 мг/л. Дифференциация адвентивных почек и побегов осуществлялась только в каллусной ткани.

Литература

1. Srivastava, P.S. Plantlet differentiation in leaf and root cultures of birch (*Betula pendula* Roth.) / P.S. Srivastava, A. Steinhauer, H. Glock // Plant Sci. – 1985. – Vol. 42. – P. 209–214.
2. Perez, C. Micropropagation of *Betula celtiberica* / C. Perez, P. Postigo // Annals of Botany. – 1989. – Vol. 64. – P. 67–69.
3. Яцына, А.А. Регенерация побегов на листьях березы / А.А. Яцына, И.И. Концевая // Селекция, генетические ресурсы и сохранение генофонда лесных древесных растений : сборник научных трудов – Гомель : Институт леса НАН Беларуси, 2003. – Вып. 59. – С. 258–262.
4. Концевая, И.И. Влияние цитокининов на морфогенез в культуре листовых эксплантов березы // Проблемы лесоведения и лесоводства : Сборник научных трудов – Гомель : Институт леса НАН Беларуси, 2008. – Вып. 68. – С. 205–213.

5. Машкина, О.С. Воспроизводство и сохранение представителей ценного генофонда лесных древесных растений методами биотехнологии / О.С. Машкина, Т.М. Табацкая, О.А. Землянхуина // Биотехнология. Состояние и перспективы развития : тез. докл. 6-го Московского междунар. конгресса, Москва, 21–25 марта 2011 г. – Ч. 1. – М., 2011. – С. 275–276.
6. Константинов, А.В. Влияние состава гормонов в среде прекультивирования на регенерацию в каллусных культурах березы повислой (*Betula pendula* Roth.) / А.В. Константинов // Modern Phytomorphology. – 2013. – № 4. – Р. 241–244.
7. Живулькина, Е.В. Береза карельская в Беларуси : ресурсы, структура и состояние насаждений / Е.В. Живулькина [и др.]. // Ботаника (Исследования) / Институт экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича – Минск : Право и экономика, 2005. – Вып. XXXIII. – С. 135–146.
8. Красная книга Республики Беларусь. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды дикорастущих растений / редкол. : Л. И. Хоружик (предс.) [и др.]. – Минск : Белорусская Энциклопедия (БелЭн), 2006. – 456 с.
9. Побирушко, В.Ф. Перспективы хозяйственного использования редких видов берез Беларуси в контексте сохранения их генетических ресурсов / В.Ф. Побирушко // Селекция, генетические ресурсы и сохранение генофонда лесных древесных растений (Вавиловские чтения) : сборник научных трудов. – Гомель : Институт леса Национальной академии наук Беларуси, 2003. – Вып. 59. – С. 153–156.
10. 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.
11. Lloyd, G. Commercially Feasible micropropagation of mountain laurel, *Kalmia latifolia* by use of shoot-tip culture / G. Lloyd, B. McCown // Proc. Intl. Plant Prop. Soc. – 1980. – № 30. – P. 421–427.
12. Murashige, T.A revised medium for rapid growth and bioassay with tobacco tissue cultures / T.A. Murashige, F. Skoog // Physiol. Plant. – 1962. – Vol. 15. – № 13. – P. 473–497.
13. Schulzke, R. Die Anwendung von In vitro-Kulturtechniken bei Waldbaumen / R. Schulzke // Osterr. Forstztg. – 1988. – Vol. 99. – № 3. – P. 66–67.
14. Алексеева, Л.Л. Роль генотипа при размножении дуба черешчатого и сосны обыкновенной методом культуры тканей / Л.Л. Алексеева, М.Ю. Нечаева, Г.П. Бутова // Цитогенетические и экономические основы повышения продуктивности лесов. – Воронеж : НИИЛГиС, 1993. – С. 65–73.
15. Бугаенко, Л.А. Морфогенез винограда в культуре in vitro / Л.А. Бугаенко, Л.В. Иванова-Ханина // Ученые записки ТНУ им. В.И. Вернадского. Серия «Биология, химия». – 2011. – Вып. 63(2). – С. 73–82.
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. Машкина, О.С. Культура изолированных пыльников как метод для расширения генетического разнообразия березы / О.С. Машкина, Т.М. Табацкая // Генетико-селект. основы улучшения лесов. – Воронеж : НИИЛГиС, 1999. – С. 58–75.
18. Бутенко, Р.Г. Индукция морфогенеза в культуре тканей растений / Р.Г. Бутенко // Гормональная регуляция онтогенеза растений. – М. : Колос, 1984. – С. 42–54.

Экологическая безопасность и прогнозирование процесса ветровой эрозии на техногенных территориях

А.Н. ОГОРОДНИК, Л.И. ГРИГОРЬЕВА, Ю.А. ТОМИЛИН

На основании анализа существующих представлений о прогнозировании ветровой эрозии осуществлено прогнозирование пылевого загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха техногенных территорий (хвостохранилищ) перерабатывающих предприятий. Осуществлен прогноз объемной концентрации поллютантов в приземном слое атмосферного воздуха за счет процессов ветровой эрозии. Предложена технология пылеподавления техногенных территорий.

Ключевые слова: прогнозирование, поллютант, хвостохранилище, ветровая эрозия, экологическая безопасность, техногенная территория.

Prediction of dust contamination of the surface layer of the air on technogenic territories (tailings dams) of the processing enterprises is carried out on the basis of the analysis of existing ideas of forecasting of wind erosion. The forecast of volume concentration of substances in a ground layer of atmospheric air due to the processes of wind erosion is given. The technology of dust suppression of technogenic territories is offered.

Keywords: forecasting, pollutant, tailings dam, wind erosion, ecological safety, technogenic territory.

Введение. Украина относится к государствам с высоким уровнем добычи и переработки минерально-сырьевых ресурсов, обуславливает эксплуатацию значительного количества техногенных территорий с высоким уровнем негативного экологического воздействия на приземный слой атмосферы [5, с. 145]. Пылевое загрязнение приземного атмосферного воздуха, которое формируется в местах складирования пылевидных отходов производств, имеет аэрозольную структуру, которая включает твердые и жидкие миграционные частицы.

Однако при достаточной изученности особенностей проявлений опасности, наличия научнообоснованного системного подхода к решению проблем экологической безопасности, развитой базы данных по прогнозированию и средств оптимизации уровня техногенной безопасности, эта задача изучена недостаточно, в т. ч. вследствие ограниченного использования физико-математических моделей хвостохранилищ как сложных природно-техногенных геосистем [3, с. 96], [4, с. 108].

Цель исследования. В работе решается актуальная научно-практическая задача прогнозирования экологической ситуации на техногенной территории добывающих и перерабатывающих предприятий.

Материалы и методы исследований. Материалами выступали результаты исследований авторов по определению интенсивности дефляции экополлютантов на территории хвостохранилищ Николаевского глиноземного завода, проведенных в течение 2004–2010 гг. при выполнении НИР «Испытание методов пылеподавления для создания технологии закрепления красных шламов на шламоохранилище Николаевского глиноземного завода» (соглашение № 164-П).

Результаты исследований. Общий вид прогнозируемой объемной концентрации веществ в воздухе на определенном расстоянии x от источника выброса примесей можно представить в общем виде:

$$C_x = G_x(v, t, \eta) \cdot q, \quad (1)$$

где C_x – объемная концентрация загрязняющего вещества в приземном слое атмосферного воздуха на расстоянии x от источника выброса, ($\text{г}/\text{м}^3$); $G_x(\eta, v, t)$ – фактор метеорологического разбавления на расстоянии x от источника выброса, ($\text{с}/\text{м}^3$), зависит от параметров (линейность, объемность и др.) и вида (высокое, низкое, наземное и др.) источники выброса – переменная η , от скорости ветра v , продолжительности диффузии t от источника выброса; q – интенсивность выброса загрязняющих веществ в атмосферный воздух от источника выброса, ($\text{г}/\text{с}$).

Фактор метеорологического разбавления $G_x(\eta, \nu, t)$ определяется исходя из поставленной задачи с гауссовой или градиентной модели переноса примесей в воздухе.

Расчет концентраций от наземных источников выполняется на основе аналитических или численных решений уравнений турбулентной диффузии. Однако учитывая особенность и невозможность этих решений при неблагоприятных метеорологических условиях (при приземной инверсии температуры и ослаблении скорости ветра до нуля), когда концентрация примесей в воздухе будет бесконечно расти на всех расстояниях от источника выброса, то определение фактора метеорологического разбавления $G_x(\nu, t, \eta)$ выполнено по формуле, предложенной М. Берлянтом [1, с. 89], при продолжительности диффузии t ($t \leq \min(T_1, T_2)$), где T_1 – время действия вынесения поллютантов с поверхности хвостохранилищ за счет дефляции Q ; T_2 – время сохранения метеорологических условий, и учитывая методику расчета выбросов от неорганизованных источников [7, с. 45]. Учитывая тот факт, что к неорганизованным выбросам относят выбросы в размере не направленных потоков, возникающих, в том числе из-за недостаточной работы средств пылеподавления в местах хранения поллютантов, то есть на складах, хвостохранилищ предприятий [6, с. 98]:

$$G_x = \frac{A \cdot t \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_5}{10^4 \cdot x^3}, \quad (2)$$

где A – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы и определяющий условия горизонтального рассеивания атмосферных примесей ($с^{2/3,0} C$) (принято, $A = 0,16$ за [2, с. 148] для Украины); t – продолжительность дефляции (принято $t = 6$ час. = 21600 сек), (с); k_1 – коэффициент, учитывающий местные метеорологические условия; k_2 – коэффициент, учитывающий местные условия, уровень защищенности хвостохранилищ от внешних воздействий, условия пылеподавления (принято $k_2 = 1,0$ – для условий 4-х боковой пространственной открытости хвостохранилища); k_3 – коэффициент, учитывающий влажность материала шлама (принято $k_3 = 1,0$ – для условий сухого шлама, т. е. влажность шлама не превышает 1 %); k_4 – коэффициент, учитывающий профиль поверхности хвостохранилищ и определяется как отношение $\frac{F_{факт}}{F}$ (величина k_3 находится в пределах 1,3 – 1,6 зависит от гранулометрического состава материала и уровня заполнения хвостохранилищ); k_5 – коэффициент, учитывающий гранулометрический состав материала (принято $k_5 = 1,0$); $F_{факт}$ – фактическая поверхность хвостохранилищ с учетом рельефа его сечения (учитывается площадь, которая пылит), ($м^2$); F – поверхность пыления в плане, ($м^2$).

Расчет фактора метеорологического разбавления G_x за формулой (2) осуществлен для расстояния $x = 5$ км (ближайший населенный пункт в направлении преобладающего направления ветра по розе ветров – Север) для объемной концентрации пыли в приземном слое атмосферы.

В результате задача, возникающая при вычислении прогнозной объемной концентрации C_x поллютантов хвостохранилища в приземном слое атмосферного воздуха на расстоянии x от хвостохранилища, сведена к определению интенсивности q выноса загрязняющих веществ в атмосферный воздух с поверхности хвостохранилища, которая является функцией дефляции Q и фактической площади пыления $F_{факт}$ с хвостохранилищ:

$$q = f(Q, F_{факт}) \quad (3)$$

В расчетах принято, что фактическая площадь пыления (142 га) не превышает 10 % от общей площади хвостохранилища $F_{факт} = 14,2$ га.

Интенсивность дефляции Q рассчитано для двух вариантов:

1. интенсивность дефляции от каждой фракции шлама,
2. интегральный показатель интенсивности дефляции красного шлама $Q_{ч.ш.}$ (за всеми фракциями), учитывая относительное содержание определенной фракции в шламе:

$$Q_{ч.ш.} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 k_i \cdot Q_i \quad (4)$$

где $Q_{ч.ш.}$ – интенсивность ветровой эрозии шлама (по разным фракциям), (кг/(м²·с)); k_i – относительный показатель количества фракций i в шламе ($i=1 \div 3$): $k_1 = 0.84$, $k_2 = 0.14$, $k_3 = 0.02$; Q_i – интенсивность ветровой эрозии фракции i шлама, (кг/(м·с)).

Рассчитав уровень ветровой эрозии и учитывая зависимость ее интенсивности для легкого суглинка хвостохранилища от ширины поля, подставляем в (1) выражение (3), с учетом установленной величины полной плоскостности ветровой эрозии Q для шлама в целом, г/(м²·с)

$$Q_{ч.ш.}(v, Q_i) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 k_i \cdot Q_i(v) \quad (5)$$

и выражение (2), получим выражение для определения и прогнозирования объемной концентрации поллютантов хвостохранилища шламов в приземном слое атмосферного воздуха на расстоянии x от хвостохранилища:

$$C_x = 0,52 \cdot \frac{A \cdot t \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_5 \cdot e^{0,7 \cdot v} \cdot F_{факт}}{x^3} \quad (6)$$

Результаты прогнозирования для расстояния 1500 м отражено на рисунке 1.

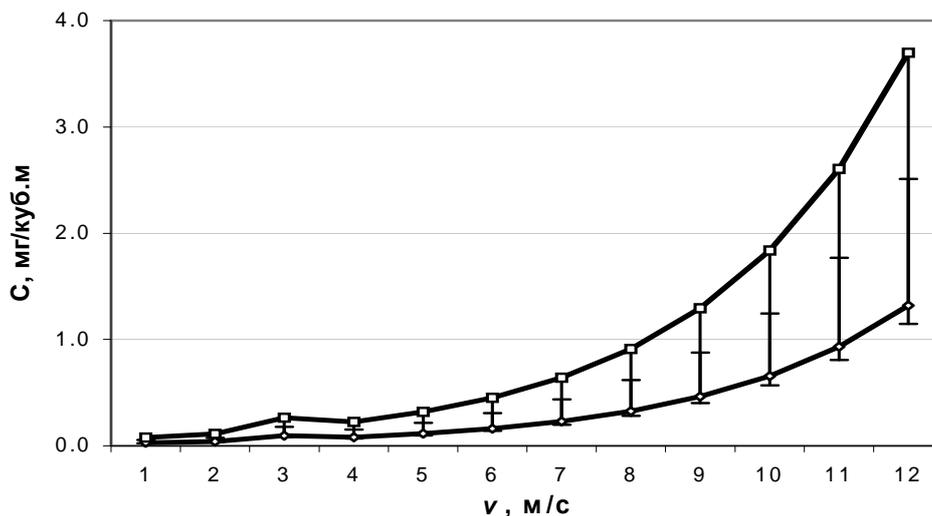


Рисунок 1 – Прогнозирование поля объемной концентрации пыли C , мг/м³ в приземном слое атмосферного воздуха

Как видно из рисунка, прогнозирование объемной концентрации пыли в приземном слое атмосферного воздуха показало, что объемная концентрация пыли составила 0,08–3,7 мг/м³, а уровень ПДК пыли в воздухе населенных пунктов может достигаться уже при скорости ветра 6 м/с.

Таким образом, за достаточно консервативными оценками прослеживается формирование опасной ситуации со стороны загрязнения пылью и поллютантами хвостохранилища приземного слоя атмосферного воздуха в районе близлежащих населенных пунктов. Это является источником попадания к людям повышенной концентрации поллютантов из хвостохранилища как ингаляционным, так и через пищевую цепь вследствие оседания пыли на поверхности сельскохозяйственных угодий и дальнейшего перемещения по трофической цепи.

Это обосновывает проведение работ по разработке эффективного комплексного метода пылеподавления поллютантов на поверхности хвостохранилищ добывающих и перерабатывающих предприятий. При разработке технологии использования комплексного метода пылеподавления поверхности хвостохранилищ можно рекомендовать средства с дернины и камышовых матов. По результатам исследований данные материалы имеют высокую способность к снижению уровня дефляции на хвостохранилищах при различных метеорологических условиях (длительное,

многократное колебания температуры воздуха, порывы ветра до 15 м/с, замерзания пульпы хвостохранилища, затопление хвостохранилища во время дождей и таяния снега); продолжительность по пылеподавлению (до 50 лет), текущий ремонт системы сохраняет не менее 95 % ее функций; возможность раскрытия отдельных участков хвостохранилищ для реализации шламов и в дальнейшем с восстановлением покрытия; устойчивость к метеорологическим условиям и токсичной среды хвостохранилищ, отсутствие дополнительной негативной нагрузки на технобиогеоценоз хвостохранилищ и биогеоценоз территорий вокруг хвостохранилищ.

Выводы. Рассчитана интенсивность ветровой эрозии для различных фракций красного шлама и их смеси.

1. На основании модельного представления хвостохранилища как объемного наземного источника пыления осуществлено прогнозирование объемного содержания пыли в приземном слое атмосферного воздуха.

2. Полученные результаты могут составить основание для ориентации в загрязнении приземного слоя атмосферного воздуха вблизи добывающих и перерабатывающих предприятий для климатически метеорологических условий Южной Степи.

3. Получено подтверждение необходимости поиска технологически эффективных и экономически оправданных мер уменьшения пылеобразования на техногенных массивах, которые позволят решить проблему загрязнения атмосферного воздуха в зоне влияния техногенных экосистем.

4. Разработан комплексный метод пылеподавления поллютантов техногенных территорий перерабатывающих предприятий.

Литература

1. Берлянд, М.Е., Генихович, Е.Н., Оникул, Р.И. К нормированию выбросов от наземных источников / М.Е. Берлянд, Е.Н. Генихович, Р.И. Оникул // Труды ГГО – 1997. – Вып. 387. – 78 с.
2. Григор'єва, Л.І., Томілін, Ю.А. Нормування антропогенного навантаження на навколишнє середовище : Навчальний посібник / Л.І. Григор'єва, Ю.А. Томілін. – Миколаїв : Вид-во МДГУ ім. Петра Могили, 2005. – 174 с.
3. Гошовський, С.В., Рудько, Г.І., Преснер, Б.М. Екологічна безпека техногенно-природних геосистем у зв'язку з катастрофічним розвитком геологічних процесів / С.В. Гошовський, Г.І. Рудько, Б.М. Преснер. – К. : ЗАТ «НІЧЛАВА», 2002. – 624 с.
4. Лисиченко, Г.В., Забулонов, Ю.Л., Хміль, Г.А. Природний, техногенний та екологічний ризики : аналіз, оцінка, управління / Г.В. Лисиченко, Ю.Л. Забулонов, Г.А. Хміль. – К. : «Наукова думка», 2008 – 544 с.
5. Ляшенко, В.И., Карпенко, Б.В. Природоохранные технологии управления состоянием хвостохранилищ / В.И. Ляшенко, Б.В. Карпенко // Науковий вісник НГУ. – 2009. – № 11. – С. 69–76.
6. Мазур, В.А., Горщар, В.І., Конопльов, О.В. Екологічні проблеми землеробства / В.А. Мазур, В.І. Горщар, О.В. Конопльов. – К. : Центр наукової літератури, 2010. – 456 с.
7. Методическое пособие по рас чету выбросов от неорганизованных источников в промышленности строительных материалов / ЗАО «НИПИОТСТРОМ». – Новоросийск, 2000. – 32 с.
8. Монаков, А.С. Разработка метода прогнозирования пылевых выбросов горнообогатительными комбинатами в окружающую среду : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.С. Монаков. – М., Московский государственный горный университет, 2004. – 22 с.
9. Огородник, А.М. Дослідження інтенсивності дефляції та ефективності методів пилопригнічення масивів-шлamosховищ / А.М. Огородник // Екологія і природокористування : збірник наукових праць Інституту проблем природокористування та екології НАН України. – 2012. – Вип. 15. – С. 38–44.
10. Огородник, А.М. Забезпечення екологічної безпеки масивів-хвостосховищ (на прикладі Миколаївського глиноземного заводу) / А.М. Огородник // Наукові праці ЧДУ ім. П. Могили. Серія : Техногенна безпека. – 2011. – Т. 169. – Вип. 157. – С. 55–63.
11. Розробка та впровадження системи мінімізації впливів на довкілля небезпечних виробництв та підприємств ядерного циклу України // Заключний звіт по НТП / Інститут клітинної біології та генетичної інженерії НАН України. – Тема № П-2-10 – К., 2010. – 65 с.

Разнообразие и структура региональной малакофауны разнотипных водных экосистем

И.Ф. РАССАШКО, А.А. МОЖАРОВСКАЯ

Приведены материалы по малакофауне водных экосистем Белорусского Полесья за весь период ее изучения. Обобщенные данные по видовому разнообразию малакофауны показывают, что с начала XX века по настоящее время в водоемах и водотоках региона обнаружено 63 вида, из них представителей класса Брюхоногие моллюски (Gastropoda) – 40, класса Двустворчатые моллюски (Bivalvia) – 23. Собственные исследования выполнены в летний период 2008–2014 гг. на водных объектах, расположенных в городской и пригородной зонах г. Гомель – 7 водоемов, г. Брест – реки Мухавец и Лесная, г. Могилев – р. Днепр, ее залив и пойменный водоем. Установлены степень разнообразия и количественного развития, виды-индикаторы моллюсков, отмечена их связь с условиями среды обитания.

Ключевые слова: водные экосистемы Белорусского Полесья, малакофауна, биоразнообразие, численность, виды-индикаторы.

The article presents materials on water ecosystems malacofauna of Belarusian Polesie for the whole period of its study. Summary data on the species diversity malacofauna show that since the beginning of the XX century to the present time 63 species were revealed in the lakes and rivers of the region. There are 40 species among representatives of the class of Gastropoda and 23 among the class of Bivalvia. Personal researches were performed in summer period from 2008 to 2014 year on water facilities located in urban and country areas of Gomel (7 ponds), Brest (Mukhavets and Lesnaya rivers), Mogilev (Dnepr river, Dnepr bay and floodplain pond). Degree of diversity and quantitative development, species-indicators of molluscs were marked, their relationships with habitat conditions were established.

Keywords: water ecosystems Belarusian Polesie, malacofauna, biodiversity, population, species, strength, indicator species.

Введение. Представители малакофауны приурочены к обитанию в разных типах водоемов и это находится во взаимосвязи с закономерностями их распространения по основным структурам ландшафта, биотопам и зонам. Вариабельность видового богатства моллюсков (Mollusca) является важной характеристикой при оценке биологического разнообразия водных экосистем.

Моллюски принадлежат к широко распространенным водным организмам. Многие из них относятся к группе донных фильтраторов, поэтому подвергаются риску воздействия токсических соединений. Имея способность к фильтрации больших масс воды, они могут аккумулировать значительное количество тяжелых металлов, пестицидов и др. Кумуляция таких соединений происходит главным образом в раковинах, жабрах, мышцах, мантии моллюсков. Так как моллюски – это пища для многих животных, они становятся реальной угрозой распространения токсических соединений в экосистемах. Видовое разнообразие и количественное развитие моллюсков зависит от многих факторов. В особенности благоприятные условия моллюски находят на небольших, хорошо прогреваемых мелководьях, густо заросших высшей водной растительностью и нитчатыми водорослями. Наибольшие показатели плотности моллюсков и видовое разнообразие наблюдаются в прибрежной зоне водоемов на глубине 0,1–0,5 м.

Способ существования моллюсков, численность популяций, физиология, легкость получения и разведения в лаборатории делает их пригодными для индикации физико-химических параметров воды. Есть виды, которые являются биоиндикаторами и используются при мониторинге качества воды, оценке загрязнения окружающей среды и его негативного влияния на организмы. Данные литературы [1] показывают на возможность, например, использования *Unio pictorum* при оценке загрязнения оттоков коммунальной свалки. Реакцией на загрязнение у этого вида было закрытие створок раковин и сифонов, что приводило к торможению фильтрации воды. Время и степень закрытия створок раковин у особей указанного вида были приняты в качестве индекса их реакции на загрязнение среды.

Цель работы состоит в обобщении данных, полученных с начала XX в. по настоящее время по таксономическому составу малакофауны водных экосистем Белорусского Полесья, в изучении видовых комплексов, степени разнообразия и развития моллюсков, их распространения по конкретным водоемам.

Задачи заключаются в сравнительном анализе малакофауны, представленной в разных водоемах.

Материалы и методы. Настоящие исследования выполнены в летний период 2008–2014 гг. на водных объектах, расположенных в городской зоне: г. Гомель – 7 объектов (старица и залив р. Сож в микрорайоне «Мельников луг», озеро Девятый карьер в промышленном районе города, озера Волотовское 1 и Волотовское 2 в микрорайоне, водоем в жилом районе по ул. Чонгарская дивизия, Гребной канал); в г. Брест, 2 реки – Мухавец и Лесная; г. Могилев, р. Днепр – створ I находится в районе любительского лова рыбы, створ II – примерно в 1 км ниже по течению, возле железнодорожного моста через реку, III – залив в районе пляжа, IV – небольшой пойменный водоем возле залива; в пригородных зонах городов – возле г. Лоев, в дачной зоне поймы Днепра – 1 водоем, в лесной местности, на территории Кореневской экспериментальной базы Института леса НАН Беларуси – 3 водоема.

Учет моллюсков делали на водоемах по периметру, на реках – на участках, имеющих разную протяженность и приуроченных к пляжам, местам любительского лова рыбы, испытывающих выраженную антропогенную нагрузку, от уреза воды на расстоянии 2–4 м. Одновременно с этим проводили учет только раковин моллюсков в прибрежной полосе. Определение видов осуществляли по определителям [2], [3], полученные данные сверяли с каталогом и другими работами [4], [5]. В ходе работы сделаны коллекции моллюсков¹.

На основании полученных данных установлены важные экологические показатели сообществ: индекс видового разнообразия, индекс фаунистической общности, индекс доминирования.

Индекс видового разнообразия рассчитан по формуле, предложенной Маргалевым,

$$d = \frac{S-1}{\ln N}, \quad (1)$$

где d – индекс видового разнообразия, S – число видов, N – численность.

Индекс фаунистической общности (индекс сравнения) рассчитывали по формуле Соренсена

$$I = \frac{2c}{a+b}, \quad (2)$$

где a – число видов в сообществе А, b – число видов в сообществе В, c – число видов, общих для двух сообществ.

Индекс доминирования рассчитан по формуле

$$D = \frac{n_i}{N} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где D – индекс доминирования; n_i – численность отдельных видов; N – общая численность.

Результаты и их обсуждение. Обобщение данных по видовому разнообразию малакофауны водных экосистем Белорусского Полесья показывает, что за всю историю изучения (с начала XX в. по настоящее время) обнаружено 63 вида, из них представителей класса Брюхоногие (*Gastropoda*) – 40, класса Двустворчатые (*Bivalvia*) – 23 (таблица 1, рисунок 1).

Как видно из таблицы 1, наиболее разнообразна малакофауна рек – 84,1 % от общего числа видов, представленных в водных объектах региона. Близкое количество видов отмечается в трех группах водоемов, и доля видов, обнаруженных в них, в малакофауне региона составляет 60,3 % – каналы, 57,1 % – пойменные водоемы, 55,6 % – старицы, затоны, карьеры, охладитель ТЭЦ, родники и др. Количество видов в озерах почти в 2 раза меньше, чем, например, в реках и равно 44,4 %. Их еще меньше в водохранилищах – 33,3 % и во временных водоемах – 17,5 %.

¹ В исследованиях принимали участие студенты 3–6 курсов дневной и заочной форм обучения: Е.С. Казмерчук, В.В. Шклярлова (Луговская), А.В. Логовая, К.С. Подпоронова, А.В. Ключко, В.Н. Крысюк, авторы выражают им благодарность. Есть публикации студентов.

Таблица 1 – Количество видов моллюсков в водных экосистемах Белорусского Полесья

Таксономические группы моллюсков	Реки	Озера	Пойменные водоемы	Водохранилища	Каналы	Старицы, др.	Временные водоемы
Брюхоногие (Gastropoda)	34	20	27	18	25	22	8
Двустворчатые (Bivalvia)	19	8	9	3	13	13	3
Всего	53	28	36	21	38	35	11

Необходимо указать виды, представленные в водоемах и водотоках региона, которые отмечаются в водных экосистемах Беларуси повсеместно. К ним относятся из класса Gastro-poda – *Viviparus viviparus* (Linnaeus, 1758), *V. contectus* (Millet, 1813), *Limnaea stagnalis* (Linnaeus, 1758), *Radix balthica* (Linnaeus, 1758), *Planorbis corneus* (Linnaeus, 1758), *Pl. planorbis* (Linnaeus, 1758), *Anisus vortex* (Linnaeus, 1758), *Bathyomphalus contortus* (Linnaeus, 1758), из класса Bivalvia – *Pisidium casertanum* (Poli, 1791).

В исследуемых водных экосистемах имеется ряд видов, обнаруженных в малакофауне Беларуси и являющихся редкими, включая *Acroloxus lacustris* (L), *Aplexa hypnorum* (L), *Gyraulus acronicus* (A. Ferussac), *G. riparius* (Westerlund) [4].

Заслуживают специального упоминания данные по видовому разнообразию моллюсков, обнаруженных в Днепре и представленных в каталоге [4]. Они показывают, что малакофауна реки включает 30 видов, из них Gastropoda – 17, Bivalvia – 13, что равно 44,2 % от таковой в водных экосистемах Беларуси.

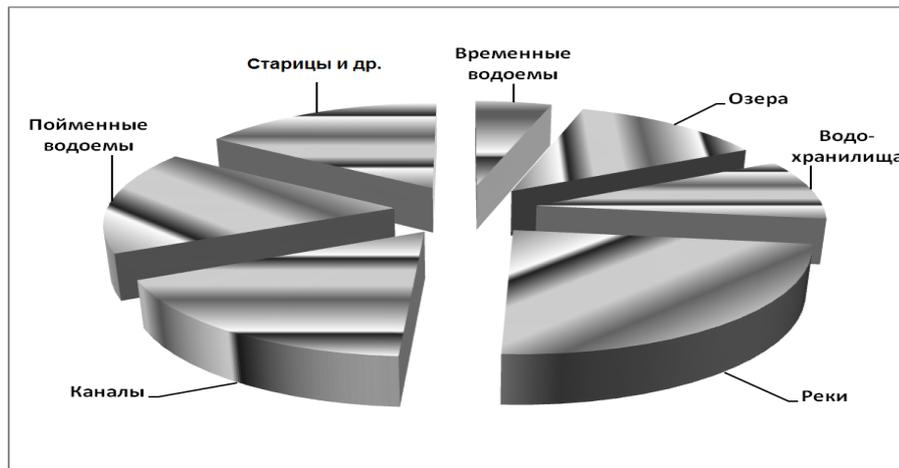


Рисунок 1 – Распределение видов моллюсков в водных экосистемах Белорусского Полесья

На участке р. Днепр, прилегающему к г. Могилеву, обнаружено 7 видов моллюсков, принадлежащих к двум классам: Gastropoda – 3, Bivalvia – 4 (таблица 2). Количество видов моллюсков на створах реки одинаковое – по 5, оно такое же в заливе. В пойменном водоеме обнаружен только 1 вид. Общие виды имеются на трех местах сбора. Следует отметить, что вид *Radix auricularia* обнаружен только в пойменном водоеме, *Bithynia tentaculata* – в Днепре на створе I. Заслуживает упоминания присутствие в исследуемых местах Днепра моллюска *Dreissena polymorpha*. Она относится к инвазивным видам. В литературе отмечают [4], [6], что расселение дрейссены осуществляется под влиянием хозяйственной деятельности человека, в результате чего к настоящему времени исконный ареал (Понто-Каспийский бассейн) значительно расширен и охватывает пресноводные водоемы Европы, Северной Америки. Вселение дрейссены в водоем сопровождается улучшением качества воды и в ряде случаев повышением продуктивности рыб-бентофагов, увеличением обилия водоплавающих птиц, поскольку моллюск входит в рацион 38 видов рыб и 36 видов птиц. Вместе с тем, данный вид оказывает разноплановое воздействие на водные экосистемы. Дрейссена является обрастателем и может наносить значительный ущерб техническим сооружениям. Трубы

технического и питьевого снабжения, защитные решетки сильно обрастают дрейссеной, что затрудняет проход воды, поэтому необходима их постоянная очистка. Дрейссена, расселяясь в водоемы, становится потенциальной нишей для местных паразитов или индуцирует с собой новых, облигатно с ней связанных. Таким образом, в связи с постепенным расширением ареала имеется необходимость владения информацией о представленности дрейссены в водоемах региона.

Таблица 2 – Таксономический структура, численность, размерные параметры видов моллюсков, обнаруженных в Днепре в районе г. Могилев, июль–сентябрь 2014 г.

Виды моллюсков, их таксономическое по- ложение	Места сбора материала				Индикаторная значимость	Некоторые эколого-биологические показатели
	створ I	створ II	залив р. Днепр	пойменный водоем		
1	2	3	4	5	6	7
Класс Gastropoda Cuvier, 1797 Подкласс Orthogastropoda Надотряд Caenogastropoda Отряд Architaenioglossa Семейство Viviparidae Grey, 1847 Род Viviparus Montfort, 1810 Вид <i>Viviparus viviparous</i> (Linnaeus, 1758)	1) 9-13 2) 19-29 3) 14-21	1) 3-7 2) 13-31 3) 11-21	1) 4-9 2) 9-38 3) 9-24	- - -	Индикатор загрязненных условий (β-мезосапроб)	Раковина толсто- стенная, с тремя красно- коричневыми поло- сами, есть крышеч- ка. Для водоемов Беларуси обычен, встречается повсе- местно в характер- ных для этого вида моллюсков местах обитания.
Отряд Neotaenioglossa Семейство Bithyniidae J. A. Grey 1857 Род Bithynia Leach, 1818 Подрод Bithynia Leach, 1818 Вид <i>Bithynia (Bithynia) tentaculata</i> (Linnaeus, 1758)	1) 1 2) 7 3) 6	- - -	- - -	- - -	Индикатор загрязненных условий (β-мезосапроб)	Раковина рогово- коричневая, башне- видная. Вид приуро- чен к стоячим и реч- ным водным объектам с высоким значением минерализации воды. Обладает чрезвычай- ной экологической пластичностью, может быть охарактеризован как эврибионт.
Род Radix Montfort, 1810 Вид <i>Radix auricularia</i> (Linnaeus, 1758)	- - -	- - -	- - -	1) 12-30 2) 12-3,0 3) 8-21	Индикатор значительно загрязненных условий (β-α- мезосапроб)	Раковина уховидная, тонкая с большим устьем. Предпочитает прибрежья рек и круп- ные стоячие водоемы.
Класс Bivalvia Linneus, 1758 Подкласс Eulamellibranchia Надотряд Palaeoheterodonta Отряд Unionoida, Stoliczka, 1871 Семейство Unionidae Род Anodonta Lamarck, 1799 Вид <i>Anodonta cygnea</i> (Linnaeus, 1758)	- - -	1) 1 2) 77 3) 44	1) 1-6 2) 90- 130 3) 60-75	- - -	Индикатор загрязненных условий (β-мезосапроб)	Раковина овальная, с макушкой, смещен- ной вперед. Линии прироста выражены четко. Замочная пло- щадка отсутствует. Предпочитает стоячие и медленно текущие водоемы с песчано- илистыми грунтами.

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7
Род Unio Phillipson, 1788 Вид <i>Unio pictorum</i> (Linnaeus, 1758)	1) 4-31 2) 3-9 3) 15-63	1) 7-15 2) 39-65 3) 18-31	1) 4-10 2) 11-38 3) 21-77	- - -	Индикатор загрязненных условий (β-мезосапроб)	Раковина удлинено овальная, зеленовато- желтого цвета. Замоч- ная площадка узкая. Предпочитает каналы, реки с медленным течением, на песчаных и песчано-илистых плотных грунтах.
Род Sphaerium Scopoli, 1777 Вид <i>Sphaerium rivicola</i> (Lamarck, 1818)	1) 1-4 2) 11- 19,5 3) 12- 14,5	1) 1 2) 20 3) 16	1) 2-7 2) 18-23 3) 15- 20	- - -	Индикатор довольно грязных ус- ловий (α-мезосапроб)	Раковина толсто- стенная. Замочная площадка относитель- но грубая. Рео- фильный вид, обита- ет главным образом в крупных реках, каналах. Заселяет участки водотоков с песчано-илистым грунтом, в котором отсутствует при- брежная водная рас- тительность.
Семейство Dreissenidae Род Dreissena Van Beneden, 1835 Вид <i>Dreissena polymorpha</i> (Pallas, 1771)	1) 4-16 2) 21-29 3) 9-14	1) 1 2) 20 3) 10	1) 4-9 2) 9,5-39 3) 9-16	- - -	Индикатор относительно не высокого загрязнения (олиго-β- мезосапроб)	Раковина треуголь- но-клювовидная. Для данного вида характерна лате- ральная асимметрия. Внутренняя поверх- ность раковины без перламутрового слоя. Замок лишен зубов. Характеризу- ется эпибионтным и биссусным прикреп- лением. Поселяется на всех пригодных подводных субстра- тах. Наличие планк- тонной стадии в цикле развития мол- люска способствует расселению.

Примечание – 1) – величины численности вида, экз.; 2) – высота раковины (Gastropoda), длина (Bivalvia), мм; 3) – ширина раковины, мм.

Численность видов моллюсков исследуемых участков Днепра уменьшается в 2–3 раза от выше к ниже расположенным по течению реки створам. Имеются отличия по численности моллюсков в реке по сравнению с таковой в заливе и пойменном водоеме. Из двух последних объектов численность моллюсков в 3 раза больше в пойменном водоеме. Прослеживается доминирование некоторых видов. Наибольшей численности в Днепре на створе I достигает перловица обыкновенная – *U. pictorum*. Раковин данного вида было много на отмели залива реки, и они трудно подлежали учету, что показывает на большую численность вида. Вместе с тем, залив является визуально загрязненным, и способность поддерживать большую численность вида, вероятно, определяется его эврибионтностью. Еще одним аналогичным примером является прудовик ушковый – *R. auricularia* (индекс доминирования равен 100%), представленный в пойменном водоеме. При этом данный вид единственный учтенный моллюск в водоеме.

Размерные параметры обнаруженных видов моллюсков изменяются в довольно больших пределах (таблица 2) как в Днепре, так в заливе и пойменном водоеме. Это показывает на наличие в популяциях видов особей разных возрастов, с преобладанием более старших, половозрелых.

Виды моллюсков, обнаруженные в Днепре, являются индикаторами качества воды, при этом, четыре из них – 57,1 % являются β -мезосапробами (характерны для загрязненных вод), три других вида относятся к индикаторам относительно чистых, значительно загрязненных и грязных условий соответственно. Удельный вклад каждого вида составляет по 14,3 %. Следует подчеркнуть, что индикаторы значительно загрязненных и грязных условий отмечены в пойменном водоеме, в заливе и на створах р. Днепр (таблица 2).

В качестве примеров, отражающих разнообразие, структуру и численность малакофауны водных экосистем региона, в сравнительных целях обратимся к другим водным объектам, указанным выше.

В ходе проведенных исследований [7] установлено, что в водоемах на территории г. Гомель обнаруженные виды моллюсков, как и в Днепре, относятся к двум классам: *Gastropoda* и *Bivalvia*. Что касается отдельных водоемов, то в озере Волотовское 1 обнаружено 5 видов из класса *Gastropoda*, в озере Волотовское 2–3 вида из классов *Gastropoda* и *Bivalvia*, в заливе р. Сож отмечено 10 видов – по 5 из каждого класса, в озере Девятый карьер представлено 3 вида, и они относятся к классу *Gastropoda*. Основу малакофауны исследуемых водоемов (кроме залива р. Сож) составляют моллюски класса *Gastropoda*. Удельный вклад видов данного класса в общее количество всех видов моллюсков достигает 77,1 %, соответственно доля видов класса *Bivalvia* составляет 22,9 %. Результаты исследований показали, что более разнообразна малакофауна залива р. Сож в микрорайоне «Мельников луг». Озеро Волотовское 1 занимает промежуточное положение, озера Девятый карьер и Волотовское 2 имеют более бедную фауну моллюсков. Следует отметить, что последний водоем имеет искусственное происхождение, подвергается периодической «чистке», и его гидрофауна начинает постепенно восстанавливаться. В целом, в водоемах обнаружено 14 видов (22,2 % от количества видов, установленных для водных объектов региона).

В летний период 2014 г. в двух из исследуемых водоемов г. Гомеля было обнаружено 10 видов моллюсков, относящихся к классам *Gastropoda* (6) и *Bivalvia* (4). Количество видов в местах сбора материала различается, на старице р. Сож встречено 9, в заливе – 4. Следует отметить, что виды *Pl. corneus* и *B. tentaculata* встречены только на старице, а *R. auricularia* – в заливе р. Сож. Есть и общие виды – *U. pictorum*, *V. viviparus*, *A. cygnea*.

Из видов, обнаруженных в другие годы, в 2014 г. на старице и заливе р. Сож продолжают встречаться: *U. pictorum*, *D. polymorpha*, *V. viviparus*, *L. stagnalis*, *Pl. corneus*, *B. tentaculata*.

Степень сходства малакофауны отмеченных водоемов по индексу сравнения Соренсена различная. Наибольшая она (индекс равен 0,75) между сообществами озер Волотовское 1 и Девятый карьер: 3 вида, отмеченные в последнем водоеме, есть и в озере Волотовское 1, но здесь обнаружено еще 2 других вида. Довольно значительная степень сходства (индекс сравнения 0,46, 0,40 и 0,33) между сообществами залива р. Сож и озера Девятый карьер, озера Волотовское 1 и залива, озер Волотовское 2 и Девятый карьер. Гораздо меньше (0,25 и 0,15) сходство выражено между сообществами моллюсков Волотовских озер, озера Волотовское 2 и залива р. Сож.

В исследуемых водоемах, кроме Волотовского 1, массовым видом являлась живородка речная – *V. viviparus*. Общим видом для четырех водоемов был этот же вид. Только в заливе есть виды (их 5), которых нет в других водоемах. В двух из четырех водоемов отмечено три общих вида, включая *L. stagnalis*, *Pl. corneus*, в двух из исследуемых водоемов – два таких вида, в том числе, *Pl. planorbis*, остальные виды обнаружены в отдельных водоемах. В заливе р. Сож массово представлена *D. polymorpha*.

Количественные учеты показали, что численность моллюсков в водоемах варьирует. Средние величины численности, установленные на основании повторных учётов, равны 3470, 27, 7, 43 экземпляров соответственно в заливе р. Сож, озерах Волотовское 1, Волотовское 2 и Девятый карьер.

В водоеме дачной зоны в пойме Днепра обнаружено 9 видов, включая те, которые обитают в водоемах в пойме Сожа. Наиболее часто встречается живородка речная.

Представляет интерес то, что ряд видов, обнаруженных нами в водоемах г. Гомеля и пригородной зоны, отмечался ранее в литературе [8] для водоемов города – это *L. stagnalis*, *V. viviparus*, *Pl. planorbis*, *A. cygnea*, *U. pictorum*.

Данные за 2009–2010 гг., полученные по малакофауне водных объектов, расположенных на территории Бреста и пригородной зоны, показывают, что моллюски р. Мухавец представлены 9 видами, относящимися к классам *Gastropoda* (5 видов) и *Bivalvia* (4 вида). В р. Лесной обнаружено 6 видов. Для исследованных рек установлено, что индекс видового разнообразия малакофауны изменяется от 1,2 (р. Мухавец) до 1,8 (р. Лесная). Наибольшие различия наблюдаются в малакофауне городской и пригородной зон – индекс сравнения равен 0,3. Это очевидно является отражением экологического состояния рек.

В исследуемых водных экосистемах Бреста и пригородов имеются виды моллюсков, которые встречаются в водоемах, расположенных на территории г. Гомеля. На разных участках р. Мухавец представлены: *V. viviparus*, *L. stagnalis*, *P. corneus*. Из массовых видов в реке отмечены те же и некоторые другие. В р. Лесной встречались виды из родов *Viviparus* и *Lymnaea*.

Во всех исследуемых водоемах малакофауна включает виды-индикаторы, при этом в Волотовских озерах и в озере Девятый карьер все такие виды являются характерными для загрязненных – β -мезосапробных условий. В заливе р. Сож они преобладают (60 % от общего числа индикаторов), но имеются также виды, характерные для более чистых (1 %) и довольно грязных (2 %) – β - α -мезосапробных вод. Наиболее массовый вид – *V. viviparus* относится к β -мезосапробным организмам.

Из 9 видов моллюсков, обнаруженных в дачной зоне в пойме Днепра, 5 видов являются видами – индикаторами, что составляет 55,6 % от общего их числа. Из 5 указанных видов 4 (80 %) относится к β -мезосапробным организмам и 1 вид – *D. polymorpha* (20 %) указывает на α - β -мезосапробные условия.

В водных объектах пригорода г. Брест (р. Лесная) из 6 выявленных видов моллюсков все являлись характерными для β -мезосапробной зоны. Из 9 видов, обнаруженных в городской зоне, 3 являются индикаторами олигосапробной, 5 – β -мезосапробной и 1 вид – α -мезосапробной зон. На основании этих данных можно судить об увеличении степени загрязнения отдельных участков водных объектов городской и частично пригородной территорий.

Сравнение малакофауны водных объектов в г. Гомеле и Днепра в г. Могилеве показывает, что имеются общие виды: *V. viviparus*, *U. pictorum*, *D. polymorpha*, *R. auricularia*, *B. tentaculata*, *A. cygnea*. Однако, есть и разные виды: *Galba truncatula*, *Pl. planorbis*, *A. stagnalis*, *Sph. corneum*, *B. leachi*. – водоемы в г. Гомеле, *Sph. rivicola* – Днепр в г. Могилеве. Что касается данных, полученных в водоеме дачной зоны, расположенной в пойме Днепра (г. Лоев, Гомельская область), и в водных объектах г. Могилева, то следует отметить, что здесь также есть общие – *R. auricularia*, *V. viviparus*, *U. pictorum*, *D. polymorpha* и разные виды моллюсков – *L. stagnalis*, *Anisus vortex*, *Hippeutis complanata*.

Количественные данные по малакофауне сравниваемых водных объектов показывают, что они значительно варьируют, при этом в Днепре в районе г. Могилева численность моллюсков невысокая, ее величины имеют тот же порядок, что и в водоемах г. Гомеля. В заливе же р. Сож учтено значительно больше особей моллюсков.

Что касается видов-индикаторов качества воды, то в Днепре и водоемах его поймы, как и в водоемах, указанных выше, виды малакофауны являются индикаторами разных классов вод, с преобладанием индикаторов β -мезосапробных условий. Однако, на обоих створах Днепра имеются индикаторы более высокого загрязнения.

Анализ полученных данных по водным моллюскам разных территорий позволяет заключить, что разнообразие и степень развития их фауны в исследуемых водоемах связаны в определенной мере с условиями среды – типом грунта, зарастаемостью, глубиной водоемов, их температурным режимом, временем создания, антропогенной нагрузкой.

Заслуживает внимания то, что часть видов моллюсков, представленных в исследуемых водных экосистемах, являются фильтраторами и участвуют в осветлении воды, влияя, таким образом, на процессы самоочищения, формирования качества воды в них.

Литература

1. Wlodkowic, D. Моллюски как биоиндикаторы окружающей среды / D. Wlodkowic // «Экология и молодежь» (исследования экосистем в условиях радиоактивного и техногенного загрязнения окружающей среды) : материалы I Межд. науч.-практ. конференции, Гомель, 17–19 марта 1998 г., в 2 т. – Т. II. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 1998. – С. 199–200.
2. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий / Под общей ред. Я.С. Цалолыхина. – Санкт-Петербург : Наука, 2004. – Т. 6. – 522 с.
3. Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР / Отв. редакторы Л.А. Кутикова, Я.И. Старобогатов. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1977. – 512 с.
4. Лаенко, Т.М. Фауна водных моллюсков Беларуси / Т.М. Лаенко; НАН Беларуси, Науч.-практ. центр по биоресурсам. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 128 с.
5. Лаенко, Т.М. Новые для Беларуси находки редких и охраняемых видов моллюсков / Т.М. Лаенко // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды : материалы III Межд. науч. конференции, Минск, 17–22 сент. 2007 г. – Минск : БГУ, 2007. – С. 227.
6. Бурлакова, Л.Е. Распространение дрейссены по водоемам Беларуси / Л.Е. Бурлакова // Итоги и перспективы гидроэкологических исследований : материалы Междунар. науч. конф., Минск, 25–26 нояб. 1999 г., / Под общей ред. д-ра биол. наук А.Ю. Каратаева. – Мн. : БГУ, 1999. – С. 30–34.
7. Рассашко, И.Ф. Сравнительные данные по разнообразию и количественным показателям фауны моллюсков разнотипных водных экосистем / И.Ф. Рассашко, А.А. Сурков, А.В. Логовая, В.Н. Крысюк // Сотрудничество в области использования природных ресурсов и экологического оздоровления бассейна Днепра : материалы Межд. науч.-практ. конференции, Гомель, 9–10 июля 2011 г.; Мин-во природн. ресурсов и охраны окр. среды РБ, ПР ООН – ГЭФ, Гомельский обл. комитет природн. ресурсов и охраны окр. среды, Гомельский гос. ун-т, Белорус. гос. ун-т транспорта. – Гомель : БелГУТ, 2011. – С. 288–292.
8. Макаренко, Т.М. Особенности накопления тяжелых металлов моллюсками водоемов и водотоков г. Гомеля и прилегающих территорий / Т.В. Макаренко // Научный и производственно-практический журнал «Известия». – 2007. – № 1. – С. 120–126.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 12.11.2014

УДК 591.5: 599.363

О проблемах изучения экологии и видовой диагностики кутор (*Neomys*, Soricidae), обитающих на территории Беларуси

А.А. САВАРИН¹, А.Н. МОЛОШ²

В работе анализируются данные по распространению и диагностическим (экстерьерным и краниологическим) характеристикам кутор (*Neomys*), обитающих в Беларуси. Особое внимание уделяется методике изучения экологии землероек и статусу малой куторы (*N. anomalus*).

Ключевые слова: *Neomys*, распространение, диагностика, изменчивость, череп.

Data on distribution and diagnostic (exterior and craniological) features of a water shrew, (*Neomys*) inhabiting Belarus are analyzed. Special attention is given to the methods of studying of shrews' ecology and status of *N. anomalus*.

Keywords: *Neomys*, distribution, diagnostics, variability, skull.

Введение. На территории Беларуси обитают два вида кутор – обыкновенная – *Neomys fodiens* (Pennant, 1771) и малая (*N. anomalus* Cabrera, 1907). Первый вид считается обычным, второй был внесен в приложение Красной книги Республики Беларусь 2004 г. [1] (статус – требующий дополнительного изучения). Кутора малая включена в Красный список МСОП, Приложение III Бернской конвенции, Красную книгу Украины (2009 г., III категория охраны) [2] и Польши. Следует заметить, что в бывшем СССР эта землеройка к охраняемым видам не относилась [3].

Экология и даже морфология целого ряда землероек, включая виды р. *Neomys*, в Беларуси исследована крайне слабо. Показательными являются следующие факты. В изданном 50 лет назад определителе млекопитающих [4] отмечалось: кутора малая редка; найдена в Беловежской пуще, Василевичском и Речицком районах; образ жизни не изучен. А в вышедшей 10 лет назад фундаментальной работе по териофауне Беларуси [5], основанной на анализе почти 800 литературных источников, приведены лишь некоторые сведения по морфологии и экологии вида, заимствованные из иностранной литературы, а также из публикации одного автора [6] по териофауне Березинского заповедника.

Одна из объективных причин низкой изученности кутор – отсутствие комплексных исследований землероек различных регионов Беларуси и программ развития зоологических музеев в университетах. Субъективная – методические ошибки при отловах и оценке численности зверьков, слабая дифференциация зоологами республики видов-двойников (особенно в случае симпатрии), бытующее мнение о хорошей изученности микротериофауны и др. Даже в монографиях по экологии мелких млекопитающих (например, [7]) не указываются диагностические признаки видов и их изменчивость.

Цели данной работы – выявить основные методические ошибки, допускаемые исследователями при изучении сообществ землероек р. *Neomys* в Беларуси, а также определить совокупность дифференцирующих признаков видов-двойников этого рода на основе анализа последних научных работ специалистов приграничных регионов и собственных данных.

Результаты и их обсуждение. Методы и методика исследований. Куторы являются хищниками в водных и околоводных экосистемах, питаются как беспозвоночными, так и позвоночными видами животных (насекомыми на различных стадиях развития, пауками, мелкими ракообразными, моллюсками, дождевыми червями, головастиками, мальками), а также в определенной мере и некрофагами (нами в желудке одной куторы обыкновенной обнаружены фрагменты хвоста, стопы и шерсть мышевидного грызуна). Поэтому традиционный отлов мелких млекопитающих давилками Геро с наживляемым хлебом для кутор в большинстве случаев мало или почти не применим. Так, отловленные нами особи кутор ($n = 7$) попались только в те живоловки и давилки, которые были наживлены салом (несмотря на то, что рядом располагались «традиционные» ловушки с жареным хлебом), а также в пластмассовые стаканы и цилиндры.

Использование липких бумажных лент показало свою эффективность при отлове белоzubки малой (*Crocidura suaveolens*) в жилище человека и его постройках [8]. Особи куторы малой имеют приблизительно в 1,5 раза большую среднюю массу тела по сравнению с белоzubкой малой ($10,0 \pm 0,51$ [9] и $6,55 \pm 0,29$ [10] соответственно). Можно предположить, что метод липких лент может оказаться действенным и при отловах куторы малой.

Требует внимания и проверки на практике метод поимки землероек с помощью ловушек, прикрепленных к лежащей на воде доске. По нашему мнению, вероятность отлова кутор увеличится не менее чем на порядок, так как при этом практически исключится попадание мышевидных грызунов (за исключением водяной полевки, *Arvicola terrestris* и ондатры, *Ondatra zibethicus*).

Относительная численность малой куторы в типичных биотопах в условиях заповедника «Брянский лес» – до 1 % в уловах [11], а по оценке [7] в Беловежской пуще – 0,8–2 экз. на 100 ловушко-суток и 0,9–3 экз. на 100 канавко-суток (сведения на 1973–1976 гг.). Следовательно, на территориях, находящихся в той или иной степени под антропогенным воздействием, численность будет еще ниже, причем, значительно. Поэтому продолжительность экспозиции ловушек должна быть достаточно большой, а стационарные исследования должны охватывать временной диапазон не менее 2–3 лет и проводиться одновременно в нескольких подходящих для обитания биотопах.

Наиболее предпочтительны для исследований экологии кутор лесные озера, искусственные водоемы, имеющие защитные лесополосы, а также пойменные луга и леса. Заслуживает особого внимания анализ погадок ночных хищных птиц. Например, в районе сипухи землеройки могут составлять около 40 %, из которых около 0,5 % приходится на долю кутор [12].

Известно, что между двумя видами кутор проявляется сильная пищевая конкуренция. Поэтому *N. anomalus* нередко выбирает участки с более мощным развитием травянистого и кустарникового покровов [13].

Однако исследования землероек р. *Neomys* с учетом указанных методических аспектов в Беларуси никогда не проводились.

Статус куторы малой. Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь 9 июня 2014 г. издало постановление № 26, в котором указан новый список редких и находящихся под угрозой исчезновения животных. В этом списке малой куторы нет. В предыдущей редакции Красной книги (2004 г.) она была в Приложении со статусом DD (недостаточно данных). Нынешний список Приложения пока не известен.

За последние 50 лет особи вида отловлены (достоверные находки) на территории Беларуси только специалистом А.П. Каштальяном в Березинском биосферном заповеднике (15.07.1998 г., 11.10.1998 г., 03.10.1999 г. – три особи) на берегу лесного ручья в еловом биотопе. Кроме 3 черепов особей, отловленных в Березинском заповеднике, в коллекции Зоологического музея МГУ (г. Москва) имеются еще 3 черепа малой куторы с территории Беларуси. Эти зверьки отловлены: 1930 г. – вблизи д. Деражня Речицкого района (1 экземпляр) и 02.08.1953 г. и 03.08.1953 г. – в Беловежской Пуще. Другие коллекционные находки куторы малой с территории Беларуси не известны. Нет тушки или черепа зверька и в фондах учебно-биологического музея БрГУ им. А.С. Пушкина [14].

Представляют интерес для анализа сведения о находках особей вида в последние десятилетия на сопредельных с Беларусью территориях и государствах.

В списке млекопитающих Брянского заповедника кутора малая указана как редкий вид [11]; приведены даты и места отлова (находки) зверька: 2000 г. – в погадках серой неясыти; июль 2003 г. – на песчаной отмели р. Нерусса (1 мертвая особь); 2004 г. – на берегу р. Сольки (1 особь); в 2004–2005 гг. – в различных биотопах охранной зоны: широколиственные и сосновые леса в пойме, пойменный луг (10 особей).

В пределах ареала на территории России кутора малая – редкий, а местами – чрезвычайно редкий вид.

В Киевской области зверек пойман 10.03.1988 г. (с. Пироговичи Иванковского района) [15]. На территории Чернобыльской зоны отчуждения кутора малая не поймана, но возможное обитание этой землеройки не исключается [16].

В 2009 г. одна особь куторы малой отловлена в северо-западной части Литвы [17] на затапливаемом лугу, заросшем густой травянистой растительностью (осоки, камыши).

Следует особо отметить следующее: в 2005–2009 гг. проводился [18] учет численности мелких млекопитающих в естественных и трансформированных местообитаниях Припятского Полесья (Столинский, Березовский и Житковичский районы): в пойме р. Припяти, на Ольманских болотах, на вторично заболоченном участке мелиорированных угодий, в агроландшафтах и др. Из отловленных 1405 особей мелких млекопитающих – лишь 9 особей (0,64 %) относятся к виду кутора обыкновенная, *N. fodiens*. Малая кутора не поймана.

Даже на территории нынешнего национального парка «Припятский» находки *N. anomalus* с начала 20 века не известны [19].

В течение последних 5–7 лет нами периодически проводились отловы землероек, обитающих вблизи водных объектов. Кутора обыкновенная отловлена на р. Уза, р. Сож, а также в канале у Гомельского городского полигона ТКО. На мелиоративных каналах в Гомельском районе пойманы только бурозубки обыкновенная и малая.

Указанные факты дают основание считать, что современное распространение *N. anomalus* в Беларуси не ограничивается Березинским заповедником. Можно предположить ее находки в ряде областей, в т. ч. в Брестской и Гомельской (Белорусское Полесье). Однако, она везде будет редким, малочисленным видом землероек.

Представленные ранее доводы и результаты исследований различных авторов позволяют утверждать, что кутора малая является (как минимум) редким видом аборигенной териофауны Белорусского Полесья и Беларуси в целом. Поэтому занесение ее в список «краснокнижников» выглядит обоснованным шагом. Подобная точка зрения согласуется с позицией МСОП, украинских териологов (нахождение куторы малой в Красном списке и Красной книге соответственно).

Видовая диагностика кутор. Все отловленные особи куторы малой (*N. anomalus*) с территории нынешней Беларуси ($n = 6$), черепа которых хранятся в коллекции Зоологического музея МГУ, имеют ряд сходных краниологических характеристик. Промеры черепа варьируют сравнительно незначительно (приведены важнейшие):

- кондилобазальная длина – 19,3–19,94 мм;
- ширина черепа – 8,59–9,44 мм;
- высота нижней челюсти – 3,85–4,11 мм.

Однако у куторы малой в пределах европейского ареала указанные промеры имеют гораздо большую изменчивость, в частности: кондилобазальная длина – 17,4–21,0 мм; ширина черепа – до 10,9 мм, высота нижней челюсти – до 4,7 мм [17], [20], [21]. Поэтому следует ожидать, что отдельные особи с территории Беларуси будут иметь краниометрические признаки, близкие к таковым для *N. fodiens*. Как и наоборот, некоторые особи *N. fodiens* по ряду причин, в том числе и патофизиологической природы, могут существенно отличаться от «стандартных» параметров. Значительную вариабельность следует ожидать и по некоторым экстерьерным, морфометрическим признакам.

Приведем конкретные примеры. Нами отловлены две особи *N. fodiens*:

– у первой: лапки с хорошо развитыми плавательными оторочками (рисунок 1, а), но киль на хвосте развит слабо, при этом его протяженность составляла менее 45 % длины хвоста (рисунок 1, б) – признак, свойственный *N. anomalus*;



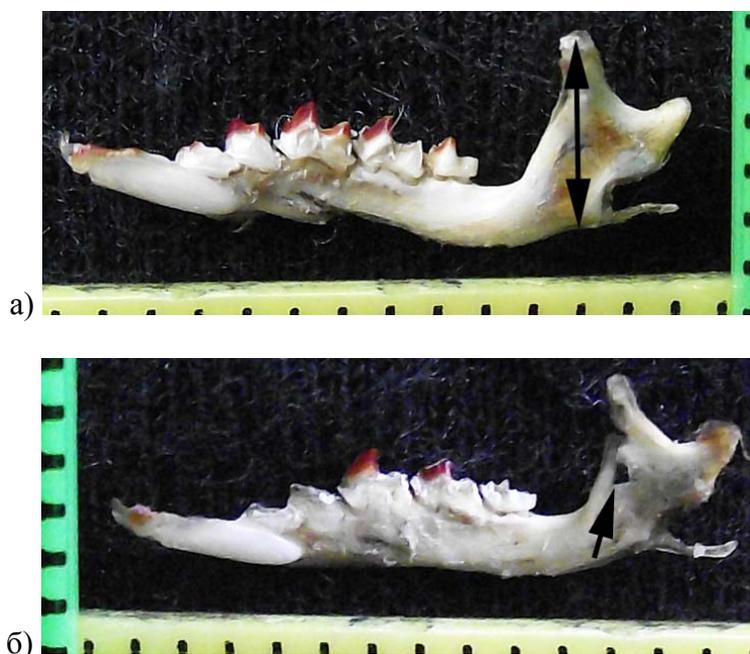
а)



б)

Рисунок 1 – Особь *N. fodiens* с промежуточными экстерьерными признаками
а) лапка с белыми удлиненными волосками; б) хвост со слабовыраженным килем
(его протяженность указана)

– у второй: обе стороны нижней челюсти имели крайне малую высоту (*proc. coronoides*) – около 4,0–4,1 мм (рисунок 2, а), характерную для *N. anomalus*. В челюсти выявлены некоторые патологии: перфорация ветви (*r. mandibulare*), искривленность и слабое окостенение углового отростка (*proc. angularis*) (рисунок 2, б).



а)

б)

Рисунок 2 – Особь *N. fodiens* с аномальными краниологическими характеристиками
а) малая высота нижней челюсти; б) перфорация ветви челюсти

Представленные факты доказывают, что при видовой диагностике кутор необходимо учитывать не только наличие в популяции отдельных особей с промежуточными экстерьерными и краниометрическими признаками, но и возможное влияние на метрические характеристики (в т. ч. и черепа) патофизиологических процессов.

Для видовой дифференциации кутор следует обратить особое внимание на комплекс следующих промеров черепа: кондилобазальную длину, ширину черепа, межглазничную ширину, длину и высоту нижней челюсти, длину верхнего и нижнего рядов зубов, длину M_1 – M_3 нижней челюсти. Так, у особей *N. anomalus* межглазничная ширина будет изменяться в основном в пределах 3,7–4,3 мм, а у особей *N. fodiens* – более 4,5–4,7 мм. Близкими к указанным промерам будут и длины M_1 – M_3 нижней челюсти.

В связи с отсутствием репрезентативного для анализа коллекционного фонда тушек и черепов кутор в зоологических музеях Беларуси в дальнейших исследованиях следует:

– создать для каждого вида каталог вариационной изменчивости важнейших диагностических характеристик;

- выявить наиболее часто встречающиеся признаки, т. е. определить морфологический и морфометрический «стандарт» обоих видов кутор в условиях региона;
- изучить географию обитания кутор с аномальными экстерьерными и морфометрическими признаками;
- найти корреляцию в географическом распространении особей с аномальными признаками и патологическими изменениями черепа (прежде всего, лицевого отдела).

Заключение. На территории Белорусского Полесья наиболее привлекательными (в плане изучения экологии кутор) являются западная и центральная его части. Это объясняется следующими обстоятельствами: значительной площадью ООПТ (например, в Брестской области – около 14 %); широким по площади акватории и протяженным по времени паводком; большим количеством озер и пойменных лесов и лугов. Необходимо заметить, что и в приграничных с Беларусью юго-восточных районах Польши количество обитающих «краснокишечников» наибольшее [22].

Для объективной оценки численности двух видов кутор следует обратить особое внимание на методы, продолжительность отлова и выбор предполагаемых местообитаний зверьков.

Кутора малая (*N. anomalus*) относится к числу наименее изученных и, очевидно, редких видов териофауны Беларуси. Следует рассмотреть вопрос о включении ее в Красную книгу республики.

Чрезвычайно важным является не только пополнение музейных фондов университетов, но и точное, своевременное этикетирование собранного материала во время летних практик, тщательный его анализ и публикации «Каталога коллекций». Для этого необходимо иметь специалиста-териолога в биологическом (зоологическом) музее университетов.

Авторы благодарят зоолога А. П. Каштальяна за любезно переданные сведения об его находках куторы малой в Березинском биосферном заповеднике.

Литература

1. Красная книга Республики Беларусь : Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды диких животных / ред. кол. Г.П. Пашков (гл. ред.) [и др.]. – Мн. : БелЭн, 2004. – С. 317.
2. Червона книга України. Тваринний світ / за ред. І.А. Акімова – К. : Глобалколсалтинг, 2009. – С. 489.
3. Красная книга СССР : Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды диких животных и растений / А.М. Бородин, А.Г. Банников, В.Е. Соколов [и др.]. – Т. 1. – М. : Лесная промышленность, 1984. – С. 10–11.
4. Сержанин, И.Н. Определитель млекопитающих Белоруссии / И.Н. Сержанин, Ю.И. Сержанин, В.В. Слесаревич. – Мн. : Наука и техника, 1967. – С. 26–27.
5. Савицкий, Б.П. Млекопитающие Беларуси / Б.П. Савицкий, С.В. Кучмель, Л.Д. Бурко. – Минск : Изд. центр БГУ, 2005. – С. 62–63.
6. Каштальян, А.П. О проблеме видовой идентификации землероек Беларуси / А.П. Каштальян // Разнообразие животного мира Беларуси. Итоги изучения и перспективы сохранения : материалы междунар. научн. конф., Минск, 28–30 ноября 2001 г. – Мн., 2001. – С. 2003–2004.
7. Блоцкая, Е.С. Популяционная экология мелких млекопитающих юго-западной и центральной Беларуси / Е.С. Блоцкая, В.Е. Гайдук. – Брест : Изд-во Брест. гос. ун-та, 2004. – С. 37–41.
8. Саварин, А.А. Об экологии и морфологической изменчивости *Crocidura suaveolens* (Pallas, 1811) на юго-востоке Беларуси / А.А. Саварин // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2013. – № 5 (80). – С. 143–149.
9. Rychlika, L. Prey size, prey nutrition, and food handling by shrews of different body sizes // L. Rychlika, E. Jancewicz // Behavioral Ecology. – 2002. – Vol. 13. – Is. 2. – P. 216–223.
10. Саварин, А.А. Морфометрические и краниологические особенности белозубки малой (*Crocidura suaveolens*) юго-востока Беларуси / А.А. Саварин // Весці БДПУ. Сер. 3. – 2009. – № 2. – С. 50–54.
11. Фауна позвоночных животных заповедника «Брянский лес» (птицы, млекопитающие) / Ю.П. Федотов, Е.Ф. Ситникова (ред.). – Брянск : Группа компаний «Десяточка», 2008. – С. 37–41.
12. Purger, J.J. First data on small mammal fauna from Krnjeuča (Bosanska Krajina), as obtained by a barn owl, *Tyto alba* (SCOP., 1769) pellet analysis / J.J. Purger, T. Karanović // Biol. vestn. – 1991. – Vol. 39. – Is. 3. – P. 41–44.
13. Keckel M.R. Differences in the microhabitat preferences of *Neomys fodiens* (Pennant 1771) and *Neomys anomalus* Cabrera, 1907 in Saxony, Germany / M.R. Keckel, H. Ansorge, C. Stefen // Acta Theriologica. – 2014. – Vol. 59. – Is. 4. – P. 485–494.

14. Молош, А.Н. Млекопитающие учебно-биологического музея Брестского государственного университета имени А.С. Пушкина / А.Н. Молош // Трансграничное сотрудничество в области экологической безопасности и охраны окружающей среды : материалы III науч.-практич. конф., Мозырь, 2014 г./ Гомельский обл. комитет природн. ресурсов и охраны окр. среды, Гомельский гос. ун-т, Мозырский гос. пед. ун-т ; редкол. : В.В. Валетов [и др.]. – Гомель : БелГУТ, 2014. – С. 290–294.
15. Шевченко, Л.С. Млекопитающие. / Л.С. Шевченко, С.И. Золотухина. – Вып. 2. Насекомоядные (Insectivora), Рукокрылые (Chiroptera), Зайцеобразные (Lagomorpha), Грызуны (Rodentia). – Киев : Зоомузей ННПМ НАНУ, 2005 – 238 с.
16. Гащак, С.П. Фауна хребетних тварин Чорнобильської зони відчуження / С.П. Гащак, Д.О. Вишневикий, О.О. Заліський. – Славутич : Вид-во Чорнобильського центру з проблем ядерної безпеки, радіоактивних виходів та радіоекології, 2006. – С. 59.
17. Balčiauskas, L. Mediterranean water shrew, *Neomys anomalus* Cabrera, 1907 – a new mammal species for Lithuania / L. Balčiauskas, L. Balčiauskienė // North-western journal of zoology. – 2012. – № 8. – P. 41–44.
18. Домбровский, В.Ч. Видовой состав и численность мелких млекопитающих в естественных и трансформированных местообитаниях Припятского Полесья / В.Ч. Домбровский, Н.Н. Яковец // Проблемы сохранения биологического разнообразия и использования биологических ресурсов : материалы науч.-практич. конф., Минск, 2009 г. : в 2 ч. / ГНПО «Научно-практический центр НАНБ по биоресурсам»; редкол. : М. Е. Никифоров [и др.]. – Минск, 2009. – Ч. 1. – С. 102–105.
19. Зенина, И. Териофауна национального парка «Припятский» в аспекте ее раритетности / И. Зенина // Раритетна теріофауна та її охорона. Серія : Праці Теріологічної Школи. – Вип. 9 / За редакцією І. Загороднюка. – Луганськ, 2008. – С. 165–171.
20. Seña, A. Criterios de diferenciación entre el musgajo de Cabrera y el musgajo patiblanco en La Rioja / A. Seña // Galemys. – 2005. – № 1–2. – P. 63–68.
21. Мишта, А.В. Видовой состав и морфологические особенности Soricidae Украинских Карпат / А. В. Мишта // Фауна Східних Карпат : сучасний стан і охорона : мат. конфер. – Ужгород, 1993. – С. 85–88.
22. Grabińska, B. The distribution of protected and endangered mammals versus land use, type of habitat and protected areas of Poland: a geographical approach / B. Grabińska // Polich journal of ecology. – 2007. – № 3. – P. 605–613.

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

²Брестский государственный университет им. А.С. Пушкина

Поступила в редакцию 07.10.2014

УДК 911.2+504.54

Оценка трансформации природной среды и геоэкологическое районирование Беларуси

А.С. СОКОЛОВ

В работе рассматривается оценка антропогенной трансформации природной среды административных районов Беларуси. Проведена классификация районов по интегральному показателю нарушенности. Предложена схема геоэкологического районирования Беларуси.

Ключевые слова: трансформация природной среды, экологическая оценка, структура землепользования, геоэкологическое районирование.

The assessment of anthropogenous transformation of the administrative regions environment of Belarus is presented. Classification of regions by the integrated indicator of disturbance is carried out. The scheme of geoeological division into districts of Belarus is offered.

Keywords: environment transformation, ecological assessment, land use structure, geoeological division into districts.

Современное состояние природной среды, характеризующееся возрастанием интенсивности и разнообразия видов антропогенного воздействия на неё, требует разработки и совершенствования методов её комплексной оценки и охраны на всех иерархических уровнях её организации. Республика Беларусь, представляющая собой длительно осваиваемый регион с развитой промышленностью и сельским хозяйством, испытала многообразные преобразования своей природной среды, обусловившие формирование сложных природно-антропогенных комплексов характеризующихся различной степенью трансформации природного компонента.

Целью настоящей работы является анализ территориальных особенностей трансформации природной среды Беларуси и выделение регионов, отличающихся спецификой антропогенных воздействий и экологического состояния.

В качестве операционных территориальных единиц (ОТЕ), которые выступали непосредственным объектом оценки, были выбраны единицы административно-территориального деления – административные районы. Главным достоинством такого подхода является возможность использования в качестве исходных данных материалы официальной статистики и лёгкость отражения их на картах. Несмотря на то, что они скрывают неоднородность распространения явлений внутри территориальных единиц и не позволяют передать истинной картины их размещения, их широкое применение объясняется как удобством и высокой оперативностью их составления, так и доступностью большинства современных статистических показателей, учитываемых по анализируемым административно-территориальным единицам [1]. Основным недостатком является то, что административные регионы не отражают природную дифференциацию ландшафтов, средние и суммарные показатели затушевывают различия внутри единиц районирования и создают иллюзию контрастов на их границах, что географически некорректно. Однако в данном исследовании площадь каждого района достаточно мала (около 1 %) по сравнению с площадью всей анализируемой территорией, и это обстоятельство позволяет достаточно корректно отображать региональные особенности трансформации природной среды, так как степень влияния на результат указанных для такого подхода недостатков уменьшается с уменьшением относительных размеров ОТЕ.

Источником информации о структуре землепользования административных районов стал Государственный земельный кадастр [2], содержащий информацию по площади всех категорий земель по административным районам (площади лесов, лугов, сельскохозяйственных земель, пастбищ, пашни, застроенных, под дорогами и коммуникациями, осушаемых и орошаемых и т. д.). По его данным были определены набор видов землепользования территории районов и

площади, занятые каждым из этих видов. Полученные данные легли в основу определения численного значения антропогенной преобразованности или экологического состояния районов. Для каждого административного района были рассчитаны следующие коэффициенты:

– коэффициент относительной напряжённости эколого-хозяйственного баланса Б.И. Кочурова [3]:

$$K_o = \frac{AH_4 + AH_5 + AH_6}{AH_1 + AH_2 + AH_3} \quad (1)$$

где AH_1 – земли с очень низкой антропогенной нагрузкой (природоохранных и неиспользуемых, то есть экологический фонд), AH_2 – земли с низкой нагрузкой (сенокосы, леса, используемые ограниченно), AH_3 – земли со средней нагрузкой (многолетние насаждения, рекреационные земли), AH_4 – земли с высокой нагрузкой (пахотные земли; ареалы интенсивных рубок; пастбища и сенокосы), AH_5 – земли с очень высокой нагрузкой (орошаемые и осушаемые земли), AH_6 – земли с высшей нагрузкой (земли промышленности, транспорта, городов, поселков, инфраструктуры);

– коэффициент абсолютной напряжённости эколого-хозяйственного баланса Б.И. Кочурова [3]:

$$K_A = \frac{AH_6}{AH_1} \quad (2)$$

– коэффициент естественной защищённости Б.И. Кочурова [3]:

$$K_{EЗ} = \frac{AH_1 + 0,8 \cdot AH_2 + 0,6 \cdot AH_3 + 0,4 \cdot AH_4}{S} \quad (3)$$

где S – общая площадь территории

– геоэкологический коэффициент И.С. Аитова [4]:

$$K_e = \frac{C_p}{C_o} \quad (4)$$

где C_p – % площади ненарушенных (коренных) геосистем на той или иной территории, в ландшафтном районе, ландшафте; C_o – % предельно допустимой площади ненарушенных (коренных) геосистем (для зоны смешанных и широколиственных лесов принимается равным 30).

Для картографирования результатов исследования применялась ГИС *MapInfo Professional 12*. При составлении картограмм использовался метод естественной группировки. Этот метод находит широкое применение для разбиения значений на диапазоны при экологическом картографировании, так как соответствует процессу кластеризации и позволяет выявить отчетливые кластеры данных [5], [6].

Для включения рассчитанных показателей в показатель интегральной оценки трансформации природной среды административных районов, они были нормированы, т. е. к каждому из них было применено такое преобразование, в результате которого все они стали измеряться в N-балльной (безразмерной) шкале. Для этого использовался метод линейного масштабирования [7]. Если частный критерий X связан с анализируемым качеством компонента среды монотонно возрастающей зависимостью (т. е. чем больше значение x , тем ниже качество – для коэффициентов K_A и K_o), то расчет нормированного частного критерия \tilde{X} производится по формуле:

$$\tilde{X} = N \cdot \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (5)$$

а если связь отрицательна (для показателей $K_{EЗ}$ и K_r), то по формуле:

$$\tilde{X} = N \cdot \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (6)$$

где X – фактическое значение данного критерия, X_{\max} и X_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значение данного критерия, N – количество баллов в шкале.

В результате, значение каждого коэффициента было приведено к единому виду и стало выражаться через значение его по 10-балльной шкале. Таким образом, возникает возможность сравнения этих показателей между собой, а также нахождения суммы всех показателей, которая и будет отражать экологическое состояние изучаемых территорий. Расчет этого интегрального показателя позволил провести классификацию административных районов по уровню нарушенности, определить площадь, занимаемую каждым классом и проживающее в его пределах количество населения (рисунок 1, таблица 1).

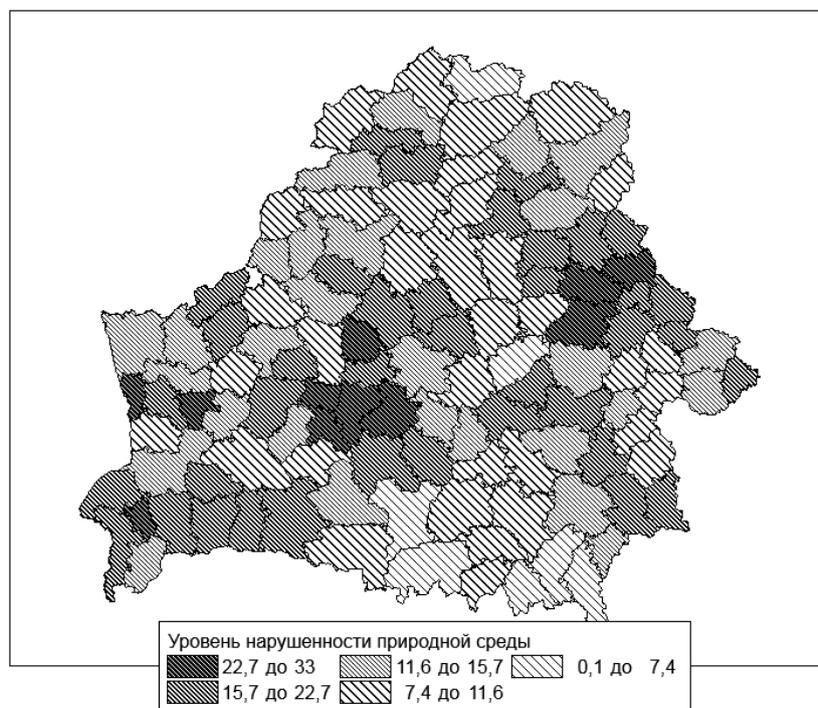


Рисунок 1 – Интегральный показатель нарушенности природной среды районов Беларуси

Таблица 1 – Площадь и население районов с различным уровнем антропогенной трансформации (по значению интегрального показателя нарушенности)

Диапазон	Площадь		Население		Отношение доли площади к доле населения
	тыс. км ²	%	тыс. чел	%	
От 0,1 до 7,4	15,4	7,4	135,1	1,4	5,3
От 7,4 до 11,6	66,9	32,2	1457,6	15,4	2,1
От 11,6 до 15,7	52,1	25,1	1946,0	20,5	1,2
От 15,7 до 22,7	59,6	28,7	5152,1	54,3	0,5
От 22,7 до 33	13,6	6,6	795,0	8,4	0,8

Сопоставление картограммы нарушенности с ландшафтной и физико-географической картами показало что, районы с наиболее высокими значениями показателя сконцентрированы преимущественно в пределах Белорусской возвышенной провинции холмисто-моренно-эрозионных и вторичноморенных ландшафтов. В физико-географическом отношении здесь наиболее нарушенные районы расположены в пределах возвышенных форм рельефа – Минской, Волковысской, Новогрудской, Ошмянской возвышенностей, Копыльской гряды. Заметна достаточно чёткая приуроченность наиболее трансформированных районов востока страны к Восточно-Белорусской провинции вторичноморенных и лёссовых ландшафтов, а именно к той её части, которая также занята возвышенностями – Оршанской, Смоленско-Московской, Горещко-Мстиславской. Третья группа районов с повышенным значением интегрального показателя нарушенности расположена на крайнем юго-западе республики, в западной части Полесской ландшафтной провинции озёрно-аллювиальных, болотных и вторичных водноледниковых ландшафтов преимущественно в пределах Прибугской равнины и Загородья.

Крупнейшие регионы наименее нарушенных территорий сконцентрированы преимущественно в центральных частях Полесской и Поозёрской низменностей.

Расчёт коэффициентов корреляции Пирсона (r) и Спирмена (ρ) показал наличие связи между рассчитанным интегральным показателем нарушенности и другими природными и социальными показателями. Связь с показателем нарушенности имеют геоморфологические показатели, в частности, значение низшей точки административного района ($r = 0,32$, $\rho = 0,28$). Наиболее тесная связь выявлена между интегральным показателем и плотностью сельского населения ($r = 0,48$, $\rho = 0,65$). Если взять логарифм плотности сельского населения, то теснота связи увеличивается ($r = 0,65$). Расчёты корреляции выполнены в программе *STATISTICA 10*, вероятность ошибки на уровне $p < 0,05$.

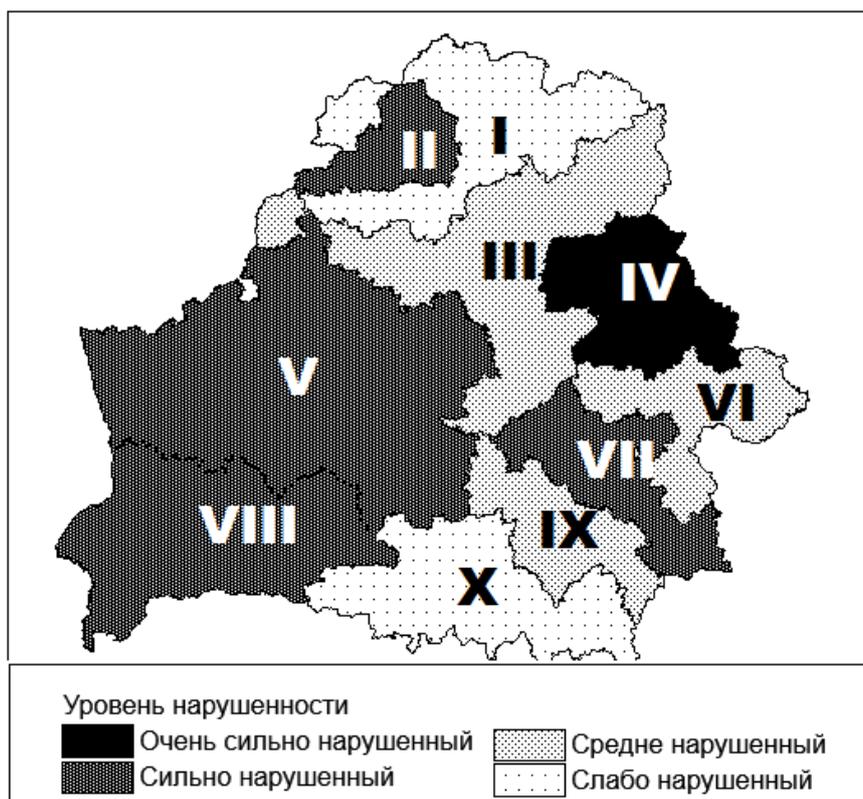


Рисунок 2 – Геоэкологическое районирование Беларуси. Геоэкологические районы: I – Северный; II – Дисненский; III – Витебско-Березинский; IV – Восточно-Белорусский; V – Центрально-Белорусский; VI – Славгородско-Краснопольский; VII – Западно-Полесский; VIII – Гомельско-Жлобинский; IX – Речицко-Светлогорский; X – Восточно-Полесский

На основании анализа карты интегральной оценки трансформации природной среды, а также карт, отражающих распределение отдельных показателей антропогенной нагрузки и особенностей землепользования по административным районам, нами было проведено районирование территории республики по степени преобразованности природной среды.

Всего было выделено 10 геоэкологических районов (рисунок 2), которые отличались особенностями структуры землепользования и степенью антропогенной нарушенности территории.

Территории районов имеют различную площадь – от 3,3 % до 25,0 % территории Беларуси (таблица 2). Наиболее крупные районы – Центрально-Белорусский и Западно-Полесский – приурочены к западной части страны, преимущественно в пределах Брестской, Гродненской и восточной части Минской области.

Для восточной части страны характерно чередование вытянутых в широтном направлении геоэкологических районов с севера на юг, что обусловлено схожей по характеру сменой в этой части страны единиц физико-географического и геоморфологического районирования.

Таблица 2 – Территория и население геоэкологических районов

Геоэкологический район	Площадь		Население			Городское население			Сельское население		
	тыс. км ²	%	тыс. чел.	%	чел./км ²	тыс. чел.	%	чел./км ²	тыс. чел.	%	чел./км ²
Витебско-Березинский	27,5	13,2	924,6	9,7	33,9	692,0	9,6	25,4	232,6	10,4	8,5
Восточно-Белорусский	14,4	6,9	786,5	8,3	55,1	629,9	8,7	44,1	156,6	7,0	11,0
Восточно-Полесский	20,9	10,1	363,4	3,8	17,5	215,7	3,0	10,4	147,7	6,6	7,1
Гомельско-Жлобинский	13,2	6,4	1085,5	11,4	82,9	893,8	12,3	68,3	191,7	8,5	14,6
Дисненский	6,9	3,3	115,2	1,2	16,9	61,3	0,8	9,0	53,9	2,4	7,9
Западно-Полесский	27,3	13,2	1092,7	11,5	40,3	742,1	10,2	27,4	350,6	15,6	12,9
Речицко-Светлогорский	11,1	5,4	293,5	3,1	26,6	206,0	2,8	18,6	87,5	3,9	7,9
Северный	22,0	10,6	421,4	4,4	19,3	287,6	4,0	13,2	133,7	6,0	6,1
Славгородско-Костюковичский	12,4	6,0	167,5	1,8	13,6	93,9	1,3	7,6	73,5	3,3	6,0
Центрально-Белорусский	51,9	25,0	4235,6	44,7	82,2	3421,2	47,2	66,4	814,5	36,3	15,8

Таблица 3 – Особенности структуры землепользования и трансформации природной среды геоэкологических районов

Геоэкологический район	Пашня	Луга	Леса	ООПТ	Сильно нарушенные	Орошаемые	Осушенные	К _А	К _О	К _З	К _Г
Витебско-Березинский	24,2	12,5	48,1	3,4	4,0	0,1	13,4	0,84	0,53	0,62	1,6
Восточно-Белорусский	42,2	16,6	26,7	0,0	5,0	0,6	11,9	4,38	1,10	0,53	0,9
Восточно-Полесский	12,7	11,5	57,4	22,5	3,2	0,1	16,6	0,13	0,36	0,70	1,9
Гомельско-Жлобинский	32,6	16,4	34,9	1,3	5,4	0,5	14,3	1,22	0,88	0,55	1,2
Дисненский	29,9	18,9	29,0	5,7	3,3	0,0	22,8	0,47	0,69	0,57	1,0
Западно-Полесский	25,3	17,6	38,9	11,9	4,9	0,1	24,6	0,37	0,77	0,54	1,3
Речицко-Светлогорский	21,1	15,4	50,8	3,2	4,2	0,0	20,1	0,87	0,58	0,58	1,7
Северный	17,0	11,6	49,5	15,1	2,9	0,0	12,0	0,18	0,34	0,68	1,7
Славгородско-Костюковичский	23,2	15,2	46,6	0,2	3,2	0,3	11,4	0,96	0,52	0,64	1,6
Центрально-Белорусский	35,5	15,2	35,3	4,1	5,1	0,1	17,4	0,77	1,04	0,53	1,2

По степени нарушенности природной среды геоэкологические районы были разделены на 4 группы:

– районы слабой нарушенности – Северный и Восточно-Полесский. Для них характерна значительная доля лесов (около 50 %), существенно меньшая доля населения по сравнению с долей площади (в среднем в 2,5 раза), значения К_О от 0,34 до 0,36 К_Г от 1,7 до 1,9 (таблица 3), что соответствует удовлетворительному экологическому состоянию, максимальные значения доли ООПТ;

– районы средней нарушенности – Витебско-Березинский, Славгородско-Костюковичский и Речицко-Светлогорский. Для них характерна вытянутая конфигурация и буферное расположение между сильно нарушенными или сильно и слабо нарушенными районами. Доля пашни составляет 21–24 %, лесов – 46–51 %. Доля населения несколько ниже, чем доля площади. Значения К_О лежат в диапазоне от 0,52 до 0,58 К_Г – от 1,6 до 1,7, что соответствует удовлетворительному экологическому состоянию;

– районы сильной нарушенности – Центрально-Белорусский, Гомельско-Жлобинский, Дисненский, Западно-Полесский. Первые два характеризуются высокой долей пашни (около 35 %) и низким значением лесистости (также около 35 %). Доля их по населению в 1,8 раза превышает долю по площади. Экологическое состояние Дисненского и Западно-Полесского районов в основном обусловлено наиболее высокой степенью осушенности территории;

– район очень сильной нарушенности – Восточно-Белорусский. Особо охраняемые территории республиканского значения отсутствуют, коэффициенты К_А и К_О здесь приобретают самое высокое значение, а К_З и К_Г – самое низкое. Также для района характерна самая высокая доля распаханых земель (в 1,6 раза выше, чем по республике) и самая низкая доля лесов (в 1,6 раза ниже). Район приурочен к возвышенностям Восточно-Белорусской ландшафтной провинции вторичноморенных и лёссовых ландшафтов с наиболее благоприятными для сельскохозяйственного освоения территориями. Доля района в численности населения немного выше, чем в площади.

Таким образом, проведённое исследование позволило выявить территориальные особенности трансформации природной среды Беларуси, провести классификацию административных районов по степени нарушенности, предложить схему геоэкологического районирования территории страны, основанную на особенностях структуры землепользования и показателей трансформации природной среды.

Литература

1. Стурман, В.И. Экологическое картографирование : учеб. пособие / В.И. Стурман. – М. : Аспект-Пресс, 2003. – 251 с.
2. Государственный земельный кадастр Республики Беларусь (по состоянию на 1 января 2013 года) [Электронный ресурс] / Гос. ком. по имуществу РБ. – Минск, 2013. – Режим доступа : www.gki.gov.by/upload/new%20structure/press%20service/GZK_2012.doc – Дата доступа : 28.03.2014.
3. Кочуров, Б.И. Геоэкология : экодиагностика и эколого-хозяйственный баланс территории / Б.И. Кочуров. – Смоленск : СГУ, 1999. – 154 с.
4. Аитов, И.С. Геоэкологический анализ для регионального планирования и системной экспертизы территории (на примере Нижневартковского региона) : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 250036 / И.С. Аитов. – Барнаул, 2006. – 18 с.
5. Медико-экологический атлас Воронежской области : монография / С.А. Куролап, Н.П. Мамчик, О.В. Клепиков [и др.]. – Воронеж : Истоки, 2010. – 167 с.
6. Коновалова, Н.В. Методология создания карты геоэкологического районирования в среде ГИС на примере Ненецкого автономного округа / Н.В. Коновалова, Ю.Н. Шумилова // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия естественных наук. – № 2. – 2008. – С. 70–75.
7. Бакуменко, Л.П. Интегральная оценка качества и степени экологической устойчивости окружающей среды региона (на примере Республики Марий Эл) / Л.П. Бакуменко, П.А. Коротков // Прикладная эконометрика. – 2008. – № 1. – С. 73–92.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 07.10.2014

Дифференциация биогеохимических и агрохимических показателей различных фаций пойменных ландшафтов (на примере поймы р. Сож)

Т.А. ТИМОФЕЕВА

Представлены результаты многолетних исследований дифференциации агрохимических и биогеохимических условий поймы р.Сож. В работе рассмотрены такие агрохимические характеристики почвы, как содержание физической глины, органического вещества (гумуса, гумусовых кислот), обменная (рН) и гидролитическая кислотность (Hr), сумма поглощённых оснований (S), ёмкость поглощения катионов (Т), степень насыщенности основаниями (V), а также содержание подвижных форм Ca^{2+} , P_2O_5 , K_2O , Mg^{2+} . Дана оценка распределения химических элементов (N, K, Ca, P, Mg), в наземном покрове экосистемы поймы р. Сож.

Ключевые слова: поймы рек, ландшафт, почва, глина, экосистема.

The results of long-term studies of differentiation of agrochemical and biogeochemical conditions floodplain of the Sozh river are presented. The agrochemical soil characteristics such as the content of physical clay, organic matter (humus, humic acids), exchange (pH), and hydrolytic acidity (Hr), the amount of absorbed bases (S), the capacity of absorption of cations (T), base saturation (V), and the content of mobile forms of Ca^{2+} , P_2O_5 , K_2O , Mg^{2+} are discussed. The estimation of the distribution of chemical elements (N, K, Ca, P, Mg), in land cover floodplain ecosystem of the Sozh river are analysed.

Keywords: floodplains, landscape, soil, clay, ecosystem

Введение. Поймы рек имеют большое значение для сельского хозяйства как естественная кормовая база для животноводства. Пойменные почвы отличаются высоким плодородием за счет привноса химических элементов с водораздельных территорий. Ежегодно на пойме можно производить два укоса высококачественного сена. Особенно высокие и устойчивые урожаи сена дают луга центральной поймы, обычно покрытые растительностью из злаковых и бобовых трав. Тем не менее, пойменные луга многих речных долин, главным образом, вследствие отсутствия надлежащего ухода за ними и нерационального использования, отличаются низкой производительностью и дают урожаи сена ниже природных возможностей. Значительные площади пойменных лугов сильно заболочены и не используются в качестве кормовых угодий. Также снижает качество травостоя бессистемный выпас скота. В сельском хозяйстве должны разрабатываться мероприятия по улучшению естественных луговых угодий: очистка лугов от кустарников и мелколесья, удаление пней, паводковых наносов и кочек, выравнивание поверхности, осушение заболоченных участков, уничтожение сорных трав, подкормка удобрениями, а также периодическое перезалужение угодий с подбором травосмесей. На пастбищах должна быть организована загонная пастьба скота, производиться их коренное улучшение.

Долина р. Сож расположена в восточной части Белорусского Полесья – обширной низинной территории на западе Русской платформы. По характеру миграции и аккумуляции веществ пойменная экосистема относится к категории аккумулятивных ландшафтов, включающих непосредственно пойму, а также надпойменные террасы [1].

Результаты исследований. Исследования проводились на участке поймы р. Сож, которая активно используется для выпаса скота и сенокосения. Результаты исследования могут быть использованы для разработки рекомендаций по оптимизации использования пойм. Исследовательские профили протяжённостью 2000 и 2300 м заложены в пределах пойменной экосистемы близ д. Радуга Ветковского района Гомельской области и проходят от первой надпойменной террасы до русла р. Сож. Расстояние между профилями 1000 м.

Основными ландшафтно-дифференцирующими факторами, определяющими степень биогеохимической и агрохимической дифференциации структурных элементов поймы, явились характер увлажнения и рельеф. Составлена почвенная и геоботаническая карты участка исследования.

Агрохимические свойства почв в сочетании или отдельно могут создавать условия выноса или концентрации химических элементов. В работе рассмотрены такие агрохимические характеристики почвы как содержание физической глины, органического вещества (гумуса, гумусовых кислот), обменную (рН) и гидролитическую кислотность (Нг), сумму поглощённых оснований (S), ёмкость поглощения катионов (Т), степень насыщенности основаниями (V), а также содержание подвижных форм Ca^{2+} , P_2O_5 , K_2O , Mg^{2+} .

Гранулометрический состав почвенного покрова исследуемой пойменной экосистемы неоднороден. Эти различия довольно чётко проявляются для гумусово-аккумулятивного и иллювиального горизонтов аллювиальных почв. Преобладающие фракции 0,25–0,01 мм с низким содержанием частиц других размерностей, особенно крупно в средне песчаной фракции (0,25 мм) – в среднем 1–3 % (только на повышениях центральной поймы до 27 %). Глинистых частиц – до 13 %. В среднем содержание физической глины (частиц < 0,01 мм) – 9 %. Характерно отсутствие фракции крупнее 1,0 мм. Гранулометрический состав верхних горизонтов почв хорошо отражает специфичность почвообразования для каждой почвенной разновидности. При переходе от прирусловой отмели к валу снижается количество фракций 0,25–0,1 мм и значительно повышаются 0,1–0,01 мм. При переходе от дерновых к болотным почвам (понижений центральной и притеррасной поймы) так же значительно повышается количество фракции 0,1–0,01 мм, и особенно менее 0,01 мм – физической глины. По профилю аллювиальных почв для всех разновидностей отмечается постепенное их укрупнение, нивелирование по составу с отсутствием частиц крупнее 1 мм и довольно низким содержанием фракции < 0,01 мм. В ряде случаев содержание физической глины в иллювиальных горизонтах В₁ и В₂ выше, чем в гумусово-аккумулятивном. При характеристике гранулометрического состава аллювиальных почв поймы можно отметить несколько особенностей: аллювиально-дерновые почвы прирусловой и повышенной центральной поймы и первой надпойменной террасы имеют преимущественно песчано-супесчаный состав, а ближе к понижениям центральной и притеррасной части почвы чаще суглинистые или аллювиально-болотные.

Некоторые авторы [3], [4] отмечают зависимость между поглотительной способностью почвообразующей породы и содержанием тонкой фракции. Физическая глина выполняет роль механического и сорбционного геохимического барьеров.

В гумусово-аккумулятивном горизонте почв поймы минимальные средние величины физической глины (0–4,5 %) приурочены к прирусловой (вал > отмель) и притеррасной поймам. Максимальное количество физической глины (до 11–13 %) характерно для почвенного покрова старицы и центральной поймы (повышения > понижения). Это позволяет выделить сорбционные барьеры на старице, а также в центральной пойме (более выраженные на границе между повышенной и пониженной частями). Многие авторы Кузнецов, Генералова и др. [5] указывают на накопление наилок в данных фациальных элементах. В нашей работе не проводилось выделение непосредственно илистой фракции (< 0,001 мм), но резкое повышение содержания физической глины в 2–3 раза косвенно указывает на привнос и отложение наилок на данных участках поймы в период половодья.

На останках первой надпойменной террасы локально выделяется сорбционный барьер. Здесь развиваются старопойменные почвы, которые заливаются полыми водами один раз в 20–30 лет. Характерной особенностью таких почв является мощный гумусовый горизонт, высокое содержание физической глины (около 12 %) и пойменная дифференциация почвенного профиля с резкой сменой гранулометрического состава слоёв почвообразующих пород, что свидетельствует о влиянии аллювиальных вод на формирование почв в прошлом, тогда как в настоящее время они уже вышли из режима поемности.

Содержание гумуса увеличивается от аллювиально-дерновых песчаных к аллювиально-болотным почвам. На большей части поймы количество гумуса в верхнем горизонте колеблется в основном в пределах 2–4 %. В пределах грив прирусловой отмели и вала гумуса в почвах около единицы (рисунки 1).

В гумусовых горизонтах почв формируется биогенный или биогеохимический барьер. Растительность аккумулирует временно все химические элементы. Растительные остатки и гумус процесс окисления преобразует в золу (сорбционный барьер), которая при заданных физико-химических параметрах (рН, Eh) может удерживать от миграции радионуклиды более

длительное время [6], [7], [8]. Если исходить из содержания гумуса, то наиболее выраженный биогенный барьер для радионуклидов будет на дерново-глеевых супесчаных почвах центральной поймы и первой надпойменной террасе. Одним из наиболее распространённых классов природного органического вещества являются гумусовые кислоты. Из общего количества органического материала в литосфере более 90 % представлено веществами собственно гумусовой природы. Это высокомолекулярные, склонные к ассоциации полидисперсные и полифункциональные лиганды, в структуре которых присутствуют функциональные группы карбоксильных, фенольных, хиноидных, лактонных, эфирных и спиртовых гидрокислов.

Высокая обменная ёмкость гумусовых кислот – 4,8–14,2 мг-экв/г обусловлена присутствием первых двух групп, и именно они обеспечивают образование прочных комплексных соединений с ионами металлов [9]. Комплексообразование с гумусовыми кислотами играет решающую роль в процессах растворения, переноса и отложения химических элементов в зоне гипергенеза.

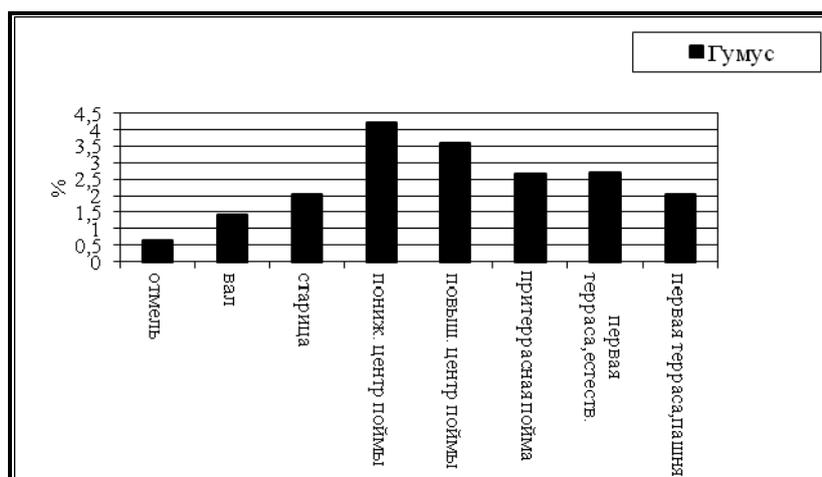


Рисунок 1 – Распределение гумуса по структурным частям экосистемы поймы

По ряду признаков выделяют две совокупности гумусовых кислот: гуминовые и наиболее растворимые фульвокислоты. Вследствие различий в свойствах фульвокислот и гуминовых кислот результатом взаимодействия с металлами могут быть два противоположно направленных геохимических процесса: резкое увеличение миграционной способности элементов в присутствии фульвокислот и сорбционное концентрирование по механизму комплексообразования – при наличии гуминовых кислот. Дифференциация фульво и гуминовых кислот в пойме р. Сож может быть представлена более наглядно при расчёте показателя их соотношения Сгк:Сфк. Величина Сгк:Сфк в зависимости от части поймы и типа почв изменяется от 0,6 до 1,7.

Обменная кислотность. В зоне гипергенеза значения рН обычно находятся в интервале 4–8. В наших исследованиях обменная кислотность (рН в КСl) регулирует миграцию соединений в почве, породе. В зависимости от величины рН химические элементы могут находиться в растворе и мигрировать или выпасть в осадок гидроксида. Источниками ионов водорода в экосистемах пойм являются болота за счёт гумусовых кислот и CO_2 , которые образуются при гниении отмершей болотной растительности.

Важное значение имеет связь двух величин: парциального давления CO_2 (обозначается как $p\text{CO}_2$) и рН – так называемое карбонатное равновесие. При растворении CO_2 в воде возникает угольная кислота (H_2CO_3), а при её диссоциации возрастает концентрация водородных ионов (понижается значение рН): $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CO}_3^{2-} + 2\text{H}^+$ [10].

По этой причине в почвах поймы отмечается пестрота в дифференциации обменной и гидролитической кислотностей. Закрепление ионов водорода путём сорбции коллоидами снижает сумму обменных оснований и степень насыщенности основаниями.

Почвы поймы опытного участка характеризуются диапазоном изменения обменной кислотности (рН в КСl) 5,3–6,6, т. е. размах варьирования составляет 1,3 единицы рН (рисунок 2). В распределении кислотности отмечается пятнистость. Гидролитическая кислотность невысокая

и колеблется в пределах от 0,37 до 5,14 Ммоль/100г почвы. Закономерности изменения её величины почти аналогичны распределению обменной кислотности. Наиболее кислые – торфяно-болотные почвы на низинных торфах на понижениях центральной поймы и дерново-глеевые старицы. Наибольшая гидролитическая кислотность отмечена в аллювиально-болотных почвах понижениях центральной и притеррасной пойм и аллювиальных дерново-глеевых старицы/

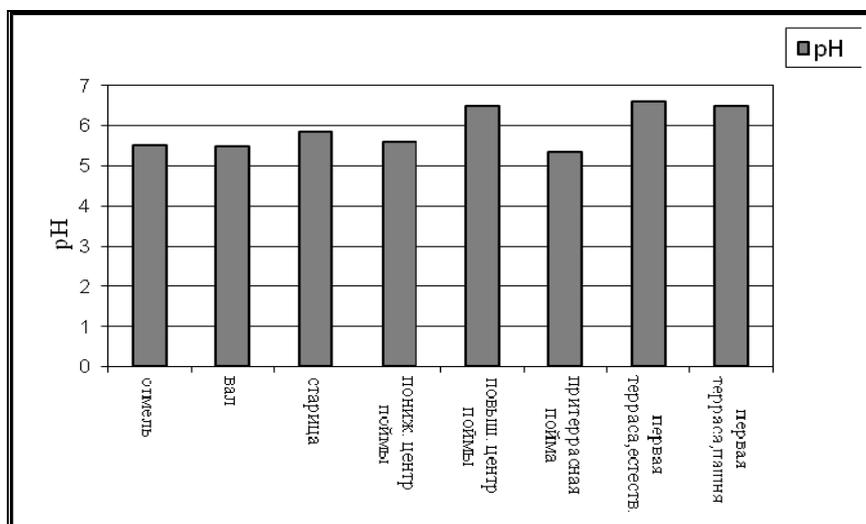


Рисунок 2 – Распределение обменной кислотности в пойме р. Сож

В сумму поглощённых оснований в обменной форме входят наиболее распространённые в почвах щелочные (K, Na) и щелочноземельные (Ca, Mg) химические элементы. Она изменяется от 3–7 Ммоль/100 г в почвах бедных органическим веществом и физической глиной в пределах прирусловой поймы до 40 Ммоль/100 г в торфяно-болотных почвах пониженных частей центральной и притеррасной поймы. Наиболее типичные для территории исследований аллювиально-дерново-глеевые супесчаные почвы характеризуются средними показателями суммы поглощённых оснований (18–26 Ммоль/100 г почвы) (рисунок 3).

Ёмкость катионного обмена почвы служит для оценки степени выраженности сорбционного барьера катионогенных элементов и определяется содержанием гуминовых кислот вместе с илистой фракцией в составе физической глины или гумуса. Величина ёмкости почвы в пойме имеет широкий интервал изменений: от низкой (2,95 Ммоль/100 г) на песчаных до высокой (41,57 Ммоль/100 г) на торфяных почвах (рисунок 3). Следовательно, степень насыщенности основаниями и ёмкость поглощения катионов возрастает с ростом количества органического вещества. Поэтому луговые травы накапливают наибольшее количество химических элементов в притеррасной и центральной пойме. Степень насыщенности почв основаниями, как производная величина Hr , S , T в целом в пойме р. Сож изменяется в пределах 79,1–94,1 %. Можно построить ряд по убыванию: первая надпойменная терраса (пашня) > притеррасная пойма > центральная пойма (повышенная > пониженная) > отмель > старица > вал.

Аллювиальные почвы характеризуются низким содержанием некоторых питательных элементов в обменных формах. По обеспеченности подвижными фосфатами все разновидности аллювиальных почв относятся к группе с очень слабой степенью обеспеченности.

Содержание обменного кальция в почвах поймы р. Сож варьирует в среднем от 300 до 3100 мг/кг. Кальций играет большую роль в закреплении гумусовых веществ, т. к. почвы, насыщенные им, имеют нейтральную реакцию, которая благоприятна для развития микроорганизмов. Здесь образуется нейтральный, или кальциевый барьер с накоплением кальция, железа. Построен следующий ряд по убыванию кальция: притеррасная пойма > центральная пойма (пониженная > повышенная) > первая надпойменная терраса (естественные уголья > пашня) > старица > вал > отмель.

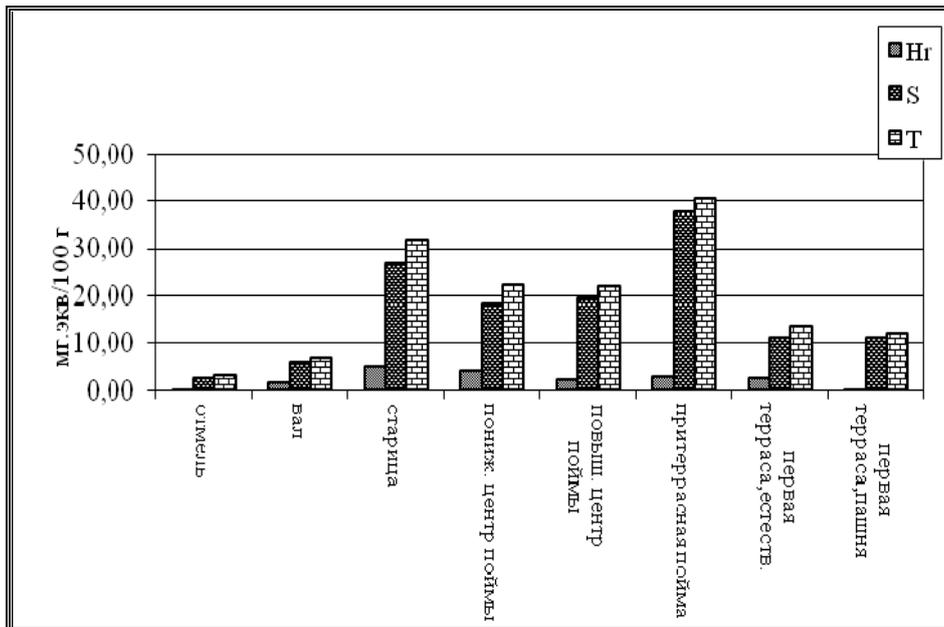


Рисунок 3 – Дифференциация гидролитической кислотности, суммы поглощённых оснований (S), ёмкости катионного обмена (Т) в пойме р. Сож

Кальций имеет большое значение в создании благоприятных для растений физических, физико-химических и физиологических свойств почвы. В почве кальций находится в кристаллической решётке минералов, в обменно-поглощённом состоянии и в форме простых солей (хлоридов, нитратов, карбонатов, сульфатов и фосфатов). В пойме р. Сож кальций занимает первое место среди поглощённых катионов. Довольно широко распространены малорастворимые соединения CaCO_3 , которые служат важнейшими источниками кальция для растений. Но при взаимодействии углекислого газа, растворённого в воде, карбонаты переходят в более растворимые бикарбонаты: $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ [10].

Поэтому максимальное накопление кальция в почве и травостое наблюдаются на притеррасной и центральной пойме и первой надпойменной террасе.

Магний – необходимый элемент для питания растений, так как он входит в состав хлорофилла. В почве Mg находится в кристаллической решётке минералов в обменно-поглощённом состоянии. Среди поглощённых катионов магний занимает второе место после кальция. Соли магния представлены в почвенном растворе как малорастворимые соединения. При взаимодействии углекислого газа, растворённого в воде карбонаты переходят в более растворимые бикарбонаты магния [11]: $\text{MgCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$.

Распределение магния в пойме несколько отличается от предыдущих элементов. Значения варьируют примерно от 30 до 340 мг/кг. Максимальная величина на заболоченных участках пониженной центральной поймы. Довольно высокие значения, около 250–270 мг/кг, характерны для первой надпойменной террасы. Минимальные значения на прирусловой пойме (вал > отмель) и старице (рисунок 4). Обменные катионы Mg^{2+} , в основном входящие в состав гидрослюдов, обладают способностью вступать в обмен с ионами ^{137}Cs и снижать их доступность растениям.

Содержание подвижного калия, K_2O , в пойменной экосистеме варьирует в среднем от 30 мг/кг на прирусловой отмели до 160 мг/кг на пониженных участках центральной поймы и 300 мг/кг на пашне первой надпойменной террасы (рисунок 4). Максимальные значения приурочены к первой надпойменной террасе (пашня > естественные угодья), понижениям центральной и притеррасной пойм, минимальные значения – на прирусловой пойме (вал > отмель) и повышениях центральной поймы. Основным источником калия для растений является подвижный K_2O . Его доступность тем больше, чем выше степень насыщенности им почв.

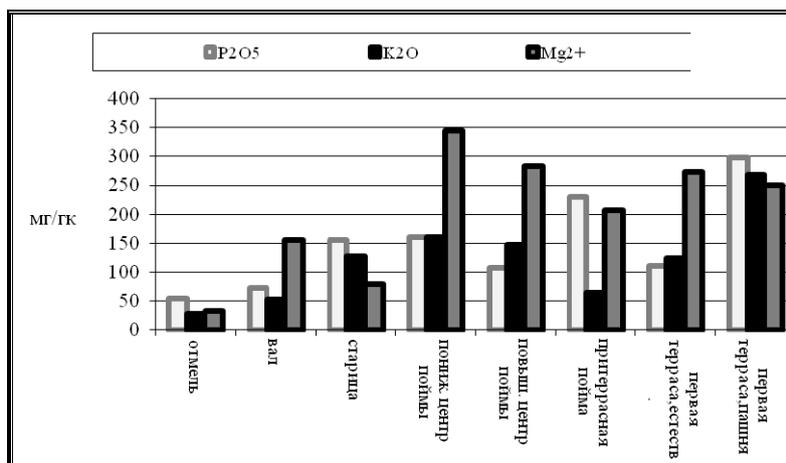


Рисунок 4 – Распределение подвижных P₂O₅ и K₂O и обменного Mg²⁺ в пойме р. Сож

Соединения фосфора мигрируют лишь в условиях сильнокислой и кислой реакции почв. Кислые почвы в пойме составляют одну треть, поэтому преобладающая площадь поймы содержит фосфаты преимущественно в осадённой форме, в составе которых могут быть сорбированы радионуклиды. Количество подвижного фосфора, P₂O₅, варьирует от 50 до 298 мг/кг (рисунок 4). По распределению P₂O₅ по профилю поймы выделяется следующий ряд по убыванию: первая надпойменная терраса (пахотные угодья) > притеррасная пойма > понижение центральной поймы > старица > первая надпойменная терраса (естественные угодья) > повышение центральной поймы > прирусловой вал > прирусловая отмель. Наиболее высоким содержанием фосфора характеризуется пашня первой надпойменной террасы.

На пойме высокое содержание P₂O₅ отмечено на пониженных частях рельефа (понижения центральной и притеррасной пойм и старица). Растения, по данным Кулаковской [11], используют четвертую-пятую часть подвижных фосфатов почвы, величина которых зависит от агрохимических свойств почв, и, прежде всего от степени их кислотности и наличия гумуса. Для фосфора это проявляется с наибольшей силой. При неблагоприятных условиях (лёгкий гранулометрический состав, кислая среда, малое количество гумуса, фосфаты образуют труднодоступные для растений соединения [12].

Различия химического состава травостоя связаны как с произрастанием на различных частях поймы (рисунок 5), так и с избирательной способностью растений. Избирательность поглощения выражается в том, что корни растений извлекают химические элементы не в тех соотношениях, в которых они содержатся в целом в почве. Многие растения могут характеризоваться как накопители тех или иных элементов.

Биологическое поглощение химических элементов. Установлено, что высоким суммарным биологическим поглощением химических элементов (N, K, Ca, P, Mg), характеризуется притеррасная пойма, старица и пониженные участки центральной поймы.

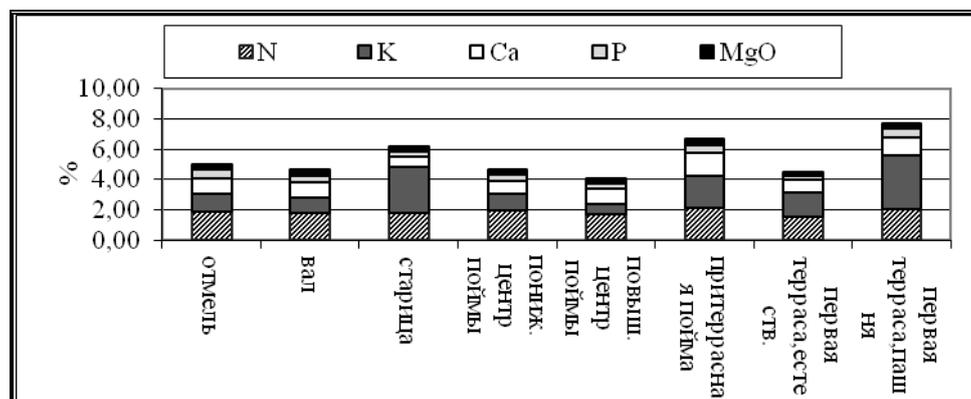


Рисунок 5 – Распределение химических элементов в наземном покрове экосистемы поймы р. Сож

Заключение. В работе дана оценка дифференциации основных биогеохимических и агрохимических показателей почвы для каждой фации пойменного ландшафта. Проанализировано содержание физической глины, органического вещества (гумуса, гумусовых кислот), обменная (рН) и гидролитическая кислотность (Нг), сумма поглощённых оснований (S), ёмкость поглощения катионов (Т), степень насыщенности основаниями (V), а также содержание подвижных форм Ca^{2+} , P_2O_5 , K_2O , Mg^{2+} в каждой части поймы. Дана оценка распределения химических элементов (N, K, Ca, P, Mg), в наземном покрове экосистемы поймы р. Сож.

Литература

1. Руева, М.Н. Река Сож / М.Н. Руева. – Гомель, 1985. – 115 с.
2. Шкляр, А.Х. Климатические ресурсы Белоруссии и их использование в сельском хозяйстве / А.Х. Шкляр. – Минск : Высшая школа, 1983. – 432 с.
3. Ландшафты чернобыльской зоны и их оценка по условиям миграции радионуклидов / Под общ. ред. А.М. Маринича. – Киев : Наукова думка, 1994. – 112 с.
4. Чертко, Н.К. Геохимия ландшафта / Н.К. Чертко, Н.В. Ковальчик, В.С. Хомич [и др.]. – М-во образования РБ ; изд-во БГУ, 2011. – 303 с.
5. Кузнецов, В.А. Радиогеохимия речных долин / В.А. Кузнецов. – Минск, 1997. – 332 с.
6. Вирченко, Е.П. Радионуклид-органические соединения в почвах зоны влияния Чернобыльской АЭС / Е.П. Вирченко, Г.И. Агапкина // Почвоведение. – 1993. – № 1. – С. 13–17.
7. География Гомельской области / Под ред. Г.Н. Каропы, В.Е. Пашука. – Гомель, 2000. – 201 с.
8. Йохансон, К.Й. Функции органического вещества, определяющие поведение радиоцезия в системе почва-растение / К.Й. Йохансон, М.И. Долгилевич [и др.]. // Вістник аграрної науки. – 1997. – № 3. – С. 52–54.
9. Кузнецов, В.А. О геохимической роли гумусовых кислот в миграции радиостронция и радиоцезия в речных долинах / В.А. Кузнецов, В.А. Генералова // Литосфера. – 2001. – № 1 (14). – С. 136.
10. Клебанович, Н.В. География почв Беларуси : учебное пособие / Н.В. Клебанович, Н.К. Чертко, Н.В. Ковальчик [и др.]. – Минск : БГУ, 2011. – 183 с.
11. Кулаковская, Т.Н. Влияние условий питания на химический состав растений / Т.Н. Кулаковская, Т.В. Позняк // Почвоведение и агрохимия : сб. науч. тр. / Белорус. науч.-исслед. ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск, 1975. – Вып. 12. – С. 111–120.
12. Кузнецов, В.А. Геохимия ландшафтов Припятского Полесья / В.А. Кузнецов, Н.Н. Петухова, М.П. Оношко [и др.]. – Минск : Институт геологических наук НАН Беларуси, 1997. – 240 с.

УДК 636.596:619:546.48:636.596

Экспериментальная оценка содержания цинка и меди в организме сизых голубей

Е.Г. ТЮЛЬКОВА

Исследуется влияние поступления свинца и кадмия в организм птиц с кормом в эксперименте на содержание цинка и меди, элементов, прямо или косвенно участвующих в процессах метаболизма и жизнедеятельности, в костях, печени, почках, мышцах, сердце, перьях и экскрементах сизых голубей (*Columba livia*), а также проводится сопоставление уровней содержания исследуемых элементов в тканях и органах свободноживущих диких птиц с показателями, полученными в эксперименте. Установлен достоверный рост концентрации цинка в органах и тканях во всех случаях, кроме костей, печени и старых перьев; меди – во всех случаях, кроме костей, перьев и печени при скармливании свинца. Сопоставление уровней содержания исследуемых элементов в тканях и органах свободноживущих диких птиц с показателями, полученными в эксперименте при скармливании свинца и кадмия, свидетельствует о более низких значениях экспериментальных данных.

Ключевые слова: цинк, медь, сизый голубь, организм.

The impact of lead and cadmium in the body of birds with feed in the experiment on the content of zinc and copper elements, directly or indirectly involved in metabolism and activity, in bones, a liver, kidneys, muscles, heart, feathers and excrement of blue rock pigeons (*Columba livia*) is examined. A comparison of the levels of the studied elements in tissues and organs of free wild birds to those obtained in the experiment is given. A significant increase in the concentration of zinc in tissues and organs in all cases except the bones, liver and old feathers; copper – in all cases, except for the bones, feathers and liver at lead receipt is stated. Comparison of the levels of the studied elements in tissues and organs of free wild birds to those obtained in the experiment when fed lead and cadmium, indicates lower values of the experimental data.

Keywords: zinc, copper, rock pigeon, body.

Введение. Для обоснования индикационных свойств органов и тканей птиц, обитающих в условиях полиметаллического воздействия среды обитания, актуальным и важным является исследование особенностей накопления тяжелых металлов в их организмах [2], [3], [5], [6], [7]. Однако большое значение имеет также изучение степени влияния токсикантов внешней среды на содержание элементов в организме птиц, обладающих важными физиологическими функциями. Так, изучение характера накопления меди в органах и тканях птиц имеет важное значение в связи с тем, что этот элемент относится к группе достаточно токсичных металлов и обладает способностью блокировать группы SH-белков, особенно ферментов, гепатотоксичностью, способностью повышать проницаемость мембран эритроцитов и митохондрий, поражать органы кроветворения [9]. Это особенно остро может проявляться при снижении защитных свойств организма в условиях повышения уровня токсической нагрузки на организм. Важное значение цинка для птиц заключается в том, что он является незаменимым микроэлементом, физиологическое действие которого осуществляется благодаря его связи с ферментными белками, непосредственным участием в обменных процессах, процессах роста и кальцификации костей.

Известно, что накопление тяжелых металлов в повышенных количествах может привести к негативным последствиям нарушения метаболизма или гибели птиц [1], [13], [14], оказывает влияние на содержание кальция, фосфора и цинка в костях [8], [11] и демонстрирует актуальность и необходимость контроля уровня содержания тяжелых металлов в среде обитания и организме птиц.

Материал и методы. С целью экспериментального установления закономерностей формирования концентраций цинка и меди в органах и тканях сизых голубей (популяции г. Минска, Республика Беларусь), искусственно задавались определенные уровни поступления в организм с кормом свинца и кадмия.

Выбор свинца и кадмия в качестве модельных тяжелых металлов обусловлен отсутствием их доказанной физиологической значимости в организме, высокой токсичностью (особенно кадмия), способностью в сравнительно малых количествах вызывать гибель или аномалии развития, в том числе и на эмбриональном уровне.

Всего было сформировано 10 групп сизых голубей: 1-я контрольная, 2 – 10-я опытные. Каждая группа состояла из 3 птиц.

Перед началом эксперимента были извлечены перья птиц: по 4 рулевых и по 2 маховых с каждой стороны. Во время эксперимента каждую птицу содержали отдельно. Свинец и кадмий вводили с хлебом в виде растворов солей $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Pb} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ и $\text{CdCl}_2 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$. Размеры скармливаемых доз элементов рассчитывались на элемент исходя из установленных в Республике Беларусь ветеринарно-санитарными нормами по безопасности кормов и кормовых добавок размеров предельно-допустимых концентраций (для свинца – 5 мг/кг корма, для кадмия – 0,4 мг/кг) с учетом средней массы корма, ежедневно съедаемого птицей. Таким образом, дозы свинца и кадмия (в мг соли) составили: 1 Pb – 0,32 мг соли, 5 Pb – 1,6 мг, 10 Pb – 3,2 мг, 20 Pb – 6,4 мг, 10 Cd – 0,28 мг, 20 Cd – 0,57 мг, 30 Cd – 0,84 мг. Выбор вводимой с кормом дозы кадмия в 10 – 30 ПДК обусловлен необходимостью сравнительного анализа уровней накопления свинца и кадмия в органах и тканях при более низком значении ПДК в корме для кадмия по сравнению со свинцом.

В состав кормовой смеси входили зерно злаковых культур, шрот подсолнечный, мука кормовая, мел, фосфат, премикс, соль, авизим.

Ежедневно осуществлялся сбор экскрементов.

Свинец и кадмий прекратили вводить в рацион в момент времени, когда на месте извлеченных перьев сформировались новые, которые также были извлечены. Кроме того, в конце эксперимента были извлечены также и старые перья птиц по такой же схеме, как и перья до начала эксперимента. По окончании введения свинца и кадмия птицы были усыплены, а их органы, ткани (печень, почки, сердце, мышечная и костная ткани), а также перья и экскременты подверглись исследованиям.

Анализ содержания цинка и меди в перечисленных органах, тканях и экскрементах сизых голубей проводились в химико-аналитической испытательной лаборатории Научно-практического центра НАН Беларуси по биоресурсам методом индуктивно сопряженной плазменной масс-спектрометрии и вычислялись как среднее арифметическое результатов 3-х параллельных определений в пределах отдельной дозы в каждом органе и ткани.

Подготовка проб осуществлялась методом мокрой минерализации в присутствии концентрированных соляной и серной кислот.

Количество цинка и меди на абсолютно сухую массу исследуемых тканей, органов определяли с учетом массовой доли влаги печени (74,1 %), почек (74,0 %), сердца (80,0 %), мышечной ткани (76,0 %), костной ткани (30,0 %), экскрементов (50,0 %), а также массы навесок исследованных органов и тканей, использованных в процессе подготовки проб. При обработке результатов по перьям их массовая доля влаги в расчетах не учитывалась вследствие малых величин.

Всего проанализировано 220 проб органов и тканей сизого голубя, 140 проб экскрементов. Обработка данных результатов исследований осуществлялась с использованием редактора Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение. Скармливание в эксперименте голубям доз свинца, кадмия или их смеси явилось причиной определенных изменений в характере содержания в организме цинка по сравнению с контрольной группой птиц (таблица 1).

Реакцией организма птиц явилось увеличение содержания цинка в почках, печени, скелетных мышцах, сердце и новых перьях. В костях экспериментальных птиц четкой закономерности не выявлено. В целом, в почках концентрация цинка была максимальной; в меньшем количестве накапливается цинк в перьях птиц, причем в новых – в большем количестве по сравнению со старыми (таблица 1).

Таблица 1 – Содержание цинка в тканях и внутренних органах сизых голубей при поступлении в организм свинца, кадмия и смеси свинца с кадмием

Количество доз свинца и кадмия	Содержание цинка, мкг/г сухого вещества						
	кости	почки	печень	мышцы	сердце	перья	
						новые	старые (после окончания опыта)
$\frac{1 Pb}{20 Pb}$	$\frac{19,874}{33,555}$	$\frac{27,154}{31,345}$	$\frac{20,297}{21,266}$	$\frac{23,406}{32,874}$	$\frac{20,388}{22,506}$	$\frac{2,327}{3,258}$	$\frac{2,337}{2,739}$
$\frac{10 Cd}{30 Cd}$	$\frac{14,574}{19,323}$	$\frac{30,657}{48,500}$	$\frac{20,555}{23,621}$	$\frac{17,935}{24,642}$	$\frac{20,460}{23,217}$	$\frac{2,655}{2,849}$	$\frac{1,599}{2,134}$
$\frac{10 Pb + 10 Cd}{20 Pb + 20 Cd}$	$\frac{16,407}{19,683}$	$\frac{39,114}{60,029}$	$\frac{20,604}{22,310}$	$\frac{21,286}{37,243}$	$\frac{22,347}{22,879}$	$\frac{2,484}{2,585}$	$\frac{2,067}{2,656}$
контроль	18,424	16,635	19,524	11,818	15,704	1,973	2,655

Примечание – В числителе представлены минимальные концентрации цинка, в знаменателе – максимальные

Скармливание в эксперименте голубям свинца и кадмия привело к некоторым изменениям в характере содержания в организме меди по сравнению с контрольной группой птиц (таблица 2).

Таблица 2 – Содержание меди в тканях и внутренних органах сизых голубей при поступлении в организм свинца, кадмия и смеси свинца с кадмием

Количество доз свинца и кадмия	Содержание меди, мкг/г сухого вещества						
	кости	почки	печень	мышцы	сердце	перья	
						новые	старые после окончания опыта
$\frac{1 Pb}{20 Pb}$	$\frac{2,075}{21,036}$	$\frac{18,781}{26,852}$	$\frac{16,786}{18,261}$	$\frac{24,033}{31,740}$	$\frac{17,152}{18,812}$	$\frac{2,272}{2,770}$	$\frac{1,327}{1,427}$
$\frac{10 Cd}{30 Cd}$	$\frac{8,432}{11,069}$	$\frac{26,332}{38,132}$	$\frac{18,533}{19,950}$	$\frac{18,108}{24,309}$	$\frac{15,940}{19,989}$	$\frac{2,227}{2,905}$	$\frac{0,649}{1,109}$
$\frac{10 Pb + 10 Cd}{20 Pb + 20 Cd}$	$\frac{12,273}{13,053}$	$\frac{27,826}{50,465}$	$\frac{18,239}{18,590}$	$\frac{15,895}{39,292}$	$\frac{15,048}{17,613}$	$\frac{2,181}{2,345}$	$\frac{0,636}{1,272}$
контроль	2,925	15,248	15,333	12,161	10,969	3,018	1,563

Примечание – В числителе представлены минимальные концентрации меди, в знаменателе – максимальные

Ответной реакцией организма сизых голубей на экспериментальное увеличение поступления в организм свинца и кадмия явилось снижение содержания меди в перьях и увеличение в сердце, печени, почках, скелетных мышцах и костях, что может неблагоприятно сказаться на функционировании всех систем организма птиц.

Максимальным накоплением меди в наших исследованиях характеризуются почки; несколько более низкое значение содержания меди отмечено в мышцах сизого голубя, а минимальное – в перьях.

Результаты анализа данных таблиц 1–2 и литературных данных свидетельствуют, что уровни содержания меди и цинка в тканях и органах свободноживущих диких птиц в большинстве случаев превышают показатели, полученные в эксперименте при скармливании свинца и кадмия [2], [3], [4], [5], [10], [12]. Возможно, это связано с тем, что имеющиеся данные характеризуют уровень загрязнения организма птиц, обитающих на территориях, подвергающихся более высокому антропогенному полиметаллическому воздействию.

Так, А.А. Сергеевым проводились исследования охотничьих птиц Кировской области, где отмечались превышения ПДК выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и поверхностные воды [5]; водоплавающая дичь и серая ворона в городских парках Москвы, также испытывающих антропогенную нагрузку, находились в центре внимания в работах В.М. Кирьякулова и Е.В. Родзина [2], [4]. В нашем эксперименте сизые голуби подвергались внешнему воздействию только свинца и кадмия, что, по-видимому, и обусловило получение более низких концентраций цинка и меди в органах и тканях.

Достоверность влияния свинца, кадмия и их смеси на содержание цинка и меди по сравнению с контрольной группой птиц оценивалась с помощью однофакторного дисперсионного анализа.

Сравнение значений F-критерия с $F_{\text{критич.}}$ ($F_{\text{критич.}}(6, 14) = 2,85$ по свинцу, $F_{\text{критич.}}(5, 12) = 3,11$ по кадмию при $p \leq 0,05$) свидетельствует о достоверном влиянии свинца, кадмия и их смеси на изменение концентрации цинка – во всех случаях, кроме костей, печени и старых перьев по сравнению с контролем; меди – во всех случаях, кроме костей, перьев и печени при скармливании свинца. Концентрации перечисленных металлов возрастали по сравнению с контролем. Сокращение содержания характерно для меди в перьях.

Наряду с проведением оценки содержания меди и цинка в пробах тканей и органов экспериментальных птиц нами осуществлялось определение содержания этих элементов в экскрементах. Полученные результаты отражены в таблице 3.

Таблица 3 – Содержание цинка и меди в экскрементах сизых голубей при поступлении в организм свинца, кадмия и смеси свинца с кадмием

Количество доз свинца и кадмия	Содержание тяжелых металлов, мкг/г сухого вещества	
	цинк	медь
$1 Pb$	45,098	66,501
$20 Pb$	48,489	91,065
$10 Cd$	43,782	66,052
$30 Cd$	44,888	67,686
$10 Pb + 10 Cd$	46,484	67,921
$20 Pb + 20 Cd$	47,484	89,521
контроль	34,014	109,282

Примечание – В числителе представлены минимальные концентрации цинка и меди, в знаменателе – максимальные

При скармливании в эксперименте голубям доз свинца, кадмия и их смеси были выявлены следующие тенденции изменения в характере содержания цинка и меди в экскрементах птиц. Содержание меди снижалось по сравнению с экскрементами контрольной группы птиц на 20,0–65,4 %. Для цинка наблюдается рост содержания на 28,7–42,6 % по отношению к контролю. Эти изменения связаны с биологической ролью изучаемых элементов, рассмотренной выше, и тенденциями их содержания в органах и тканях экспериментальных птиц. Как уже отмечалось, содержание меди в органах и тканях экспериментальных птиц увеличивалось во всех случаях, кроме костей, перьев и печени при скармливании свинца, что, возможно, повлияло на снижение выведения металла из организма сизых голубей по сравнению с контрольной группой. Подобная тенденция влечет негативные последствия для организма птиц вследствие токсичности меди, ее способности блокировать белковые группы ферментов и поражать органы кроветворения. Что касается цинка, то это – незаменимый элемент, физиологическое действие которого заключается в его связи с ферментными белками, участием в обменных процессах, процессах роста, и в этом случае нами не было получено закономерно ожидаемое значение снижения содержания цинка в экскрементах по отношению к контрольной группе сизых голубей по фоне его увеличения в сердце, мышцах, новых перьях и почках.

Достоверность влияния свинца, кадмия и их смеси на содержание цинка и меди в экскрементах по сравнению с контрольной группой птиц оценивалась с помощью однофакторного дисперсионного анализа.

Сравнение значений F-критерия с $F_{критич.}$ ($F_{критич.}(6, 56) = 2,27$ по свинцу, $F_{критич.}(5, 48) = 2,41$ по кадмию при $p \leq 0,05$) свидетельствует о достоверном влиянии свинца, кадмия и их смеси на изменение концентрации цинка в экскрементах и меди.

Таким образом, увеличение поступления в организм птиц свинца, кадмия и их смеси стимулирует рост концентрации цинка во всех случаях, кроме костей, печени и старых перьев; меди – во всех случаях, кроме костей, перьев и печени при скармливании свинца. Сокращение содержания характерно для меди в перьях. В экскрементах птиц отмечается снижение содержания меди по сравнению с контрольной группой и роста – для цинка.

Выводы. 1. Изучение возможного влияния экспериментального поступления свинца и кадмия в организм птиц с кормом на содержание цинка и меди, элементов, прямо или косвенно участвующих в процессах метаболизма и жизнедеятельности, позволяет выявить достоверный рост концентрации цинка во всех случаях, кроме костей, печени и старых перьев; меди – во всех случаях, кроме костей, перьев и печени при скармливании свинца. Тенденция снижения содержания отмечается для меди в перьях.

2. Сопоставление уровней содержания исследуемых элементов в тканях и органах свободноживущих диких птиц с показателями, полученными в эксперименте при скармливании свинца и кадмия, свидетельствует о более низких значениях экспериментальных данных. Возможно, это объясняется тем, что использованные в работе данные литературы характеризуют уровень загрязнения организма птиц, обитающих на территориях, подвергающихся более высокому уровню антропогенного полиметаллического воздействия. В нашем эксперименте сирые голуби подвергались внешнему воздействию только свинца и кадмия, что, по-видимому, и обусловило получение более низких концентраций цинка и меди в органах и тканях.

3. В результате скармливания в эксперименте голубям доз свинца, кадмия и их смеси содержание меди в экскрементах снижалось по сравнению с экскрементами контрольной группы птиц, для цинка наблюдался рост содержания по отношению к контролю.

В целом, рассмотренные в статье особенности свидетельствуют о влиянии экспериментального поступления свинца и кадмия в организм птиц с кормом на содержание других тяжелых металлов, что важно для оценки уровня загрязнения организма птиц и обоснования индикационных свойств их органов и тканей.

Литература

1. Зорина, Л.Г. Содержание тяжелых металлов в мягких тканях диких уток, обитающих в районах Приморского края // Исследование и конструирование ландшафтов Дальнего Востока и Сибири : сб. науч. работ / Под ред. С.С. Ганзея. – Владивосток : изд-во Тихоокеан. ин-та географии ДВО РАН, 2005. – С. 225–229, 338.
2. Кирьякулов, В.М. Последствия загрязнения свинцом и другими поллютантами среды обитания водоплавающей дичи : Автореф. дис. ... канд. биол. наук. : 03.00.16; 06.02.03 / В.М. Кирьякулов. – М., 2009. – 22 с.
3. Лебедева, Н.В. Экотоксикология и биогеохимия географических популяций птиц / Н.В. Лебедева. – М. : Наука, 1999. – 199 с.
4. Родзин, Е.В., Константинов, В.М., Федоровский, Н.Н. Эколого-токсикологический анализ тяжелых металлов в организме серой вороны в Люберецком районе Московской области // Врановые птицы в антропогенном ландшафте : межвузов. сб. науч. тр. / Под ред. А.С. Калитвина – Липецк : Изд-во Липец. гос. пед. ун-та. – 2001. – Вып. 4. – С. 104–107.
5. Сергеев, А.А. Тяжелые металлы в охотничьих птицах Кировской области (биологические, индикационные и санитарно-гигиенические аспекты) : дис. ... канд. биол. наук. : 06.02.03 / А.А. Сергеев. – Киров, 2003. – 183 с.
6. Способ определения содержания тяжелых металлов и эссенциальных элементов в теле водоплавающих птиц и водоемах [Электронный ресурс] : пат. РФ 2405142 С1, МПК G 01 N 33/12 / Е.В. Еськов, В.М. Кирьякулов ; заявитель ФГОУ ВПО «Рос. гос. аграр. заоч. ун-т». – № 2405142 ; завл. 24.07.09 ; опубл. 27.11.10 // . – Режим доступа : http://www.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?lockld. – Дата доступа : 05.07.2011.

7. Способ экологической оценки загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами [Электронный ресурс] : пат. РФ № 2266537 С2, МПК G 01 N 33/02, G 01 N 33/18, G 01 N 33/24 / С.Ф. Тютиков, В.В. Ермаков ; заявитель Ин-т геохимии и аналитич. химии им. В.И. Вернадского РАН. – № 2266537 ; завл. 10.07.05 ; опубл. 20.12.05. – Режим доступа : http://www.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?lockld. – Дата доступа : 07.07.2011.

8. Способ оценки загрязнения окружающей среды цинком [Электронный ресурс] : заявка РФ № 2000104691 А, МПК А 01 К 31/00, G 01 N 33/02 / И.В. Петухов, Е.С. Клепцына, А.И. Желтиков, Н.Н. Шипилин, В.Л. Петухов, С.Г. Куликова ; заявитель НИИ ветеринар. генетики и селекции. – № 2000104691 ; завл. 25.02.00 ; опубл. 20.12.01. – Режим доступа : http://www.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?lockld. – Дата доступа : 07.07.2011.

9. Филов, В.А., Калтович, С.П., Некрашевич, М.В. Вредные вещества в окружающей среде. Элементы I – IV групп периодической системы и их неорганические соединения / В.А. Филов, С.П. Калтович, М.В. Некрашевич. – СПб. : Професионал, 2005. – 462 с.

10. Eeden, P. Metal concentrations in selected organs and tissues of five Red-knobbed Coot (*Fulica cristata*) populations / P. Eeden // *Water SA*. – 2003. – Vol. 29. – P. 313–322.

11. Larison, J. Effects of cadmium on white-tailed ptarmigan in Colorado [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://fs.ogm.utah.gov/pub/mines/arm_related. – Дата доступа : 12.04.2012.

12. Mariko, M., Sasaki, R., Yuko, Y. The distribution of molybdenum in the tissues of wild ducks / M. Mariko, R. Sasaki, Y. Yuko // *Environ. Monit and Assess.* – 2002. – Vol. 77. – P. 155–161.

13. Norbert, K. Lead poisoning and heavy metal exposure of golden eagles (*Aquila chrysaetos*) from the European Alps / K. Norbert // *J. Ornithol.* – 2007. – Vol. 148. – P. 173–177.

14. Raquel, B., Jovani, R., Forero, M. Relationship between T-cell-mediated immune response and Pb, Zn, Cu, Cd, and As concentrations in blood of nestling white storks (*Ciconia ciconia*) and black kites (*Milvus migrans*) from Dobnana (Southwestern Spain) after the Aznalcollar toxic spill / B. Raquel, R. Jovani, M. Forero // *Environ. Toxicol and Chem.* – 2006. – Vol. 25. – P. 1153–1159.

Цианобактериальный комплекс низкопродуктивных земель, переданных под лесные культуры

О.М. ХРАМЧЕНКОВА, Ю.М. БАЧУРА

В работе представлены результаты определения видового состава и анализа структуры сообществ почвенных цианобактерий низкобалльных земель сельскохозяйственного назначения, переданных под лесные культуры. Показано обеднение цианосообществ по мере развития лесных культур и исчезновение из их состава азотфиксирующих представителей на стадии насаждения I класса возраста.

Ключевые слова: цианобактерии, низкобалльные земли, лесные культуры.

Twenty-five species of soil cyanobacteria were found on the territories that have been transferred from agriculture to the forest management. The depletion of cyanogroups with the development of forest cultures and the extinction from their structure of nitrogen-fixing species at the stage of planting 1 age class is shown.

Keywords: cyanobacteria, barren soil, forest culture.

Введение. В состав земель лесного фонда входят земли, предназначенные для нужд лесного хозяйства и находящиеся в пользовании лесохозяйственных предприятий, организаций и учреждений. За последние годы в структуре земельного фонда Беларуси по видам земель произошли существенные изменения. Наблюдалась устойчивая тенденция к сокращению сельскохозяйственных земель и увеличению земель под лесами и древесно-кустарниковой растительностью. Основные причины перераспределения земель связаны с реализацией комплекса мероприятий по оптимизации структуры использования земель, составной частью которой явился вывод из оборота малопродуктивных, зарастающих и заболочиваемых сельскохозяйственных земель и передача их в другие виды земель, в значительной степени – в земли лесного фонда [1].

Основным показателем кадастровой оценки земель является балл плодородия почв, который устанавливается на основании почвенных характеристик по шкале оценочных баллов. В Беларуси оценка плодородия пахотных земель составляет 31,2 балла, улучшенных луговых земель – 26,8, естественных луговых – 15,2 и в целом всех сельскохозяйственных земель – 28,9 балла [2]. Наиболее высокий балл плодородия почв среди областей республики имеют земли Гродненской области (31,6 %). Сельскохозяйственные земли Минской области оценены в 30,4 балла, Брестской в 29,5, Могилевской в 28,8 и Гомельской – в 27,5 балла. Самый низкий балл имеют сельскохозяйственные земли Витебской области (25,8). Самую высокую оценку среди районов получили сельскохозяйственные земли Несвижского района – 40,7 балла, самую низкую – Городокского – 19,6 балла [3].

Являясь космополитами, цианобактерии заселяют практически любые наземные биотопы, в том числе – низкопродуктивные почвы. Развитие микроорганизмов в таких почвах подчиняется воздействию специфического комплекса природных факторов, характерного для данной почвенной разности и конкретных условий существования. В результате формируются цианоценозы, обладающие рядом характерных признаков. При изучении почвенных водорослей Гомельского региона авторами был определен видовой состав и показан вклад цианобактерий (ранее называемых синезелеными водорослями) в структуру альгосообществ городских и пригородных почв, испытывающих антропогенные нагрузки различной природы и интенсивности [4]–[9].

Имеются многочисленные данные о влиянии антропогенных факторов на почвенные цианобактерии. Показано, что в условиях полива усиленно развиваются азотфиксирующие *Tolypothrix* и *Nostoc* [10]. На вырубках разрастаются колонии *Phormidium* (Р-форма), к концу второго года после рубки отмечен значительный рост *Nostoc* и *Cylindrospermum* (С-форма). Найденные на вырубке виды относятся в основном к группе азотфиксаторов [11]. На лесных пожа-

рицах водоросли и цианеи являются пионерами наряду с протонемами мхов [12], [13]. Способность почвенных водорослей сохраняться при действии высоких температур обнаружена при изучении заселения вулканических пеплов, в частности на месте засыпанных ими лесов [14].

Почвенные цианобактерии низкопродуктивных сельскохозяйственных земель, переданных в лесной фонд, эпизодически описаны в мировой литературе и никогда не изучались в Республике Беларусь.

Целью настоящего исследования было изучение видового состава и структуры сообществ почвенных цианобактерий низкобалльных земель сельскохозяйственного назначения, переданных под лесные культуры.

Методика исследования. Пробы почвы отбирали на территории Долголесского лесничества ГЛХУ «Гомельский лесхоз», на основании данных, любезно предоставленных РДЛУП «Гомельлеспроект». Была собрана информация о землях, выведенных из сельскохозяйственного производства по показателю продуктивности и поступивших в лесной фонд Гомельского ГПЛХО в 2002–2013 гг. Для исследования выбрали 3 участка, отличавшихся по покрытости лесными культурами: непокрытые лесом земли, несомкнувшиеся лесные культуры и собственно насаждения I класса возраста:

- 1 непокрытые лесом земли, 215 кв., 8 выд., ТЛУ В₃ (Нп¹);
- 2 лесные культуры, 50 кв., 49 выд., 7СЗЛ, ТЛУ А₂ (Нлк);
- 3 насаждения, 68 кв. 25 выд., 8Б2Ос, ТЛУ С₄ (Нас).

Пробы почвы отбирали по стандартной методике на глубину 5 см в стерильные пакеты. После высушивания почвы в темном месте до воздушно-сухого состояния определяли видовой состав цианобактерий методами чашечных культур со «стеклами обрастания» и агаровых культур [15].

Цианобактерии идентифицировали с помощью микроскопа Nikon Eclipse 80i, используя размерно-морфологические показатели клеток, трихомов, колоний. При необходимости проводили цитохимические реакции: на крахмал – с реактивом Люголя, на выявление общих очертаний слизи – с 1 % раствором туши, на структуру слизи – с 0,1 % раствором метиленового синего [16].

Номенклатура и классификация таксонов *Cyanobacteria* приведена по J. Komárek, K. Anagnostidis [17]–[19], состав жизненных форм – в соответствии с классификацией Э.А. Штины и М.М. Голлербаха [10], учет степени обилия на стеклах обрастания – по шкале Р.Р. Кабирова [20].

Результаты исследования. На выбранных участках было выявлено 25 видов почвенных цианобактерий, относящихся к 15 родам, 7 семействам, 3 порядкам класса *Cyanophyceae*. Наиболее широко были представлены порядки *Oscillatoriales* – 11 видов (44,0 %) и *Nostocales* – 10 видов (40,0 %). Порядок *Croococcales* насчитывал 4 вида (16,0 %). Наибольшее видовое богатство было отмечено для семейств *Nostocaceae* и *Phormidiaceae* (10 и 5 видов соответственно). Род *Phormidium* был представлен 4 видами, *Leptolyngbya*, *Cylindrospermum* и *Nostoc* – 3.

Ниже приводится таксономический список почвенных цианобактерий с указанием места обнаружения представителей, фотографии (рисунок 1) и характеристика отдельных представителей (Таблица 1).

- Надцарство PROKARYOTA
- Царство EUBACTERIA
- Подцарство NEGIBACTERIA
- Отдел CYANOBACTERIA (CYANOPHYTA)
- Класс CYANOPHYCEAE
- Порядок CHROOCOCCALES
- Семейство Synechococcaceae**
- 1. *Cyanothece aeruginosa* (Nägeli) Komárek (Нлк)

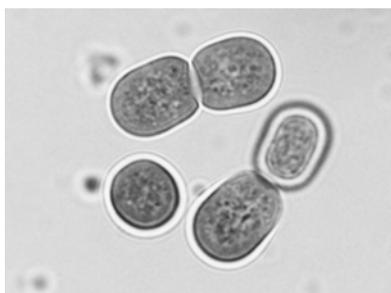
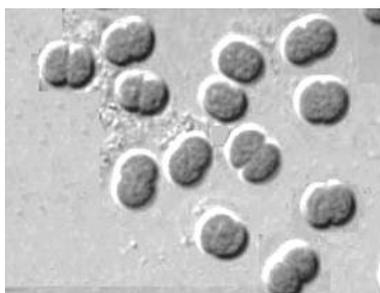
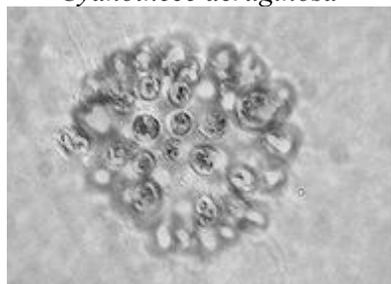
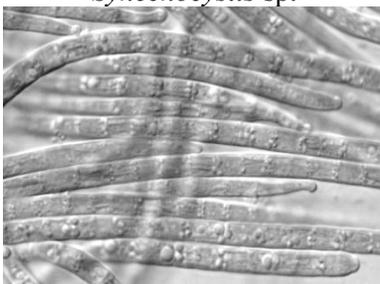
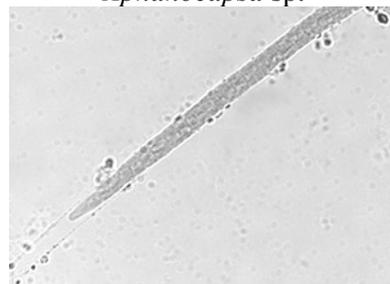
¹ В скобках приведены условные обозначения участков исследования, используемые далее в тексте и иллюстрациях.

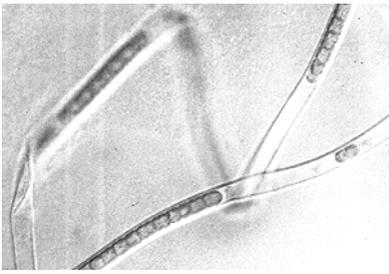
Семейство Merismopediaceae2. *Synechocystis* sp. (Нлк)3. *Aphanocapsa* sp. (Нп, Нлк)**Семейство Microcystaceae**4. *Microcystis* sp. (Нп, Нлк, Нас)

Порядок OSCILLATORIALES

Семейство Phormidiaceae5. *Phormidium autumnale* (Agardh) Gomont (Нп, Нлк)6. *Phormidium dimorphum* Lemmermann (Нлк)7. *Phormidium molle* (Kützing) Gomont (Нп, Нлк)8. *Phormidium* sp. (Нп)9. *Microcoleus vaginatus* (Vaucher) Gomont (Нлк)**Семейство Oscillatoriaceae**10. *Oscillatoria* sp. (Нлк)11. *Lyngbya* sp. (Нлк)12. *Plectonema* sp. (Нп)**Семейство Pseudanabaenaceae**13. *Leptolyngbya foveolaria* (Rabenhorst ex Gomont) Anagnostidis et Komárek (Нп, Нлк, Нас)14. *Leptolyngbya tenuis* (Gomont) Anagnostidis et Komárek (Нлк)15. *Leptolyngbya henningsii* Lemmermann (Нлк)

Порядок NOSTOCALES

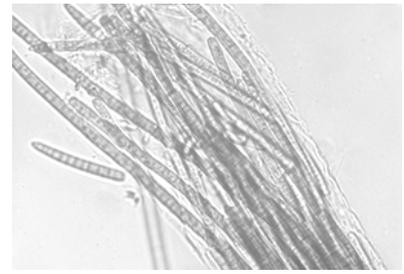
Семейство Nostocaceae16. *Anabaena cylindrica* Lemmermann (Нп)17. *Anabaena* sp. (Нп, Нлк)18. *Trichromus variabilis* (Kützing ex Bornet et Flahault) Komárek et Anagnostidis (Нп)19. *Cylindrospermum majus* Kützing (Нлк)20. *Cylindrospermum muscicola* Kützing (Нп)21. *Cylindrospermum* sp. (Нп)22. *Nodularia harveyana* (Thwaites) Thuret (Нп)23. *Nostoc punctiforme* (Kützing) Hariot ((Нлк)24. *Nostoc* cf. *microscopicum* Carmichael sensu Elenkin (Нп, Нлк)25. *Nostoc* sp. (Нп, Нлк)*Cyanothece aeruginosa**Synechocystis* sp.*Aphanocapsa* sp.*Microcystis* sp.*Phormidium autumnale**Phormidium dimorphum*



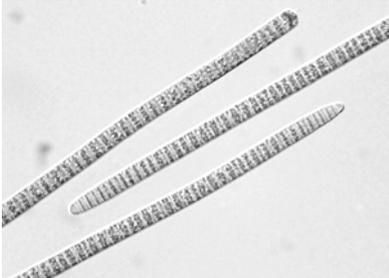
Phormidium molle



Phormidium sp.



Microcoleus vaginatus



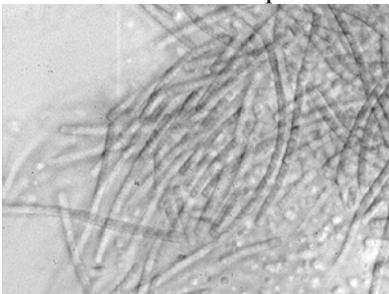
Oscillatoria sp.



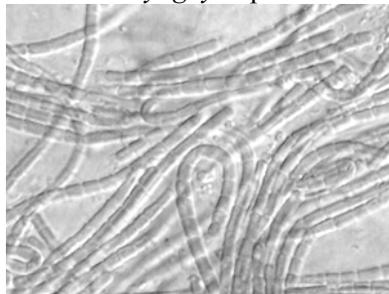
Lyngbya sp.



Plectonema sp.



Leptolyngbya foveolaria



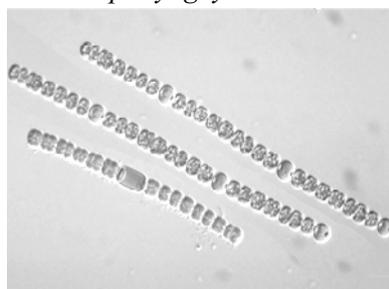
Leptolyngbya tenuis



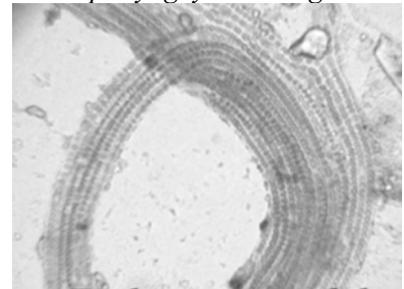
Leptolyngbya henningsii



Anabaena cylindrica



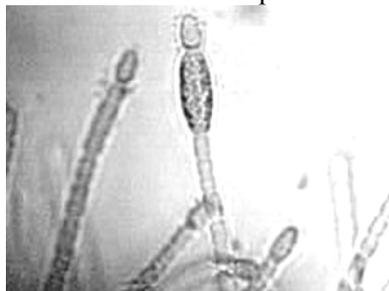
Anabaena sp.



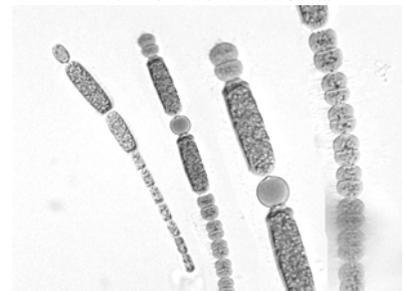
Trichromus variabilis



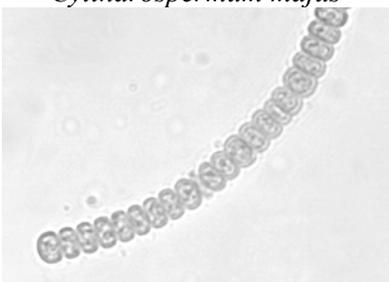
Cyndrospermum majus



Cyndrospermum muscicola



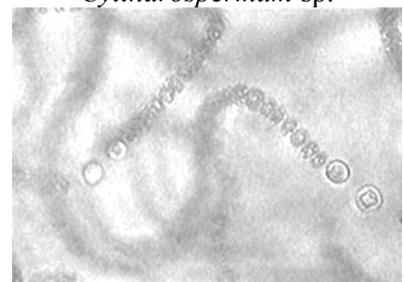
Cyndrospermum sp.



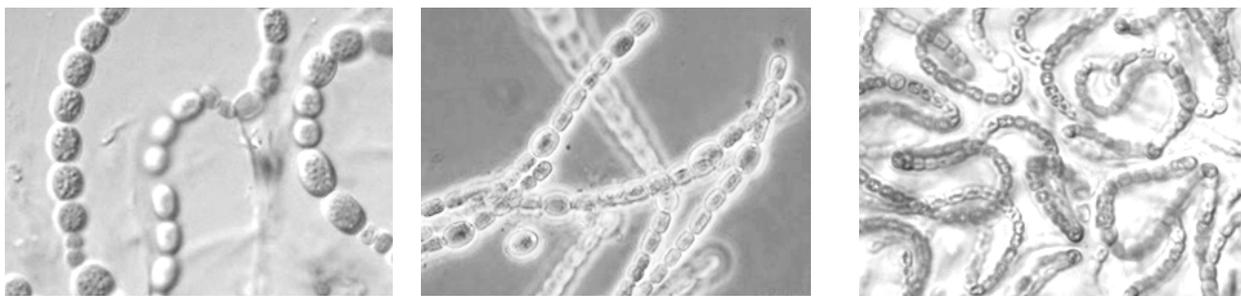
Nodularia harveyana



Nostoc punctiforme



Nostoc cf. microscopicum



Nostoc sp.

Рисунок 1 – Цианобактерии низкопродуктивных сельскохозяйственных земель, переданных под лесные культуры

Таблица 1 – Характеристика цианобактерий низкопродуктивных земель, переданных под лесные культуры [16]–[19], [21], [22]

Представитель 1	Характеристика 2
<i>Cyanothece aeruginosa</i>	Пигменты фотосинтеза: хлорофилл <i>a</i> , каротины, фикоцианин, аллофикоцианин, фикоэритрин. Запасные вещества – гликоген, протеины. Питание автотрофное. Размножение делением клеток, спорами, гормогониями. Обнаружена способность к фиксации N ₂ .
<i>Synechocystis</i> sp.	Клетки шаровидные, мелкие, с тонкой оболочкой, одиночные, от бледных до ярких сине-зеленых, иногда желтоватые или зеленоватые. Некоторые виды принимают участие в образовании сапропеля. Хорошо выражены циркадные ритмы.
<i>Aphanocapsa</i> sp.	Образуют ценобии из большого числа клеток. Размножение происходит путем деления клеток пополам. При этом рост дочерних клеток не происходит до нормальной величины материнской клетки.
<i>Microcystis</i> sp.	Колонии сферической или неправильной формы, шаровидные клетки погружены в слизь, могут делиться в любых направлениях. Клетки многих видов содержат газовые вакуоли. Колонии различных форм: бесформенные, вытянутые, шаровидные и эллипсоидные. Размеры клеток 2–6 мкм, колоний – до 1 мм.
<i>Phormidium</i> sp.	20 видов. Структура таллома – нитчатая, многоклеточная. Прикрепленные; не прикрепленные; не ветвящиеся. Прикрепление нижней частью трихома. Образуют колонии. Имеются трихомы прямые; изогнутые; искривленные; извилистые. Форма клеток цилиндрическая; дисковидная. Гетероцист и спор нет. Слизистое влагище тонкое; плотное; слизистое. Пигменты фотосинтеза: хлорофилл <i>a</i> , каротины, фикоэритрин, фикоцианин, аллофикоцианин. Запасные вещества гликоген, протеины. Размножение делением клеток; гормогониями.
<i>Microcoleus vaginatus</i>	Структура таллома – нитчатая, многоклеточная. Прикрепление нижней частью трихома. Колоний не образуют. Форма клеток цилиндрическая.
	Гетероцист и спор нет. Слизистое влагище крепкое, бесцветное. Пигменты фотосинтеза: хлорофилл <i>a</i> , каротины, фикоэритрин, фикоцианин, аллофикоцианин. Запасные вещества гликоген, протеины. Размножение делением клеток; гормогониями.
<i>Oscillatoria</i> sp.	75 видов. Структура таллома – нитчатая. Прикрепление слизью; поверхностью трихомов. Форма клеток цилиндрическая; дисковидная; квадратная. Гетероцист нет. Пигменты фотосинтеза: хлорофилл <i>a</i> , каротины, фикоцианин, аллофикоцианин, фикоэритрин. Запасные вещества гликоген, протеины. Размножение спорами, гормогониями.
<i>Lyngbya</i> sp.	25 видов. Структура таллома – нитчатая. Трихомы прямые; изогнутые; спиралевидные; длинные. Форма клеток цилиндрическая; дисковидная. Гетероцист нет. Слизистое влагище широкое; плотное; гладкое; снаружи шероховатое. Пигменты фотосинтеза: хлорофилл <i>a</i> , каротины, фикоцианин, аллофикоцианин, фикоэритрин. Запасные вещества гликоген, протеины. Размножение делением клеток, спорами, гормогониями.
<i>Plectonema</i> sp.	Структура таллома – нитчатая. Прикрепленные, дерновинок и колоний не образует. Трихомы не перешнурованные, бледно-сине-зеленые. Клеточная мембрана четырехслойная, один слой из муреина. Форма клеток прямоугольная, гетероцист нет. Спор не образует. Слизистое влагище тонкое, бесцветное. Пигменты фотосинтеза: хлорофилл <i>a</i> , каротины, фикоцианин, аллофикоцианин, фикоэритрин. Запасные вещества гликоген, протеины. Размножение делением клеток, спорами, гормогониями.
<i>Leptolyngbya</i> sp.	Нитевидные, образуют дерновины (иногда до макроскопических и несколько см в диаметре). Слизистый чехол прилегает к трихомам. Трихомы тонкие, цилиндрические, с округлыми или коническими клетками на концах. Клетки цилиндрические. Гетероцисты и акинеты отсутствуют.

Окончание таблицы 1

<i>Anabaena</i> sp.	Никогда не образуются студенистые колонии. Нити с влагалищем или без него, соединенные в бесформенные дерновинки или одиночные. Интеркалярное расположение гетероцист, образование спор. Форма спор, гетероцист и вегетативных клеток колеблется в широких пределах. Наличие газовых вакуолей у некоторых видов постоянное, но в конце вегетационного периода они могут и исчезнуть. Способны к самостоятельной азотфиксации в размерах, имеющих реальное значение для плодородия почвы.
<i>Cylindrospermum</i> sp.	Расположение гетероцист – по обоим концам трихомов, споры возникают рядом с гетероцистой. Способны к самостоятельной азотфиксации в размерах, имеющих реальное значение для плодородия почвы.
<i>Cylindrospermum majus</i> <i>Cylindrospermum muscicola</i>	Нитчатая цианобактерия, тонкая или компактная, со слизистым покрытием, слегка кривая или несимметрично скрученная, цилиндрическая или слегка суженная. Клетки цилиндрические, хроматоплазма светло или ярко голубовато-зеленая. Гетероциста яйцевидная, овальная или коническая. Предпочитают слабое освещение. Способны к самостоятельной азотфиксации в размерах, имеющих реальное значение для плодородия почвы.
<i>Nodularia harveyana</i>	Нитчатые, нити одиночные или собраны в группы. Размножаются гормогониями, фрагментами нитей или акинетами. Способны к фиксации атмосферного азота.
<i>Nostoc</i> sp.	Трихомы всегда однорядные, всегда с гетероцистами и часто со спорами, не ветвящиеся или ветвящиеся ложно. Размножаются с помощью гормогониев или спор. Исключительно колониальные организмы, с хорошо развитой слизью, влияющей на форму колоний. Клетки нитей все время делятся пополам, удлиняя цепочки и давая время от времени промежуточные (пограничные) клетки. При наступлении неблагоприятных внешних условий слизь засыхает в виде своеобразного футляра, а клетки внутри него остаются долгое время жизнеспособными и при возвращении к нормальным условиям продолжают свою обычную жизнь. Способны к самостоятельной азотфиксации.
<i>Nostoc punctiforme</i> , <i>Nostoc microscopicum</i>	Структура таллома – нитчатая. Прикрепленные, тип прикрепления – слизью. Образуют шаровидные или овальные колонии. Тесно переплетающиеся трихомы синезеленого цвета. Клетки бочковидные. Гетероцисты шаровидные (эллипсоидные), терминальные. Споры шаровидные (эллипсоидные) с гладкой, бесцветной оболочкой. Слизистой оболочки нет. Слизистое влагалище узкое, бесцветное. Пигменты фотосинтеза: хлорофилл <i>a</i> , каротины, фикоэритрин, фикоцианин, аллофикоцианин. Запасные вещества гликоген, протеины. Размножение делением клеток, спорами, гормогониями. Способны к самостоятельной азотфиксации.

Около 40 % обнаруженных цианобактерий способны к фиксации атмосферного азота, 72 % – слизиобразователи, влияющие на структуру почвенной среды.

Состав почвенных цианобактерий исследованных участков отличался. В почве прогадины (непокрытые лесом земли) Цианобактерия составляли 29,4 % всех видов. Наиболее активно в культурах вегетировали виды родов *Anabaena*, *Phormidium* и *Leptolyngbya*. Под несомкнувшимися лесными культурами цианеи формировали 39,1 % альгофлоры. Наиболее обильны были виды родов *Phormidium*, *Leptolyngbya*². Доля цианобактерий в альгосообществах почв насаждений не превышала 6,3 %, степень обилия была невысокой.

В зависимости от условий произрастания на участках исследования изменялся состав жизненных форм цианобактерий (рисунок 2).

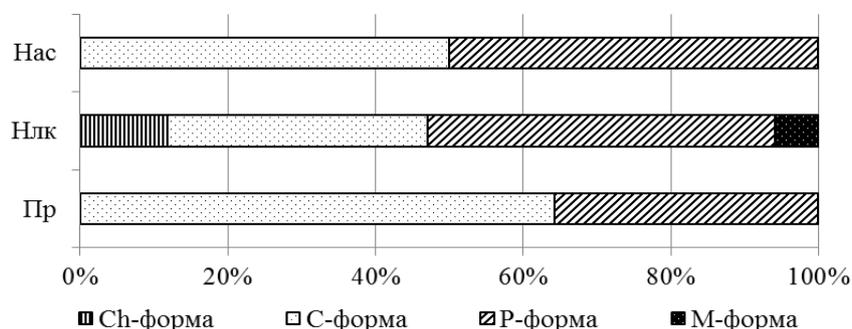


Рисунок 2 – Экологическая структура группировок цианобактерий на различных стадиях лесовосстановления

² Порядок приведения названия родов соответствует убыванию степени обилия видов в культурах.

Условия жизни в почвах не покрытых лесом земель и насаждений обедняют цианогруппировки, и только в почвах несомкнувшихся лесных культур состав жизненных форм свидетельствует о наличии достаточно хороших условий для развития цианей.

Важными свойствами почвенных цианогруппировок являются количество видов, фиксирующих атмосферный азот, и количество слизиобразователей, влияющих на структурированность почв (рисунок 3).

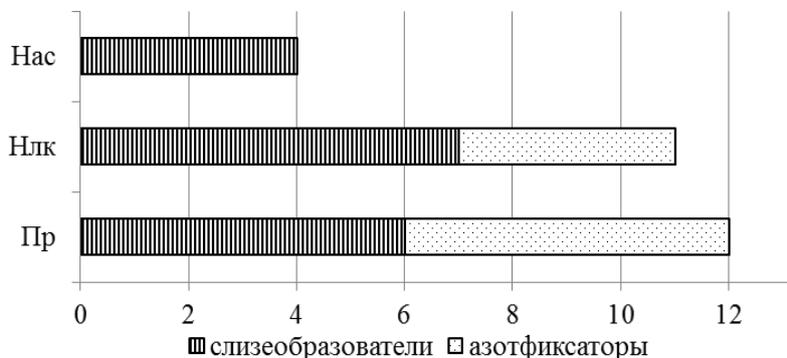


Рисунок 3 – Вклад слизиобразователей и азотфиксаторов в структуру цианогруппировок на различных стадиях лесовосстановления

По мере развития лесных культур на низкобалльных землях, выведенных из сельскохозяйственного производства, численность азотфиксирующих почвенных цианей резко снижается.

Заключение. Определен видовой состав и описана структура сообществ почвенных цианобактерий низкобалльных земель сельскохозяйственного назначения, переданных под лесные культуры. Показано обеднение цианосообществ по мере развития лесных культур и исчезновение из их состава азотфиксирующих представителей на стадии насаждения I класса возраста.

Литература

- 1 Кадастровая оценка сельскохозяйственных земель сельскохозяйственных организаций и крестьянских (фермерских) хозяйств. Содержание и технология работ (Технический кодекс установившейся практики) / ТКП 302-2011 (03150). – Минск : Госкомимущество, 2011. – 137 с.
- 2 Мониторинг и использование земельных ресурсов : учебное пособие / С.Е. Головатый, С.В. Савченко, С.С. Позняк, О.В. Чистик. – Минск : МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2009. – 149 с.
- 3 Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь. – Минск : Институт почвоведения и агрохимии НАН Беларуси, 2006. – 288 с.
- 4 Бачура, Ю.М. Особенности восстановления альгогруппировок почв на кострищах / Ю.М. Бачура // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2008. – № 5 (50), Ч. 2. – С. 153–160.
- 5 Храмченкова, О.М. Особенности заселения почвенными водорослями отвалов фосфогипса / Ю.М. Бачура, О.М. Храмченкова, А.Г. Цуриков // Наука и инновации. – 2009. – № 11 (81). – С. 39–43.
- 6 Храмченкова, О.М. Почвенные водоросли некоторых антропогенно-нарушенных территорий / Ю.М. Бачура, О.М. Храмченкова // Экологический вестник. – 2010. – № 4 (14). – С. 21–28.
- 7 Храмченкова, О.М. Водоросли почв полигона твердых бытовых отходов и некоторых улиц г. Гомеля / Ю.М. Бачура, О.М. Храмченкова // Веснік Мазырскага дзяржаўнага педагагічнага ўніверсітэта імя І.П. Шамякіна. – 2011. – № 3 (32). – С. 3–9.
- 8 Храмченкова, О.М. Почвенные водоросли некоторых сосняков юго-восточной Беларуси / Ю.М. Бачура, О.М. Храмченкова : сб. науч. тр. ИЛ НАН Беларуси / Ин-т леса НАН Беларуси. – Гомель, 2012. – Вып. 72 : Проблемы лесоведения и лесоводства. – С. 517–526.
- 9 Храмченкова, О.М. Почвенные водоросли деградированных торфяников Гомельского района / Ю.М. Бачура, О.М. Храмченкова // Экологический вестник. – 2013. – № 4(26). – С.117–121.
- 10 Штина, Э.А. Экология почвенных водорослей / Э.А. Штина, М.М. Голлербах. – М. : Наука, 1976. – 143 с.
- 11 Алексахина, Т.И. Почвенные водоросли лесных биогеоценозов / Т.И. Алексахина, Э.А. Штина. – М. : Наука, 1984. – 149 с.

- 12 Штина, Э.А. Альгологический мониторинг почв / Э.А. Штина, Г.М. Зенова, Н.А. Манучарова // Почвоведение. – 1998. – № 12. – С. 1449–1461.
- 13 Штина, Э.А. Реакция почвенных водорослей на антропогенные воздействия / Э.А. Штина, К.А. Некрасова // Проблемы антропогенного воздействия на окружающую среду : сб науч. тр. / Моск. гос. ун-т ; отв. ред. Н.И. Пьявченко. – М. : Наука, 1985. – С. 56–62.
- 14 Штина, Э.А. Заселение водорослями вулканических субстратов / Э.А. Штина, В.М. Андреева, Т.И. Кузьякина // Ботанический журнал. – 1990. – № 8. – С. 33–42.
- 15 Гайсина, Л.А., Фазлутдинова, А.И., Кабиров, Р.Р. Современные методы выделения и культивирования водорослей : учебное пособие [Текст] / Л.А. Гайсина, А.И. Фазлутдинова, Р.Р. Кабиров – Уфа : Изд-во БГПУ, 2008. – 152 с.
- 16 Водорості ґрунтів України (історія та методи дослідження, система, конспект флори) / редкол. : І.Ю. Костіков [та інш.]. – Київ : Фітосоціоцентр, 2001. – 300 с.
- 17 Komarek, J. Cyanoprokaryota. Teil : Chroococcales / J. Komarek, K. Anagnostidis. – Heidelberg-Berlin : Spektrum Akademischer Verlag, 2000. – 551 p.
- 18 Komarek, J. Cyanoprokaryota. Teil : Oscillatoriales / J. Komarek, K. Anagnostidis. – Munchen : Spektrum Akademischer Verlag is an imprint of Elsevier GmbH, 2005. – 759 p.
- 19 The on-line database of cyanobacterial genera [Electronic resource] / ed. Jiří Komárek, Tomáš Hauer. – Mode of access : <http://www.cyanodb.cz> – Date of access : 25.11.2013.
- 20 Кабиров, Р.Р. Выделение почвенных альгоценозов методом Браун-Бланке / Р.Р. Кабиров, Н.В. Суханова, Л.С. Хайбуллина ; Башк. гос. пед. ун-т. – Уфа, 1999. – 35 с. – Деп. в ВИНТИ 31.03.99, №1014-В99 // РЖ : 04. Биология. Сводный том. – 1999. – № 11. – 04В2.78ДЕП. – С. 7.
- 21 Database of information on algae that includes terrestrial, marine and freshwater organisms [Electronic resource] / ed. M.D. Guiry. –1996–2013. – Mode of access : <http://www.algaebase.org>. – Date of access : 15.09.2011.
22. Водоросли. Справочник / С.П. Вассер [и др.] ; под общей ред. С.П. Вассера. – Киев : Наук. думка, 1989. – 608 с.

УДК 661.7:547.963.2

Ферментативный способ получения казеина с использованием культуры дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*

Е.А. ЦВЕТКОВА¹, И.Ю. УХАРЦЕВА², Т.В. АРАСТОВИЧ¹

В работе представлен ферментативный способ синтеза протеинов из композиций, содержащих микроорганизмы, в частности способ получения казеина с использованием культуры дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*.

Ключевые слова: молочная сыворотка, казеин-сырец, ферментация, протеин.

A method for the enzymatic synthesis of proteins from the compositions containing the microorganisms, in particular a process for preparing casein with yeast culture *Saccharomyces cerevisiae* is presented.

Keywords: whey, casein raw, fermentation, protein.

Введение. Казеин – это группа гетерогенных фосфопротеидов, самоассоциирующихся в мицеллы в присутствии кальция, цитратов и фосфатов, с молекулярной массой 75–100 тыс., содержащая полный набор незаменимых аминокислот [1], [2]. В своем составе казеин содержит фосфорную кислоту (органический фосфор), присоединенную моноэфирной связью к остаткам серина (рисунок 1). Основная часть казеина (около 95 %) в молоке содержится в виде казеиновых мицелл и лишь незначительная часть (около 5 %) – в виде мономеров, полимеров фракций казеина и субмицелл, имеющих размер менее 20–40 нм. Казеиновый комплекс состоит из агломерата основных фракций: а, b, Y, H – казеинов, которые имеют несколько генетических вариантов.

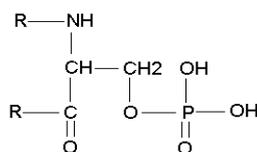


Рисунок 1 – Казеин

Так β -казеин, структура которого напоминает структуру молекулы детергента (гидрофильная «голова» и гидрофобный «хвост»), в растворе формирует детергентоподобные мицеллы, состоящие из гидрофобного ядра и торчащих наружу гидрофильных участков (рисунок 2, б), напоминающие свернувшегося в клубок ежа. Альфа-s1-казеин в растворе образует червеобразные самоассоциаты (цепочки) (рисунок 2, а) за счет связывания друг с другом гидрофобных концов разных молекул. Растворение к-казеина также сопровождается формированием мицелл, за счет взаимодействия друг с другом гидрофобных N-терминальных участков, образующих неполярное ядро. При этом в системе устанавливается равновесие: мономерный к-казеин ↔ мицеллярный к-казеин. Предполагается, что вторичная структура к-казеина, особенно в области гидрофобного *para*-казеинового участка, напоминает β -складку. В нативном коровьем молоке каппа-казеин находится в виде локализованных на поверхности мицеллы полимеров, стабилизированных, помимо гидрофобных, еще и дисульфидными связями, но даже после восстановления -S-S- связей каппа-казеин сохраняет способность к самоассоциации и адсорбции на поверхности казеиновых мицелл. Равновесие между силами гидрофобного связывания и электростатического отталкивания регулирует размер агрегатов и силу межмолекулярных взаимодействий [3].

Казеин представлен на рынке сырья в двух основных вариантах: гидролизат казеина и неизмененный казеин (казеинат или мицеллярный казеин). Гидролизат казеина получают ферментативным гидролизом в процессе обработки с целью улучшения скорости его абсорбции в организме человека. Увеличение скорости переваривания или поглощения и доставки аминокислот в

ткани скелетных мышц возникает из-за того, что структура белка по существу уже «предварительно переварена» и расщеплена на более мелкие пептидные фракции по сравнению с его первоначальной исходной структурой. Разработаны различные способы гидролиза, в том числе и с использованием в качестве катализатора селена, позволяющие получить максимальное расщепление белковых молекул [6]. Мицеллярный казеин – это наиболее эффективная форма казеина, которая представляет собой неизменный, природный казеин, получаемый методом тщательной фильтрации. Данная технология не подразумевает использование высоких тепловых режимов или химической обработки, вызывающих денатурацию этого белка, поэтому все его свойства сохраняются неизменными, а воздействие на организм оказывается более полноценное [4].

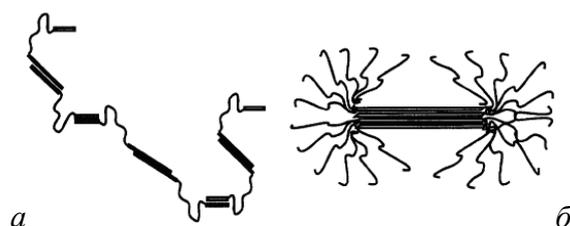


Рисунок 2 – Схемы полимерных структур, формируемых в растворе молекулами $\alpha 1$ -казеина (а) и β -казеина (б) [3]

Классическая технология получения казеина включает следующие операции [7]: обезжиривание молока; подготовку ферментов (пепсина – пищеварительного фермента, расщепляющего белки, или ренина – фермента, вырабатываемого в сычуге – отделе желудка молодых жвачных животных); пастеризацию и подкисление молока молочной или соляной кислотой; инокуляцию – смешение подготовленного молока и фермента; ферментативный катализ смеси при температуре 30–37 °С и рН 6,0–6,2 (сычужный фермент) или 1,5–1,8 (пепсин).

В последние годы при получении казеина для пищевых продуктов наметилась тенденция использования культур различных микроорганизмов. Например, известно применение симбиоза мезофильных, термофильных молочнокислых бактерий, уксуснокислых бактерий и дрожжей как заменителей ренина и пепсина для биоконсервирования отходов переработки молока [8]. При производстве продуктов детского питания казеин получают с использованием культур микроорганизмов из родов *Bacillus* и *Aspergillus* [9]. Применяется также способ с использованием культур молочнокислых палочек *Lactobacillus acidophilus* и *Lactobacillus bulgaricus* [10], заключающийся в сокращении времени сквашивания молока.

Однако существующие технологии предполагают использование дорогостоящих и дефицитных ферментов животного происхождения, а также значительную энергоемкость. В связи с этим актуальным является разработка новых или усовершенствование существующих технологий получения этого ценного продукта.

Таким образом, целью настоящего исследования было изучение возможности использования в технологии производства казеина закваски растительного происхождения; устранение энергоемких дополнительных операций предварительного нагрева молока и тепловой обработки зерен; снижение потерь казеина в процессе сливания сыворотки.

Материал и методика исследований. В качестве сырья использовали цельное коровье молоко (ГОСТ 13264). Для получения молочнокислого казеина закваску готовили на основе дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. Культуру дрожжей выделяли из корня хрена (*Armoracia rusticana*) и культивировали на молочной сыворотке в течение 24–36 ч при 25–30 °С до образования гомогенной биомассы с рН = 4,5–5,0. Выращенная таким образом культура согласно определителю [11] соответствует *Saccharomyces cerevisiae* (синонимы – *Saccharomyces acetii Santa Maria* 1959, *Saccharomyces acedum lactam*), автор описания – Meyen ex Hansen, 1883 г. Патогенных штаммов среди представителей дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* не обнаружено [12]. Биомассу перемешивали с подготовленным молоком и оставляли при 25–30 °С на сутки. За это время из смеси образовывался твердый пористый сгусток казеина-сырца, плавающий в сыворотке. Сыворотку сливали, сгусток разрезали, казеиновое зерно промывали водой, центрифугиро-

вали и высушивали. В качестве закваски использовали не менее 15 об. % сыворотки, сливаемой после образования сгустка казеина-сырца. Превращение казеиногена в казеин происходило под действием протеолитических ферментов, выделяемых культурой дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*. Их эффективность как катализатора расщепления пептидных связей в белках столь велика, что процесс обржоазования казеинового осадка не требует предварительной пастеризации молока, а окончательную обработку зерен казеина можно проводить без их дозревания при повышенной температуре.

Для сравнения эффективности предлагаемой технологии при получении закваски использовали культуру ацидофильной палочки *Lactobacillus acidophilus* [10]. Обезжиренную молочную основу подогрели, вносили закваску (10 об. %), тщательно перемешивали и термостатировали при 40 °С. После образования сгустка сливали часть сыворотки, сгусток разрезали и выдерживали при 60 °С в течение 35 мин. Затем заливали оставшуюся сыворотку и обрабатывали казеиновое зерно по стандартной процедуре. Отбор и подготовку проб полученного казеина-сырца к анализу проводили в соответствии с ГОСТ 26809. Органолептические показатели оценивали по ГОСТ 28283. Из физико-химических показателей определяли кислотность по ГОСТ 3624, массовую долю влаги по ГОСТ 3626, содержание белка в сыворотке методом Кьельдаля по ГОСТ 23327.

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты оценки органолептических и физико-химических показателей экспериментальных образцов казеина-сырца представлены в таблице 1.

Из таблицы видно, что образцы, полученные при использовании дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, имеют меньшую кислотность сыворотки и казеинового сгустка по сравнению с образцами, полученными с применением культуры ацидофильной палочки *Lactobacillus acidophilus*. При этом казеин-сырец отличается меньшим содержанием влаги и более плотной консистенцией. Реализация предложенного способа сопровождается меньшими потерями белка, остающегося в сыворотке, сливаемой после образования сгустка.

Таблица 1 – Органолептические и физико-химические показатели экспериментальных образцов казеина-сырца

Показатели	на основе дрожжей <i>Saccharomyces cerevisiae</i> , об. %				на культурах ацидофильной палочки <i>Lactobacillus acidophilus</i> , об. %
	5	7	10	15	10
Кислотность, °Т:					
– сыворотки	83	95	95	95	100
– зерен	121	140	140	140	173
Массовая доля влаги зерен, %	89	55	55	53	82
Содержание белка в сыворотке, %	2,43	1,11	1,10	1,09	2,07
Органолептические показатели:					
– консистенция зерен	мажущаяся, рыхлая	пористая, крошащаяся			очень рыхлая
– цвет зерен	светло-кремовый	светло-кремовый			белый

Установлено, что концентрация предложенной закваски в молочной смеси должна быть не менее 7 об. %, т. к. концентрации 5 об. % кислотность смеси недостаточна для полного выпадения белка в осадок, что обуславливает повышенное содержание влаги и рыхлую консистенцию зерен казеина, а также значительные потери белка с сывороткой. Увеличение концентрации закваски до 15 об. % незначительно (по сравнению 10 об. %) снижает влажность зерен, а содержание белка в сыворотке практически не изменяется. Кроме того, использование сыворотки, сливаемой после образования сгустка казеина-сырца, для ферментации следующих порций приготовленного молока приводит к такому же качеству зерен, как применение исходной закваски оптимальной концентрации 7–10 об. %.

Заключение. Предложен ферментативный способ получения казеина с использованием культуры дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, выделенной из корня хрена *Armoracia rusticana*, позволяющий снизить себестоимость продукта.

Литература

1. Черников, М.П. Казеин. Химическая энциклопедия : в 5 т. / М.П. Черников. – Т. 2. – М. : Сов. энцикл., 1990. – С. 559.
2. Биологический энциклопедический словарь / Гл. ред. М.С. Гилярова ; редкол. : А.А. Баев, Г.Г. Винберг, Г.А. Заварзин [и др.]. – М. : Сов. энциклопедия, 1986. – 831 с.
3. Ельчаинов, В.В. Структура казеинов и механизм сычужного свертывания. Некоторые химические свойства и особенности структуры казеинов / В.В. Ельчаинов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://tu.convdocs.org/docs/index-239822.html>. – Дата доступа : 10.10.2014.
4. Казеиновый протеин [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://sportime.by/info_dop/156. – Дата доступа : 10.10.2014.
5. Казеин [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://dailyfit.ru/pitanie-i-dieta/kazein-vsya-pravda-o-nem>. – Дата доступа : 10.10.2014.
6. Курбанова, М.Г. Исследование и разработка полифункциональных добавок на основе гидролизатов казеина и практическая реализация технологий пищевых продуктов с их использованием / М.Г. Курбанова [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://sarmedinfo.ru/list/12237>. – Дата доступа : 10.10.2014.
7. Грачева, И.М. Технология ферментных препаратов / И.М. Грачева. – М. : Химия, 1975. – 392 с.
8. Способ получения закваски для высококислотного продукта : пат. РФ 2147405, МПК А 23С 9/12, С 12N 1/20 / Л.Ю. Прудова, Т.Е. Данилова, Е.Г. Инешина, В.Ж. Цыренов ; заявитель Восточно-Сибирский гос. техн. ун-т ; заявл. 13.04.98 ; опубл. 20.04.00.
9. Гидролизат казеина и способ его получения : пат. РФ 2086143 А23J3/00, А23J3/34 / Пер Мунк Нильсен [ДК] ; заявитель Ново Нордиск А/С (ДК) ; заявл. 09.11.92 ; опубл. 10.08.97.
10. Способ производства молочно-кислотного казеина : пат. РФ 2199233, МПК А 23J 1/20 / Г.С. Михалкина, А.В. Татьяначиков, Л.И. Васильева, С.П. Петрова, В.Д. Харитонов ; заявитель ООО «Компания «Торос» ; заявл. 22.05.00 ; опубл. 27.02.03.
11. The Yeasts : a taxonomyc study. – 3rd ed. / Ed. N. J. W. Kreger van Rij. – Amsterdam : Elsevier Biomed. Press, 1984. – P. 379–395.
12. Саттон, Д. Определитель патогенных и условно патогенных грибов / Д. Саттон, М. Ринальди. – М. : Мир, 2001. – 354 с.

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

²Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации

Поступила в редакцию 10.11.2014

УДК 550.835:546.296:528.946

Обоснование применения компонентов радонового показателя для картирования радонового потенциала

А.Л. ЧЕХОВСКИЙ

Исследуется проблема естественного радиоактивного газа – радона. Приведены данные о сильной достоверной связи предложенного радонового показателя с объемной активностью радона в помещениях зданий сельских населенных пунктов Гомельской, Могилевской и Витебской областей. Полученный радоновый показатель может использоваться для картирования территории по радоновому риску в крупномасштабном варианте.

Ключевые слова: радон, радоновый показатель, картирование территории, критические зоны радоноопасности.

The problem of natural radioactive gas – radon is investigated. The data on the strong significant correlation with the index of the proposed radon volume activity of radon in the buildings of rural settlements of Gomel, Mogilev and Vitebsk regions are presented. The resulting radon indicator can be used to map the territory for radon risk in a large-scale version.

Keywords: radon, radon index, mapping the territory, radon critical areas.

Введение. Проблема радиоактивного газа – природного радона является важной проблемой радиационной медицины, непосредственно касающейся населения многих регионов мира, в том числе и Беларуси.

Радон – благородный радиоактивный газ, образующийся в радиоактивной цепочке в процессе распада естественных радионуклидов семейств урана и тория. Согласно оценке Научного комитета по действию атомной радиации (НКДАР) ООН, радон и его дочерние продукты определяют примерно 3/4 годовой индивидуальной эффективной дозы облучения, получаемой населением от земных источников радиации [1]. Наиболее значимым и распространенным дозовым фактором является воздействие радона, содержащегося в воздухе помещений. Радон, являясь компонентом воздуха, попадает в легкие человека при дыхании. Воздействие α -излучения на высокочувствительные клетки дыхательной системы – одна из причин возникновения рака. По оценкам экспертов Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) облучение населения за счет радона обуславливает до 20 % общего количества заболеваний раком легких [2].

Существует три естественных радиоактивных изотопа радона: ^{222}Rn , или просто радон, образующийся в радиоактивном семействе урана-238, ^{220}Rn или торон, образующийся в семействе тория-232, и ^{219}Rn , или актион, образующийся в семействе урана-235. Эти изотопы имеют следующие периоды полураспада: 3,82 дня, 55 сек. и 4 сек. соответственно. В связи с этим ^{222}Rn , являясь наиболее долгоживущим изотопом радона, вместе с его ДПР вносят наиболее существенный вклад в облучение человека.

Проблемы облучения радоном с его дочерними продуктами распада (ДПР) и радиационной защиты на рабочих местах и в жилищах были рассмотрены в Публикации № 50 МКРЗ, 1987 г. и Публикации № 60 МКРЗ, 1990 г. [3], [4]. Принципиально новые подходы к оценке радоновой опасности и радиационной защите от радона и его ДПР были показаны в Публикации № 65 МКРЗ, 1993 г. [5]. Одним из основных тезисов данной публикации является необходимость введения понятия и критериев для оценки радоноопасных зон, что является очень важным в случаях недостатка ресурсов для проведения полномасштабных исследований, как, например, в Беларуси. Известно, что основным источником поступления радона в воздух помещений является почва [6]. Учитывая это, можно провести картирование территории по радоновой опасности с использованием геологических показателей, определяющих концентрации радона, выделить наиболее радоноопасные зоны и предложить необходимые противорадоновые мероприятия.

Целью работы являлось обоснование применения сочетания некоторых показателей, определяющих наличие радона, выступающих в качестве радонового показателя, являющегося основой для картирования территории по радоновому риску в крупномасштабном варианте.

Материалы и методика исследований. Материалами для данной работы являлись результаты измерения объемной активности (ОА) радона в типичных помещениях сельских населенных пунктов 21 района Гомельской, 20 районов Могилевской и 15 районов Витебской области. Эти данные были получены при широкомасштабных обследованиях, выполненных специалистами НИИ морской и промышленной медицины (г. Санкт-Петербург) [7], специалистами ГУ «ГОЦГЭиОЗ» и ГНУ «ОИЭЯИ – Сосны» НАН Беларуси [8] по методике, позволяющей проводить мониторинг радона: «Методики определения объемной активности радона в воздухе жилых и производственных помещений с использованием интегральных радонметров на основе твердотельных трековых детекторов альфа-частиц» (МВИ. МН. 1808–2002) [9]. Измерения проводились в помещениях сельских одноэтажных зданий, в которых можно ожидать максимальные уровни ОА радона, поступающего в основном из почвы.

В исследованиях использовался целый ряд карт: дочернобыльские карты мощности экспозиционной дозы (МЭД) на территории Беларуси, составленные по результатам измерений специалистами «Белгеологии» в период 1969–1985 [10]; геологические карты Беларуси, на которых показано расположение пород и почв с различным содержанием урана [10]; данные по проницаемости различных пород для радона [11]; гидрогеологические карты территории Беларуси с глубинами залегания первого от поверхности водоносного горизонта [12].

Результаты исследований и их обсуждение. По материалам измерений ОА радона, проведенных в трех областях, были определены среднерайонные значения ОА радона по формуле:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n}, \quad (1)$$

где C_i – измеренная i -я ОА в районе, Бк/м³;
 n – количество измерений ОА в районе.

Следует отметить, что ОА радона в помещениях жилых зданий является весьма вариативной величиной и во многом зависит от конструктивных особенностей и защитных свойств зданий. Если принять, что в сельских населенных пунктах преобладают одноэтажные деревянные строения с простыми фундаментами и деревянными полами, то можно считать, что поступление радона в помещение определяется, в основном, свойствами подстилающих пород. Исходя из этого, можно предложить в качестве радонового показателя величину, равную произведению показателей, обуславливающих наличия радона в почвах и породах, в относительных единицах: мощность дозы дочернобыльского фона, запас урана в почвах, проницаемость почв и пород для радона, и глубину залегания первого водоносного горизонта. При добавлении каждого из перечисленных показателей к предыдущим ожидается увеличение коэффициента корреляции между радоновым показателем и ОА радона.

Так, одним из факторов, связанных с ОА радона, является МЭД. Учитывая, что гаммафон на местности определяется, в основном, радионуклидами 3-х естественных радиоактивных рядов уранов и тория, а также калия-40 (мощность дозы от которого принята постоянной) – колебания МЭД определяются концентрацией естественных радионуклидов в почвах. Таким образом, МЭД может опосредованно указывать на наличие радона.

Для того чтобы исключить влияние искусственных радионуклидов, выпавших на территории Беларуси после аварии на Чернобыльской АЭС, в исследованиях использовались дочернобыльские карты МЭД, значения которых были нормированы на максимальную величину – 12 мкР/час, принятую за 1. По картам МЭД были определены средневзвешенные значения относительного показателя МЭД для исследуемых районов Гомельской, Могилевской и Витебской областей, согласно выражению:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n M_i \cdot S_i}{S_{\text{района}}}, \quad (2)$$

где M – средневзвешенное значение относительной мощности экспозиционной дозы, отн. ед.;
 M_i – значение относительной мощности экспозиционной дозы на i -ой площади района, отн. ед.;
 S_i – площадь района со значением M_i , км²;
 n – количество территорий района с различными значениями M_i .

После определения значений относительного показателя МЭД был проведен корреляционный анализ данных для определения степени и характера связи получившихся значений МЭД и ОА радона в помещениях сельских зданий этих областей.

Коэффициент линейной корреляции, указывающий на связь средневзвешенных значений относительного показателя МЭД для исследуемых районов Гомельской, Могилевской, Витебской области и среднерайонных значений ОА радона, составил $r = 0,69$. Имеет место средняя по силе, прямая связь показателя МЭД и ОА радона для районов указанных областей. Эмпирическое значение t -критерия превышает статистическое значение, при уровне значимости $p < 0,05$ – корреляция является достоверной. График данной корреляционной связи представлен на рисунке 1.

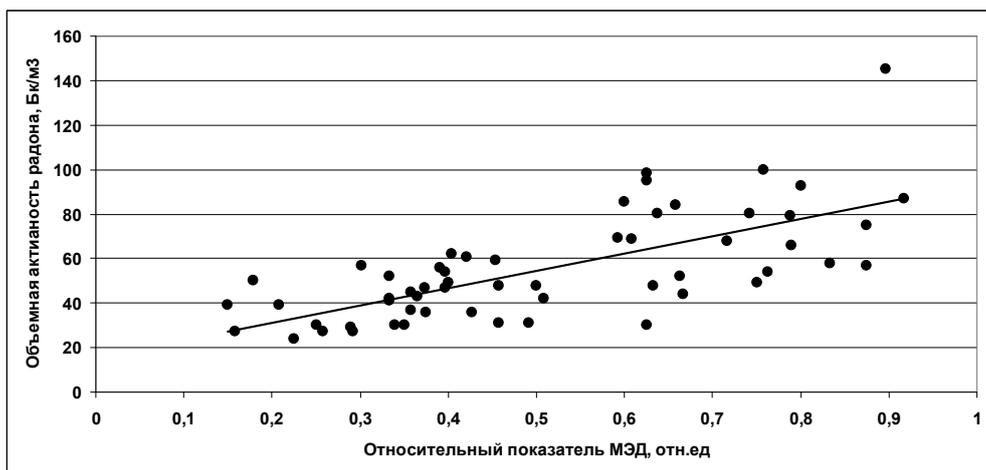


Рисунок 1 – Зависимость среднерайонных значений ОА радона в помещениях от средневзвешенных значений относительного показателя МЭД

Следующим показателем, определяющим ОА радона, является запас урана в почвах и породах. Принимая во внимание, что уран является материнской породой для образования радона – концентрации урана в почвах будут определять содержание радона и, как следствие, его ОА.

Было выделено 9 геологических пород, существующих на территории Беларуси, различающихся по уровню содержания урана [13]. Эти данные были нормированы на значение максимального содержания урана в породе (глина), принятое за 1. Определены средневзвешенные значения относительного показателя запаса урана в почвах для каждого из районов по формуле:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \cdot S_i}{S_{\text{района}}}, \quad (3)$$

где U – средневзвешенное значение относительного запаса урана для выбранного района, отн. ед.;

U_i – значение относительного запаса урана на i -ой площади района, отн. ед.;

S_i – площадь района со значением U_i , км²;

n – количество почв района с различными значениями U_i .

Полученный массив данных был добавлен в качестве множителя к значениям относительного показателя МЭД, и проведен корреляционный анализ данных для определения степени и характера связи получившихся значений радонового показателя (состоящего из средневзвешенных значений относительных показателей МЭД и запаса урана в почвах) и ОА радона в помещениях сельских зданий.

Коэффициент линейной корреляции полученного радонового показателя и среднерайонных значений ОА радона составил $r = 0,77$. Имеет место сильная прямая связь данного показателя и ОА радона для районов Гомельской, Могилевской и Витебской области. Эмпирическое значение t -критерия превышает статистическое значение, при уровне значимости $p < 0,05$ – корреляция является достоверной. График данной корреляционной связи представлен на рисунке 2.

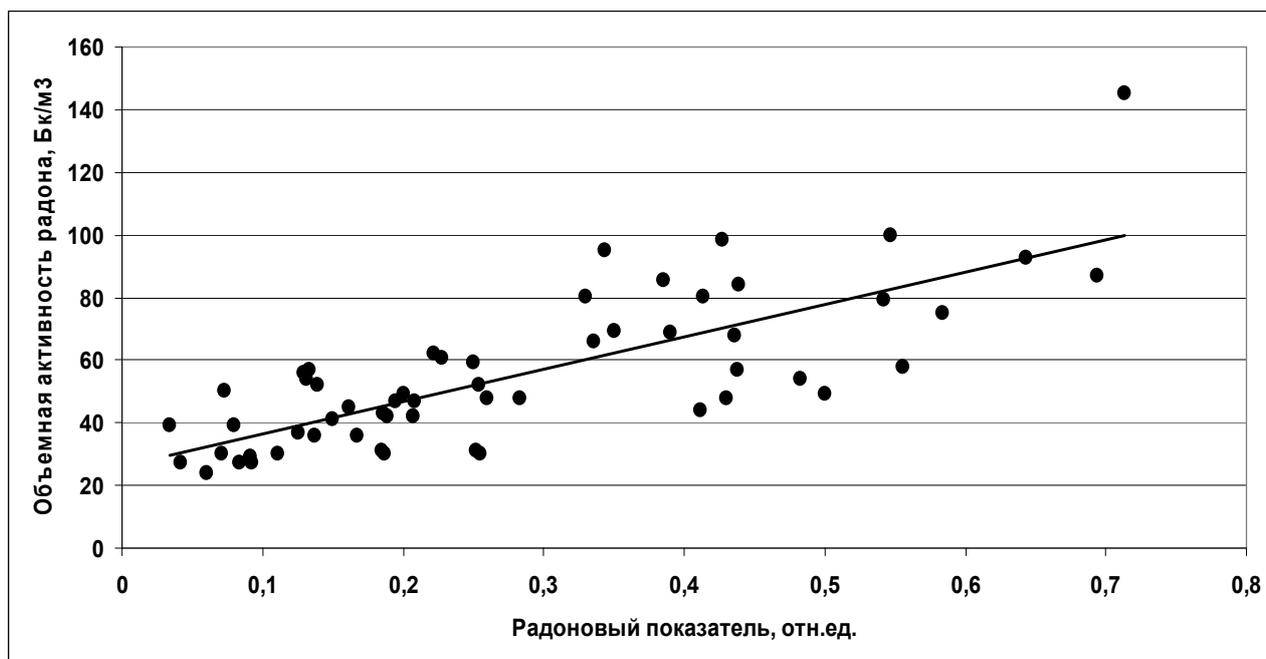


Рисунок 2 – Зависимость среднерайонных значений ОА радона в помещениях от радонового показателя ($M \cdot U$)

Необходимо также учитывать, что эксхалляция радона зависит от проницаемости почвы, которая в свою очередь в большей степени зависит от коэффициента фильтрации радона в грунтах [14]. Исходя из того факта, что период полураспада радона ^{222}Rn составляет около 3,8 суток, скорость его прохождения через слой почвы (которая определяется коэффициентом фильтрации) имеет важное значение и обуславливает конечную ОА радона в помещениях зданий.

Значения коэффициента фильтрации были нормированы на максимальную величину (песчано-гравийная смесь), принятую за 1. Определены средневзвешенные значения относительного показателя коэффициента фильтрации радона в почве для каждого из районов по формуле:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n F_i \cdot S_i}{S_{\text{района}}}, \quad (4)$$

где F – средневзвешенное значение относительного коэффициента фильтрации радона для выбранного района, отн. ед.;

F_i – значение относительного коэффициента фильтрации радона на i -ой площади района, отн. ед.;

S_i – площадь района со значением F_i , км²;

n – количество почв района с различными значениями F_i .

Значения показателя коэффициента фильтрации были добавлены в качестве множителя к полученному произведению средневзвешенных относительных показателей МЭД и запаса урана в почвах. После этого проведен корреляционный анализ для определения степени и характера связи получившихся значений радонового показателя (состоящего из средневзвешенных значений относительных показателей МЭД, запаса урана в почвах, коэффициента фильтрации) и ОА радона в помещениях сельских зданий. График данной корреляционной связи представлен на рисунке 3.

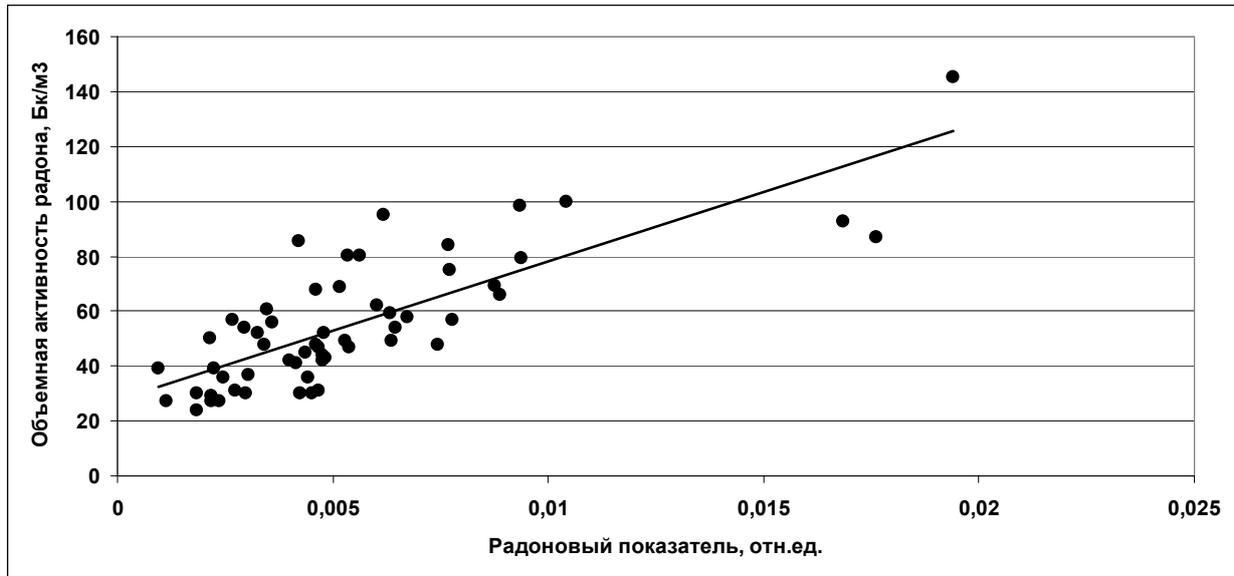


Рисунок 3 – Зависимость среднерайонных значений ОА радона в помещениях от радонового показателя ($M \cdot U \cdot F$)

Коэффициент линейной корреляции, указывающий на связь значений полученного радонового показателя для исследуемых районов Гомельской, Могилевской, Витебской области и среднерайонных значений ОА радона, составил $r = 0,79$. Имеет место сильная, прямая связь данного показателя и ОА радона для районов указанных областей. Эмпирическое значение t -критерия превышает статистическое значение при уровне значимости $p < 0,05$ – корреляция является достоверной.

Также, важным фактором, определяющим концентрацию радона, является уровень залегания первого от поверхности водоносного горизонта. При уровне в 1–2 м от поверхности – почвенный радон почти полностью поглощается, а при уровне более 10 м – весь выделенный радон остается в почвенном воздухе [15].

Значения глубины залегания первого водоносного горизонта были нормированы на максимальную величину (10 м), принятую за 1. После определены средневзвешенные значения относительного показателя уровня залегания первого водоносного горизонта для каждого из районов по формуле:

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \cdot S_i}{S_{\text{района}}}, \quad (5)$$

где W – средневзвешенное значение относительного уровня залегания первого водоносного горизонта, отн. ед.;

W_i – значение относительного уровня залегания первого водоносного горизонта на i -ой площади района, отн. ед.;

S_i – площадь района со значением W_i , км²;

n – количество территорий района с различными значениями W_i .

Значения показателя уровня залегания первого водоносного горизонта были добавлены в качестве множителя к полученному произведению средневзвешенных относительных показателей МЭД, запаса урана в почвах, коэффициента фильтрации. После этого проведен корреляционный анализ для определения степени и характера связи получившихся значений радонового показателя (состоящего из средневзвешенных значений относительных показателей МЭД, запаса урана в почвах, коэффициента фильтрации, уровня залегания первого водоносного горизонта) и ОА радона в помещениях сельских зданий. График данной корреляционной связи представлен на рисунке 4.

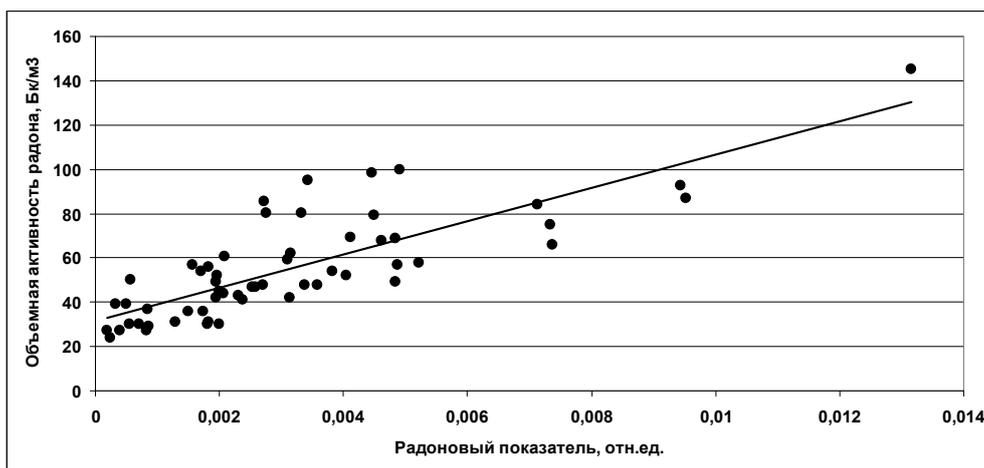


Рисунок 4 – Зависимость среднерайонных значений ОА радона в помещениях от радонового показателя ($M \cdot U \cdot F \cdot W$)

Коэффициент линейной корреляции, указывающий на связь значений полученного радонового показателя для исследуемых районов Гомельской, Могилевской, Витебской области и среднерайонных значений ОА радона, составил $r = 0,81$. Имеет место сильная, прямая связь данного показателя и ОА радона для районов указанных областей. Эмпирическое значение t -критерия превышает статистическое значение при уровне значимости $p < 0,05$ – корреляция является достоверной.

Заключение. Предложенный радоновый показатель имеет достаточно сильную и достоверную связь со значениями ОА радона в помещениях зданий. Данный показатель учитывает целый ряд факторов и приведенные корреляционные зависимости показывают, что увеличение числа показателей, определяющих наличие радона в почвах и породах, значительно повышает коэффициент корреляции радонового показателя и способствует более точной оценке ОА радона. Такой показатель служит основой для определения радоноопасности территории. С его помощью можно определить географическое положение критических зон радоноопасности и составить тематические карты этих территорий по радоновому риску. Однако для принятия конкретных решений по дальнейшему проведению противорадиационных мероприятий необходимо в критических зонах радоноопасности провести дополнительные исследования по определению среднегодовых значений ОА радона в помещениях зданий [2].

Литература

1. Радиация. Дозы эффекты риск : пер. с англ. Ю.А. Банникова. – М. : Мир, 1990. – 80 с.
2. Риск возникновения рака легкого при облучении радоном и продуктами его распада. Заявления по радону / под ред. М.В. Жуковского, С.М. Киселева, А.Т. Губина // Перевод публикации № 115 МКРЗ. – М. : ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2013. – 92 с.
3. ICRP Publication № 50. – Oxford : Pergamon Press, 1987. – 79 p.
4. ICRP Publication № 60. – Oxford : Pergamon Press, 1990. – 94 p.
5. Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах / Публикация № 65 МКРЗ. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 78 с.
6. Бекман, И.Н. Радон : враг, врач и помощник / И.Н. Бекман. – М. : МГУ, 2000. – 205 с.
7. Радоновый мониторинг Могилевской и Гомельской области Республики Беларусь : отчет о НИР (закл.) / Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины; рук. Э.М. Крисюк. – СПб., 1992. – 205 с.
8. Отчет о НИР (закл.) / Объединенный Институт энергетических и ядерных исследований; рук. О.И. Ярошевич. – Минск ; Областной Центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья ; рук. В.Н. Бортновский. – Гомель, 2005. – 170 с.
9. Методика определения объемной активности радона в воздухе жилых и производственных помещений с использованием интегральных радонометров на основе твердотельных трековых детекторов альфа-частиц. – МВИ. МН 1808–2002. – Минск, 2002. – 18 с.

10. Karabanov, A.K. Impact of geological structures of Belarus on Radon Concentration in Air Workshop on Natural Radiation and Radon : Seminar on Radon, Stockholm, SSM, 25–27 January, 2009.
11. Беяшов, А.В. Оценка гидрогеологических параметров по данным геофизических исследований в скважинах: Методическое руководство / А.В. Беяшов [и др.]. – Минск : Фонды геофизической экспедиции, 2008. – 43 с.
12. Богомолов, Г.В. Гидрогеологическая карта четвертичных отложений Белорусской ССР / Г.В. Богомолов [и др.]. – Минск, 1963. – 287 с.
13. McDonough, W.F. The Composition of the Earth / W.F. McDonough, S.S. Sun // Chem. Geol. – 1995. – № 1. – P. 223–253.
14. Адушкин, В.В. Поля почвенного радона в восточной части Балтийского щита / В.В. Адушкин, И.И. Дивков, С.А. Кожухов // Динамические процессы в системе внутренних и внешних взаимодействующих геосфер / В.В. Адушкин, И.И. Дивков, С.А. Кожухов. – М. : Геос, 2005. – С. 173–178.
15. Выполнение комплексной геофизической съемки на площадке возможного размещения АЭС и прогноз миграции радионуклидов с подземными водами (Шкловско-Горецкий пункт, Кукшиновская площадка) : Отчет о НИР (закл.) / Бел. геофиз. Экспед ; рук. темы А.В. Гаврилов. – Минск, 2008. – 257 с.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 12.04.2014

УДК 681.3.06:624.131

Приближенный аналитический метод определения осадки свай-РИТ в грунтовом основании

В.Е. Быховцев, С.В. Киргинцева

Предлагается приближенный аналитический метод определения осадки свай-РИТ в деформируемом грунтовом основании с учетом уплотнения грунта в области камуфлетного уширения.

Ключевые слова: свая-РИТ, камуфлетное уширение, грунты, математическая модель, метод исследования моделей.

The approximate analytical method of definition a precipitation piles-RIT in the deformable soil basis taking into account soil consolidation in the field of camouflage broadening is offered.

Keywords: pile-RIT, camouflage broadening, soil, mathematical model, method of research of models.

Введение. Одним из способов управления несущей способностью грунтовых оснований строительных площадок возводимых зданий и сооружений является армирование грунтов. Способы и технологии устройства армирующих элементов в грунтах могут быть самыми разнообразными. Армирующими элементами могут быть горизонтальные и вертикальные элементы: пленки и стержни различной прочности. В работе в качестве армирующих элементов рассматриваются РИТ-сваи. При устройстве таких свай в грунт происходит уплотнение грунтового основания в области камуфлетного уширения.

Методом компьютерного моделирования проведен ряд исследований по определению зависимости осадки свай-РИТ в грунтовом основании от геометрических характеристик свай, грунтовых условий, величины нагрузки на сваи с камуфлетными уширениями [1]. Анализ результатов вычислительных экспериментов показал небольшую эффективность устройства уширения для длинных свай в грунтовом основании. Полученные при этом значения осадок длинных свай хорошо согласуются с экспериментальными данными [2, с. 3]. Для коротких РИТ-свай эффективность устройства камуфлетного уширения оказалась значительной.

Постановка задачи. В работе рассматривается одиночная короткая свая с камуфлетным уширением в грунтовом основании. На сваю действует вертикальная нагрузка. Модель уплотнения грунтового основания в области камуфлетного уширения может быть представлена степенной функцией гиперболического типа $\{y = ax^n, a > 0, n < 0\}$ и показана на рисунке 1 [3, с. 128].

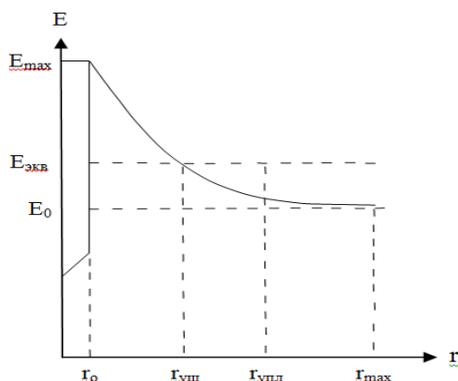


Рисунок 1 – Модель уплотнения грунта

Необходимо определить осадку свай-РИТ в грунте. Решить поставленную задачу можно методом компьютерного моделирования, однако особый интерес представляет возможность дать аналитическое решение задачи.

Многочисленные вычислительные эксперименты показали, что в подобласти грунта, расположенного выше плоскости камуфлетного уширения свай-РИТ, наблюдается телескопический сдвиг [1]. Этот эффект использован при построении аналитического решения поставленной задачи.

Определение осадки свай-РИТ в линейно-деформируемом грунтовом основании. Рассмотрим одиночную сваю-РИТ в однородном линейно-деформируемом грунтовом основании. Как показано, выше плоскости камуфлетного уширения сваи существует телескопический сдвиг, т. е.

$$U = 0, W = f(r), \quad (1)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \varepsilon_z = 0, \gamma_{rz} = \partial W / \partial r, \quad (2)$$

и состояние равновесия рассматриваемой физической системы можно представить только одним уравнением:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} = 0,$$

где U и W – горизонтальная и вертикальная составляющие вектора перемещения грунтового основания, или в более компактной форме:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial W}{\partial r} \right) = 0, \quad (3)$$

Решение уравнения (3) должно отвечать и физическим условиям задачи, т.е. в решении должны содержаться физические параметры свай-РИТ и физико-механические характеристики грунтового основания. Решение в виде

$$W = c_1 \ln \frac{c_2}{r_i}; \quad c_1 > 0; \quad c_2 > r, \quad (4)$$

удовлетворяет (3) и соответствует поставленным требованиям, если константы c_1 и c_2 будут определены с помощью указанных параметров. В случае линейного деформирования основания осадка свай-РИТ линейно зависит от нагрузки и обратно пропорциональна модулю сдвига грунта основания и длине РИТ-свай.

Авторами предлагается два подхода к определению осадки свай-РИТ в линейно-деформируемом грунтовом основании. В первом подходе учитываются радиус ствола и камуфлетного уширения свай-РИТ, а также радиус уплотнения грунтового основания в области камуфлетного уширения. В этом случае константы c_1 и c_2 вычисляются по следующим формулам:

$$c_1 = \frac{\mu P}{GL}; \quad c_2 = \frac{(1 + \mu)L - 4r_0}{2 \left(1 + 2\mu \frac{r_{yul} - r_0 + \alpha r_{ynl}}{r_0} \right)}, \quad (5)$$

где μ и G – коэффициент Пуассона и модуль сдвига грунтового основания; P – нагрузка на сваю-РИТ; L и r_0 – длина и радиус ствола свай-РИТ соответственно; r_{yul} – радиус камуфлетного уширения свай-РИТ; α и r_{ynl} – коэффициент и радиус уплотнения грунта в области камуфлетного уширения соответственно.

Исходя из (5), формула определения осадки одиночной свай-РИТ в линейно-деформируемом грунтовом основании примет вид:

$$W = \frac{2\mu P(1 + \mu)}{E_0 L} \ln \frac{(1 + \mu)L - 4r_0}{2 \left(1 + 2\mu \frac{r_{yul} - r_0 + \alpha r_{ynl}}{r_0} \right) r_i}, \quad (6)$$

где E_0 – модуль деформации окружающего грунта.

По результатам компьютерного моделирования выявлено, что коэффициент уплотнения грунта в области камуфлетного уширения $0 < \alpha < 0,5$ и равен

$$\alpha = \frac{r_{ynl}}{r_{max}}, \quad (7)$$

где r_{max} – радиус деформируемой области.

Формула (6) полностью соответствует сути уплотнения грунтового основания свай-РИТ: чем больше взрыв грунта, т.е. чем больше радиус уплотнения грунтового основания $r_{упл}$, тем больше степень его уплотнения α и тем осадка свай-РИТ меньше.

Второй предлагаемый подход основан на определении эквивалентного модуля деформации грунта в зоне камуфлетного уширения свай-РИТ и использовании средневзвешенного значения модуля деформации грунтового основания во всей деформируемой области. В данном случае эквивалентный модуль деформации грунта $E_{экв}$ в зоне камуфлетного уширения определяется по формуле:

$$E_{экв} = \frac{E_0}{1 - \mu} \frac{r_{max}}{r_{max} - r_0}, \quad (8)$$

где E_0 – модуль деформации окружающего грунта.

Средний модуль деформации E_{cp} и средний коэффициент Пуассона μ_{cp} грунтового основания всей деформируемой области вычисляется по формулам:

$$E_{cp} = \frac{S_0 E_0 + S_{экв} E_{экв}}{S_0 + S_{экв}}, \quad (9)$$

$$\mu_{cp} = \frac{S_0 \mu_0 + S_{экв} \mu_{экв}}{S_0 + S_{экв}}, \quad (10)$$

где S_0 и $S_{экв}$ – площади окружающего и уплотненного грунта в области камуфлетного уширения соответственно; μ_0 и $\mu_{экв}$ – коэффициенты Пуассона окружающего и уплотненного грунта в области камуфлетного уширения соответственно.

Используя формулы нахождения эквивалентного модуля деформации грунта в уплотнённой зоне, среднего модуля деформации и среднего коэффициента Пуассона грунтового основания деформируемой области, после несложных преобразований формула определения осадки свай-РИТ в линейно-деформируемом грунтовом основании будет иметь вид:

$$W = \frac{2\mu_{cp} P(1 - \mu_{cp}^2) r_{max} - r_0}{E_{cp} L} \ln \frac{(1 + \mu_{cp})L - 4r_0}{2 \left(1 + 2\mu_{cp} \frac{r_{yuu} - r_0}{r_0} \right) r_i}, \quad (11)$$

Определение осадки свай-РИТ в нелинейно-деформируемом грунтовом основании.

Рассмотрим одиночную сваю-РИТ в нелинейно-деформируемом грунтовом основании. Поскольку выше плоскости камуфлетного уширения сваи существует телескопический сдвиг, то и в случае нелинейного деформирования грунта уравнения (1), (2), (3) будут иметь место.

Уравнения состояния грунтового основания при упругом и неупругом деформировании может быть представлено уравнениями (12) и (13) соответственно:

$$\sigma_i^e = E \varepsilon_i^e, \quad (12)$$

$$\sigma_i = A \varepsilon_i^m, \quad (13)$$

где σ_i , ε_i – интенсивности деформаций и напряжений; E – модуль упругости; A и m – параметры закона деформирования; «e» – признак линейного деформирования.

На основании метода энергетической линеаризации [4, с. 114]

$$\varepsilon_i = \left(\frac{1+m}{2} \frac{E}{A} \varepsilon_i^e \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (14)$$

где

$$\varepsilon_i^e = \frac{\sqrt{2}}{2(1+\mu)} \sqrt{(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2 + \frac{3}{2} \gamma_{rz}^2}, \quad (15)$$

Уравнение (14) устанавливает связь между интенсивностями деформаций, полученными при линейном и нелинейном решении исходной задачи.

Выражение (14) при учете (2) и (15) будет иметь вид:

$$\frac{\partial W}{\partial r} = \left(\frac{1+m}{2} \frac{E}{A} \right)^{\frac{1}{m}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2(1+\mu)} \right)^{\frac{1-m}{m}} \left(\frac{\partial W^e}{\partial r} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (16)$$

При упругом деформировании из уравнения (3) следует

$$\frac{\partial W^e}{\partial r} = \frac{c_1}{r}, \quad c_1 = \frac{\mu P}{GL}, \quad (17)$$

Интегрируя (16) при учете (17), получим:

$$W = \left(\frac{1+m}{2} \frac{\sqrt{3} G}{A} \frac{\mu P}{GL} \right)^{\frac{1}{m}} \frac{2(1+\mu)}{\sqrt{3}} \int_{r_0}^{\infty} \left(\frac{1}{r} \right)^{\frac{1}{m}} dr + c_1, \quad (18)$$

В (18) несобственный интеграл будет сходящимся, выполнив интегрирование, получим:

$$W = \frac{2m(1+\mu)}{\sqrt{3}(1-m)} \left(\frac{\sqrt{3}(1+m)\mu P}{2ALr_0} \right)^{\frac{1}{m}} r_0, \quad (19)$$

Используя формулы нахождения эквивалентного модуля деформации грунта в зоне камуфлетного уширения $E_{экр}$, среднего модуля деформации E_{cp} и среднего коэффициента Пуассона μ_{cp} , после несложных преобразований формула определения осадки сваи-РИТ при нелинейном деформировании грунтового основания будет иметь вид:

$$W = \frac{2m(1-\mu_{cp}^2)\sigma_{i,кр}}{\sqrt{3}(1-m)E_{cp}} \frac{r_{\max} - r_0}{r_{\max}} \left(\frac{\sqrt{3}(1+m)\mu_{cp}P}{2Lr_0\sigma_{i,кр}} \right)^{\frac{1}{m}} r_0, \quad (20)$$

Оценим точность разработанных формул определения осадки сваи-РИТ в грунтовом основании методом компьютерного объектно-ориентированного моделирования на примере конкретной задачи механики грунтов.

Определим осадку короткой сваи-РИТ радиусом $r_0 = 10$ см, длиной $L = 200$ см в грунтовом основании с характеристиками: $E_0 = 30$ МПа, $\mu = 0,32$. Нагрузка на сваю-РИТ $P = 20$ т. Решение поставленной задачи получим двумя способами:

1) Методом компьютерного объектно-ориентированного моделирования на основе метода конечных элементов с помощью программного комплекса «Энергия-ОС», осадка сваи-РИТ $S_{\text{мод}}^n$ и $S_{\text{мод}}^n$ при линейном и нелинейном деформировании грунтового основания соответственно.

2) Приближенным численно-аналитическим методом по формулам (6) и (11), осадка сваи-РИТ при линейном деформировании $S_{\phi 1}^n$ и $S_{\phi 2}^n$ соответственно; и по формуле (20), осадка сваи-РИТ при нелинейном деформировании S_{ϕ}^n .

Значения осадок короткой сваи с камуфлетным уширением в деформируемом грунтовом основании, полученные методом компьютерного моделирования и приближенным аналитическим методом при условии линейного и нелинейного деформирования грунта, в зависимости от радиуса камуфлетного уширения сваи $r_{\text{уш}}$ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Осадка короткой сваи-РИТ в грунтовом основании (см)

S	$S_{\text{мод}}^n$	$S_{\phi 1}^n$	$S_{\phi 2}^n$	$S_{\text{мод}}^n$	S_{ϕ}^n
$r_{\text{уш}} = 15$	0,480	0,573	0,360	0,754	0,613
20	0,370	0,480	0,314	0,431	0,558
30	0,251	0,321	0,231	0,306	0,359

Из данных таблицы 1 видно, что предложенные методы определения осадок коротких свай-РИТ в грунтовом основании при линейном и нелинейном деформировании грунта являются допустимыми. Точность соответствия решений зависит от радиуса камуфлетного уширения. При радиусе камуфлетного уширения $r_{\text{уш}}$ не менее 20 см расхождения результатов компьютерного моделирования осадок сваи с камуфлетным уширением в линейно-деформируемом грунтовом основании и полученных по формулам составили не более 5 %.

Заключение. Разработан приближенный аналитический метод определения осадки свай-РИТ в деформируемом грунтовом основании и показано высокое соответствие разработанного аналитического решения по определению осадок коротких свай-РИТ в грунтовом основании и решений, полученных методом компьютерного объектно-ориентированного моделирования.

Литература

1. Киргинцева, С.В. Компьютерный анализ эффективности армирования грунтовых оснований РИТ-сваями / С.В. Киргинцева // Научно-технический журнал «Проблемы физики, математики и техники». – 2014. – № 3(20). – С. 88–91.
2. Невейков, А.Н. Свая, изготовленная по разрядно-импульсной технологии, – свая нового поколения с уширениями в Республике Беларусь [Электронный ресурс] / А.Н. Невейков, О.В. Козунова // ОАО «Буровая компания «Дельта». – Режим доступа :http://belniis.by/sites/default/files/neveykov_a.n._kozunova_o.v._svaya_rit.pdf.
3. Быховцев, В.Е. Математическое и компьютерное моделирование развития зоны уплотнения грунтового основания винтовой сваи / В.Е. Быховцев, В.В. Бондарева, С.В. Торгонская // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2014. – № 3 (84). – С. 125–130.
4. Быховцев, В.Е. Компьютерное объектно-ориентированное моделирование нелинейных систем деформируемых твердых тел / В.Е. Быховцев. – Гомель : УО «ГГУ им. Ф. Скорины», 2007. – 219 с.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 27.06.2014

Диагностика беспроводных соединений локальных вычислительных сетей

А.В. ВОРУЕВ, В.Н. КУЛИНЧЕНКО

Рассмотрена ситуация, сложившаяся при использовании близких частотных диапазонов различными сетевыми стандартами. Описан ряд путей по выходу из конфликтных ситуаций. Описывается применение программных и аппаратных средств для организации диагностики беспроводных сетей.

Ключевые слова: беспроводная сеть, несущая частота, диагностика.

The situation when using close frequency bands by different network standards are described. A number of ways to resolve the conflict are presented. The use of software and hardware for the organization of diagnosis of wireless networks are given.

Keywords: wireless network, carrier frequency, diagnosis.

Введение. В основе беспроводных сетей могут лежать разные технологии, но их объединяет общая для всех устройств среда, и это вносит существенное ограничение в механизмы их работы.

Для примера продемонстрируем типичную занятость частотного диапазона в районе частоты 2,4 ГГц (рисунок 1).

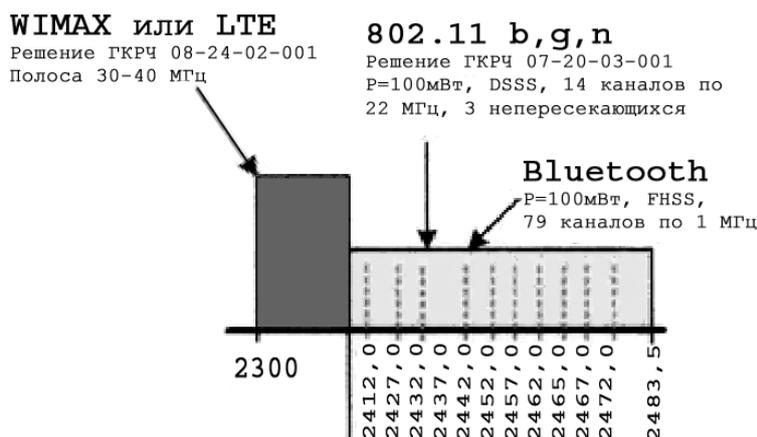


Рисунок 1 – Плотность использования частотного диапазона 2,4 ГГц

Основным международным документом, определяющим правила использования радиочастотной связи (РЧС), является Регламент радиосвязи, содержащий, в частности, международную таблицу распределения частот и определяющий основные правила координации и совместного использования частот для наземных и космических служб всех назначений.

В связи с ограниченностью РЧС встает задача повышения эффективности использования спектра. Перечислим некоторые меры, используемые в мировой практике при решении данного вопроса.

- Можно рекомендовать распределение ресурса на принципе аукционирования, поскольку конкурирующие операторы определяют стоимость спектра эффективнее, чем государственный орган. Ограничения этого подхода - должен быть достаточный спрос на данный участок спектра, а также важно не сделать слишком большим первичный взнос, поскольку это может негативно отразиться на способности операторов быстро вернуть свои инвестиции в РЧС.

- Разрешение на использование частот должно иметь ограничение по времени (не слишком короткое, чтобы оператор мог получить достаточную прибыль от деятельности и не слишком длительное, чтобы государство не лишалось возможности управлять частотным ресурсом). Обычно в качестве срока действия лицензии выбирается интервал 10-20 лет.

- Эффективность развития систем связи зависит от полосы частот, в узких полосах частот, как правило, эффективное развитие затруднено или невозможно. В США, например, принято решение, что в качестве лота на создание сети радиодоступа предоставляется полоса частот не менее 20 МГц и не более 45 МГц. В зависимости от доступного спектра оптимальным считается наличие 5 операторов в одной зоне обслуживания.

- Плата за использование спектра – еще один рычаг повышения эффективности использования частот.

- Известны успешные случаи, когда создание вторичного рынка частот позитивно сказывалось на эффективности их использования.

- Может применяться расширение прав пользователя в отношении выделяемых частот, например, выделение РЧС производится без определения, какую из технологий должен реализовывать пользователь для построения системы связи.

- Известны случаи, когда управление РЧС передается частному сектору, который демонстрирует эффективные подходы к управлению полученным ресурсом. Государство в этом случае оставляет за собой лишь стратегическое планирование, регистрирует сделки, получает за них налоги, решает конфликты и контролирует выполнение установленных требований.

Локальные сети в условиях необходимости поддержки увеличивающегося числа мобильных устройств увеличивают нагрузку на беспроводную среду. При этом системные администраторы постоянно сталкиваются с проблемой организации качественной и защищенной связи для своих абонентов.

Количество подключенных устройств к концу 2014 г. составит 16 млрд, что на 20 % больше, чем было в 2013 г., а к 2020 г. их численность возрастет более чем вдвое и достигнет 40,9 млрд, сообщает аналитическая компания ABI Research. Другие аналитические организации, например Международный телекоммуникационный союз (The International Telecommunications Union, ITU), склоняются к более скромной цифре около 30 млрд устройств. Напротив, компании производители, например Cisco Inc., склоняются к большей цифре около 50 млрд.

Эксперты считают, что рост числа устройств будет происходить за счет подключений М2М-устройств или устройств, предназначенных для обмена информацией между машинами. Этот сетевой трафик необходимо пропустить через инфраструктуру каналов связи, а значит их развитие является сдерживающим фактором.

Для реализации клиентского подключения беспроводным способом необходимо иметь резерв в радиочастотном спектре. Такой резерв достигается за счет уплотнения: частотного, временного или пространственного (в случае с ММО). Опыты в данном направлении продолжаются.

Например, компанией Ubiquiti Networks была разработана и запатентована в 2012 г. технология AirMAX. Суть ее в том, что прием-передача сигнала несколькими антеннами на одном канале упорядочивается и структурируется протоколом TDMA с аппаратным ускорением: пакеты данных разнесены в отдельные временные слоты, очереди передачи координируются.

Диагностика беспроводного соединения на стороне пользователя долгое время не учитывалась как актуальная задача. Низкая мощность устройств, задействованных в обмене данными, позволяла организовать разделение одного частотного канала несколькими пользовательскими устройствами за счет затухания сигнала от соседних устройств.

К середине 2014 г. ситуация изменилась:

- требование к увеличению дальности связи и скорости передачи данных потребовало увеличения мощности устройств;

- плотность размещения пользователей беспроводных сетей возросла;

- одновременная эксплуатация несколькими сетевыми стандартами соседних частот приводит к общему снижению качества обслуживания.

В результате внедрение, а в некоторых случаях и просто поддержка эксплуатации, беспроводных сегментов локальных вычислительных сетей упирается в необходимость проведения обследования радиочастотного диапазона.

Простейшие программы диагностики доступны пользователям в виде всевозможных модулей, осуществляющих отображение беспроводных сетей, сигнал которых распознается достаточно хорошо. Примером такой программы является Wifi Analyzer (рисунок 2).

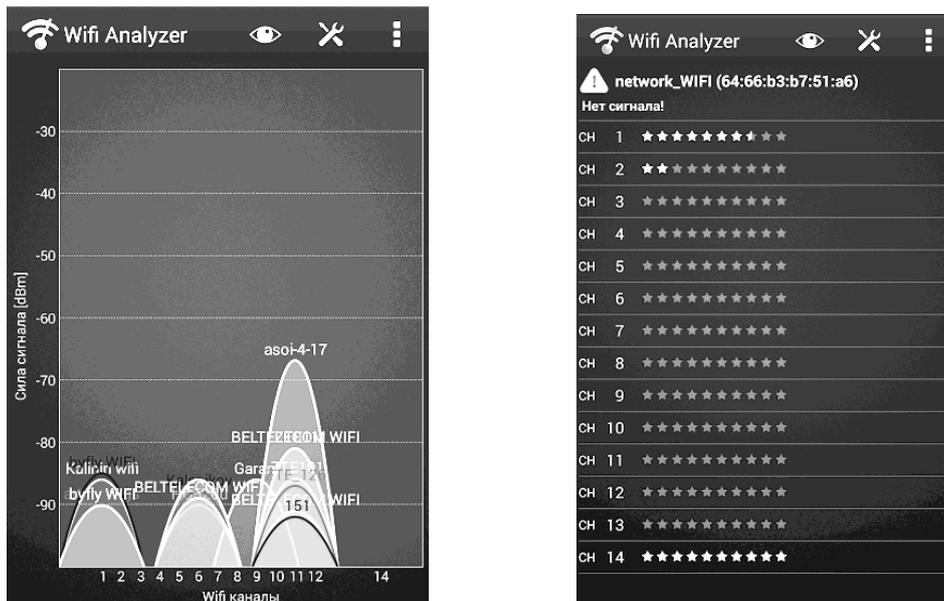


Рисунок 2 – Пример реального заполнения частотного диапазона 2,4 ГГц

Приведенный график (левая часть рисунка 2) показывает накладки частотных диапазонов при их эксплуатации соседними станциями. Программа выработывает рекомендацию по рейтингу частот свободных на текущий момент для дальнейшего использования (правая часть рисунка 2). В зависимости от интенсивности работы каждой из беспроводных сетей можно получить графики загруженности частот (рисунок 3).

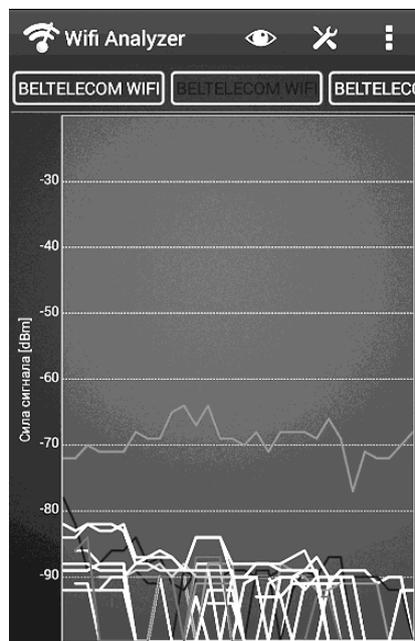


Рисунок 3 – График изменения мощности сигнала станций WiFi

Даже такой поверхностный анализ уже дает возможность принимать решения по установке и настройке новых беспроводных точек доступа.

Профессиональное оборудование позволяет получить намного более детальную картину (рисунки 4, 5).

Access Points Summary

Name: 98f537-3464e7
Channels: 8 (2,417GHz)
#APs: 1
Security: No Security
SSIDs: byfly WIFI
Notes: Unexpected country from access point,
802.11 Types: b,g
AP Country Setting: TW
Best AP Signal Strength: -88dBm
Authorization (ACL): Unauthorized

Name: 98f537-3e440f
Channels: 6 (2,437GHz)
#APs: 2
Security: Mixed
SSIDs: Kaleninov,
Notes: Unexpected country from access point
802.11 Types: b,g
AP Country Setting: TW
Best AP Signal Strength: -88dBm
Authorization (ACL): Unauthorized

Name: c864c7-3c25c5
Channels: 1 (2,412GHz)
#APs: 2
Security: Mixed
SSIDs: Kalinin wifi,
Notes: Unexpected country from access point
802.11 Types: b,g
AP Country Setting: TW
Best AP Signal Strength: -89dBm
Authorization (ACL): Unauthorized

Name: cc7b35-262c79
Channels: 10 (2,457GHz)
#APs: 2
Security: Mixed
SSIDs: ZTE044,
Notes: Possible Interference - overlaps standard channels
802.11 Types: b,g,n
AP Country Setting: TW
Best AP Signal Strength: -84dBm
Authorization (ACL): Unauthorized

Name: cc7b35-272339
Channels: 10 (2,457GHz)
#APs: 1
Security: No Security
SSIDs: BELTELECOM WIFI
Notes: Possible Interference - overlaps standard channels
802.11 Types: b,g,n
AP Country Setting: TW
Best AP Signal Strength: -87dBm
Authorization (ACL): Unauthorized

Name: D-Link:002191-88b2ad
Channels: 11 (2,462GHz)
#APs: 1
Security: WPA2-P(AES-CCMP)
SSIDs: asoi-4-17
Notes:
802.11 Types: b,g
AP Country Setting: TW
Best AP Signal Strength: -58dBm
Authorization (ACL): Unauthorized

Name: D-Link:1caff7-2ded50
Channels: 1 (2,412GHz)
#APs: 1
Security: No Security
SSIDs: Garant
Notes: Unexpected country from access point,
802.11 Types: b,g
AP Country Setting: GB
Best AP Signal Strength: -87dBm
Authorization (ACL): Unauthorized

Name: D-Link:1caff7-2deda8
Channels: 1 (2,412GHz)
#APs: 1
Security: No Security
SSIDs: Garant
Notes: Unexpected country from access point,
802.11 Types: b,g
AP Country Setting: GB
Best AP Signal Strength: -88dBm
Authorization (ACL): Unauthorized

Name: D-Link:1caff7-2dedc8
Channels: 1 (2,412GHz)
#APs: 1
Security: No Security
SSIDs: Garant
Notes: Unexpected country from access point,
802.11 Types: b,g
AP Country Setting: GB
Best AP Signal Strength: -84dBm
Authorization (ACL): Unauthorized

Name: Infint:f81a67-ec7bf8
Channels: 9 (2,452GHz)
#APs: 1
Security: WPA2-P(AES-CCMP)
SSIDs: Garant
Notes: 40 MHz 802.11n is not recommended on 2.4 GHz,
802.11 Types: b,g,n
AP Country Setting: TW
Best AP Signal Strength: -81dBm
Authorization (ACL): Unauthorized

Name: IntIn:00e04d-66a3e4
Channels: 1 (2,412GHz)
#APs: 1
Security: No Security
SSIDs: BELTELECOM WIFI
Notes:
802.11 Types: b,g
AP Country Setting: TW
Best AP Signal Strength: -90dBm
Authorization (ACL): Unauthorized

Name: IntIn:00e04d-762515
Channels: 6 (2,437GHz)
#APs: 2
Security: Mixed
SSIDs: BELTELECOM WIFI,
Notes:
802.11 Types: b,g
AP Country Setting: TW
Best AP Signal Strength: -84dBm
Authorization (ACL): Unauthorized

Name: Openbr:fa150e-a3f0bc
Channels: 11 (2,462GHz)
#APs: 1
Security: WPA2-P(AES-CCMP)
SSIDs: NOKIA Lumia 630_8138
Notes:
802.11 Types: b,g,n
AP Country Setting: TW
Best AP Signal Strength: -85dBm
Authorization (ACL): Unauthorized

Name: Pima:5422f8-1b7e13
Channels: 11 (2,462GHz)
#APs: 2
Security: Mixed
SSIDs: ZTE101,
Notes:
802.11 Types: b,g,n
AP Country Setting: TW
Best AP Signal Strength: -83dBm
Authorization (ACL): Unauthorized

Name: Pima:5422f8-1bef5e
Channels: 11 (2,462GHz)
#APs: 2
Security: Mixed
SSIDs: BELTELECOM WIFI,
Notes:
802.11 Types: b,g,n
AP Country Setting: TW
Best AP Signal Strength: -76dBm
Authorization (ACL): Unauthorized

Name: ZTE :0026ed-a85051
Channels: 11 (2,462GHz)
#APs: 2
Security: Mixed
SSIDs: ZTE_126,
Notes:
802.11 Types: b,g
AP Country Setting: TW
Best AP Signal Strength: -88dBm
Authorization (ACL): Unauthorized

Рисунок 4 – Часть журнала опроса частот стандарта IEEE 802.11 с Flucke AirCheck



Рисунок 5 – Экраны работы Fluke AirCheck

Учитывая данные, отсеиваемые ранее как незначительный фон, появляется возможность принимать более взвешенные решения. Например:

- выработка рекомендаций по физическому переносу источников сигнала;
- выработка рекомендаций по равномерному заполнению частотного диапазона источниками сигнала;
- возможный отказ от использования нескольких устройств с большим перекрытием зон вещания дублирующего трафика;
- выработка рекомендаций по замене оборудования.

Материал для статьи был собран устройством AirCheck™ Wi-Fi Tester.

Вот некоторые из его возможностей:

- просмотр данных об использовании сети Wi-Fi, отсортированных по каналам, и быстрое определение наличия трафика стандарта 802.11 или помех, не относящихся к трафику 802.11;
- быстрая идентификация беспроводных точек доступа, авторизованных или неавторизованных, и определение их местонахождения;
- полное документирование результатов поиска неполадок для быстрого разрешения неполадки или передачи проблемы следующему уровню технического обслуживания.

Применение данного устройства и его аналогов обеспечивает процедуру диагностики планируемых и эксплуатируемых беспроводных соединений дополнительными данными.

Литература

1. Демиденко, О.М. Функциональные возможности программного комплекса адаптивной идентификации пользователей корпоративной сети // О.М. Демиденко, В.Д. Левчук, А.И. Кучеров / Проблемы, физики, математики и техники. – 2010. – № 3 (4). – С. 69–73.
2. Воруев, А.В. Удаленный контроль и управление процессами в локальных сетях / О.М. Демиденко, А.В. Воруев, А.И. Кучеров // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2007. – № 5 (44). – С. 98–100.
3. Диваков, Н.Н. IPv6 протоколы : в 2 ч. / Диваков Н.Н., А.В.Воруев // Материалы III Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов «Актуальные вопросы физики и техники», 17 апреля 2014 г. : ч. 2 / редкол. : А.В.Рогачев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2014. – С. 60–62.
4. AirCheck™ Wi-Fi Tester. Простой поиск и устранение неисправностей в специализированном тестовом инструменте Wi-Fi. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://ru.flukenetworks.com/enterprise-network/network-testing/AirCheck-Wi-Fi-Tester#sthash.UNBaDH3A.dpuf>. – Дата доступа : 15.09.2014.

Концептуальная модель генерации VoIP трафика в сети NGN

О.М. ДЕМИДЕНКО, А.И. ХОБНЯ

Предлагается концептуальная модель генерации VoIP трафика в сети нового поколения NGN на основе активности пользователей и работы VoIP протоколов, учитывающая недостатки современных подходов к моделированию генерации VoIP трафика. Также описывается общий подход к моделированию трафика в сетях NGN.

Ключевые слова: сетевой трафик, моделирование, VoIP, NGN.

The conceptual model of VoIP traffic simulation based on users activity and aspects of VoIP protocols in Next Generation Networks (NGN) are presented. This model takes into account the disadvantages of other approaches in this area. Also this paper describes the common approach of traffic simulation in Next Generation Networks is described.

Keywords: network traffic, simulation, VoIP, NGN.

Введение. Одним из важнейших аспектов моделирования сетей NGN является моделирование трафика. Моделирование сетевого трафика используется для исследований при разработке сетевых приложений и для планирования мощностей сетевой инфраструктуры.

Достаточной точностью обладают самоподобные модели сетевого трафика. Однако данные модели имеют существенный недостаток: оценки параметров самоподобия реального сетевого трафика требуют огромных объемов данных и длительных вычислений. Например, один из первых предложенных методов генерации самоподобного трафика требует сходимости тысяч наблюдений. Вейвлет-анализ нескольких разрежений является более эффективным но все еще очень дорогостоящим методом. В более современных исследованиях фиксируются пакетные взаимодействия между различными узлами сети и извлекаются распределения из различных аспектов трафика, а затем моделируется реалистичный трафик с такими же характеристиками. Данные методы могут применяться для моделирования существующих сетей и не подходят для прогнозирования будущих сетевых инфраструктур. Существуют методы, опирающиеся на моделирование работы сетевых приложений и поведения пользователей. Данные методы применяются в т. ч. и для моделирования VoIP трафика. Преимущество данных методов заключается в наличии возможности моделирования работы будущих сетей на основе известных данных внешней среды.

Современные методы моделирования генерации VoIP трафика на основе поведения пользователей и работы сетевых приложений имеют ряд недостатков, влияющих на качество моделирования. Например, некоторые методы не учитывают работу технологии Voice Activity Detection (VAD) [1], применяемой в большинстве современных VoIP протоколов. В других подходах VAD моделируется упрощенно и используются экспоненциальные распределения для генерации интервалов между VoIP вызовами [2], при этом результаты современных исследований статистических данных телефонных сетей представляют более качественные аналитические модели. Большинство методов не учитывает существование возможности осуществления VoIP вызовов с участием более двух пользователей [1], [2], [3].

В данной работе предлагается концептуальная модель генерации VoIP трафика в сети NGN на основе активности пользователей и работы VoIP протоколов, учитывающая обозначенные недостатки.

Необходимые свойства алгоритма имитационного моделирования генерации трафика в сети NGN. Инструментарий имитационного моделирования сетей NGN должен позволять исследовать следующие типы вопросов:

- какая пропускная способность каналов необходима для предоставления определенных NGN сервисов для определенного числа пользователей;
- как увеличение числа пользователей скажется на работе существующей сетевой инфраструктуры;

- как изменение частоты использования определенных сервисов отразится на работе сети;
- как изменение в длительности сеансов использования определенных сервисов повлияет на работу сети;
- какие изменения произойдут в работе сети при использовании нового сервиса.

Чтобы существовала возможность изучения указанных выше вопросов при моделировании сети NGN, алгоритм моделирования генерации трафика должен соответствовать следующим требованиям:

- наличие возможности моделирования различных типов трафика отдельно;
- наличие возможности генерации трафика, обладающего следующими свойствами: реалистичность, отзывчивость, случайность.

Поскольку в сетях NGN различным типам трафика присваивается различный приоритет и различные параметры качества обслуживания (QoS), наличие возможности *раздельного моделирования трафика различных типов* очень важно для точного моделирования работы сети NGN.

Под *реалистичностью* понимается соответствие между характеристиками моделируемого трафика и реального трафика в сети NGN при идентичных внешних условиях. При этом как основные рассматриваются следующие характеристики трафика:

- распределение интервалов времени между прибытиями пакетов;
- распределение размера пакетов;
- количество пакетов и распределение времени доставки пакетов.

Под *отзывчивостью* понимается способность алгоритма изменять характеристики генерируемого им трафика при изменении внешних условий. При этом в числе основных рассматриваются следующие внешние условия:

- частота использования определенных приложений и сервисов;
- характеристики использования определенных приложений и сервисов (длительность VoIP сеанса, размеры передаваемых по FTP файлов и т. д.);
- пропускная ширина канала;

Изменение параметров данных условий должно приводить к соответствующим изменениям характеристик генерируемого моделью трафика.

Под *случайностью* понимается возможность моделирования *множества различных последовательностей* трафика, каждая из которых имеет идентичные характеристики в соответствии с заданными параметрами, не являясь при этом повторением предыдущих последовательностей и не являясь последовательностью, созданной по тем же шаблонам, что и предыдущие. Характеристики трафика в пределах отдельных соединений в данных последовательностях могут существенно различаться. При этом характеристики трафика на достаточно длительном промежутке времени должны быть идентичны для всех сгенерированных последовательностей с идентичными параметрами. Обеспечение максимальной случайности моделируемых событий очень важное требование при построении достаточно точной модели сети.

Общий подход к моделированию трафика в сетях NGN. Основной сложностью при построении реалистичной модели трафика в сети NGN является существование большого числа внешних факторов различной природы, которые влияют на характеристики генерируемого трафика. К данным факторам относятся особенности протоколов передачи данных, характеристики использования отдельных приложений и сервисов, пропускные способности каналов, активность пользователей и т.д. Если объединить факторы одной природы в отдельные компоненты модели, получим общую структуру модели, состоящую из нескольких уровней:

- конечные пользователи;
- сеансы (сессии);
- соединения;
- внутренние события (в пределах одного соединения);
- пакеты.

Данная структура близка к сетевой модели OSI, но содержит меньшее количество уровней. Для моделирования трафика нет необходимости воспроизводить все уровни модели OSI, важно смоделировать те уровни, на которых происходят значимые для характеристик трафика события.

На уровне *конечных пользователей* определяются характеристики использования различных типов приложений. Основными характеристиками являются следующие:

- распределение интервалов времени между использованием определенных типов приложений и сервисов конечными пользователями;
- распределение длительности работы конечных пользователей с различными приложениями и сервисами;
- характеристики и особенности работы конечных пользователей с различными типами приложений (например, распределение размера файлов, передаваемых по FTP, распределение интервалов времени между кликами по ссылкам на web-странице и т. д.).

Стоит учитывать, что конечными пользователями являются не только люди, но и различные приложения, которые работают с сетью автоматически, как фоновые процессы.

Под *сеансом* (или *сессией*) понимается некоторая активность, направленная на выполнение какого-либо конкретного действия высокого уровня (например, загрузка файла по FTP, загрузка web-страницы и т. д.). В пределах одного сеанса может осуществляться более одного сетевого соединения (например, загрузка web-страницы требует запроса для каждого изображения или css-файла, загрузка файла по протоколу BitTorrent может использовать несколько соединений с различными машинами и т. д.). Стоит отметить, что для качественного моделирования распределенных протоколов, таких как BitTorrent, необходимо использовать вероятностный граф реализации вычислительного процесса [4], [5]. Основными характеристиками на уровне сеансов являются следующие:

- количество и распределения длительности соединений;
- распределение интервалов времени между соединениями;
- распределение количества параллельных соединений.

На следующем уровне модели определяются отдельные события, происходящие в рамках одного *соединения* (запросы, ответы и т. д.) и их характеристики:

- распределение вероятностей возникновения того или иного события;
- распределение длительности различных событий.

На уровне *отдельных событий* рассматривается непосредственно генерация пакетов в рамках того или иного события. Количество, скорость передачи и размер пакетов может изменяться в пределах одного события. Это зависит от особенностей того или иного протокола. Основными характеристиками на данном уровне являются следующие:

- распределение размеров пакетов;
- распределение скорости передачи пакетов;
- распределение количества пакетов.

На уровне *отдельных пакетов* учитываются особенности сети, такие как распределение количества потерянных пакетов, время задержки и т. д. Данный уровень должен иметь обратную связь с верхним уровнем модели, т. к. происходящие на нем события оказывают сильное влияние на события более высокого уровня.

Особенности моделирования VoIP трафика. Voice over IP (VoIP) – это группа технологий для голосовой коммуникации и передачи мультимедиа данных через IP сети. VoIP трафик занимает важнейшее место в сетях NGN. Для моделирования реалистичного VoIP трафика необходимо учитывать его основные значимые особенности. Данный тип трафика содержит пакеты как минимум двух типов протоколов: сигнализации и передачи данных реального времени. Протоколы сигнализации (signaling) используются для установления и закрытия соединений, для передачи служебной информации, данных о присутствии и т. д. Протоколы передачи данных реального времени выступают носителями голосовых и видеоданных. Содержащий мультимедиа данные VoIP трафик подвергается сжатию, что влияет на количество и размер передаваемых пакетов и, следовательно, должно учитываться при моделировании. Также все современные VoIP приложения используют VAD (англ. Voice Activity Detection). Механизм VAD позволяет уменьшить необходимое количество передаваемых данных, так как перерывы в речи, которые определяется по уровню сигнала, не кодируются и таким образом пакеты, содержащие только фоновый шум, не передаются по сети. Работу данного механизма стоит учитывать при построении модели, т. к. VAD существенно влияет на характеристики трафика.

Определим факторы, влияющие на характеристики VoIP трафика на каждом из описанных выше уровней. Конечные пользователи используют VoIP приложения для периодического осуществления вызовов. Следовательно, на уровне конечных пользователей необходимо смоделировать последовательности периодических VoIP сеансов. Как правило, в течении одного сеанса осуществляются соединения по протоколу сигнализации и одно соединение по протоколу передачи данных реального времени. Строго соединения могут разрываться в течение одного сеанса, и тогда они будут установлены заново. Однако, технически данная ситуация не отличается значительно от осуществления пользователем нескольких вызовов подряд. Следовательно, нет необходимости выделять отдельный уровень сеансов в модели генерации VoIP трафика. В течение одного вызова на генерацию трафика значительно влияет VAD, следовательно, необходимо моделировать связанные с ним события на уровне соединений. На более низком уровне необходимо учитывать сжатие трафика кодеком. На уровне пакетов следует учитывать общие характеристики каналов связи и QoS, заданный для VoIP трафика на NGN-оборудовании. Обобщив изложенные выше замечания, выделим три уровня модели генерации VoIP трафика:

- VoIP вызовы (сеансы);
- VAD события;
- VoIP пакеты.

Рассмотрим подробнее каждый из уровней.

Моделирование VoIP вызовов (сеансов). Для моделирования периодических VoIP сеансов (вызовов) необходимо определить следующие характеристики:

- распределение продолжительности вызова (VoIP сессии) и его параметры;
- распределение интервалов между вызовами (VoIP сессиями) и его параметры.

Для определения данных характеристик можно взять за основу аналогичные для телефонных сетей с коммутацией каналов. Современные исследования статистических данных звонков в сетях мобильной связи обнаруживают усеченную версию логлогистического распределения продолжительности звонка [6], функция плотности вероятности которого задается уравнением 1, а функция непосредственно распределения – уравнением 2.

$$f(x) = \frac{\exp(z(1 + \sigma) - \mu)}{(\sigma(1 + e^z))^2}, z = (\ln(x) - \mu) / \sigma, \quad (1)$$

$$F(x) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{\ln(x) - \mu}{\sigma}\right)}, \quad (2)$$

Другие исследования в данной области рассматривают логнормальное распределение продолжительности вызова [7], [8]. Распределение плотности вероятности данного распределения задается уравнением 3, а функция распределения – уравнением 4, где Φ – функция стандартного нормального распределения.

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(\ln x - \mu)^2 / 2\sigma^2}, \quad (3)$$

$$F(x) = \Phi\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right), \quad (4)$$

Исследования интервалов между вызовами в телефонных сетях обнаруживают распределение Эрланга- n, k [9], функция плотности вероятности которого задается уравнением 5.

$$f(x) = p\beta^{-n} \frac{t^{n-1}}{(n-1)!} e^{-\frac{t}{\beta}} + (1-p)\beta^{-k} \frac{t^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\frac{t}{\beta}}, \quad (5)$$

Конкретные распределения и их параметры следует задавать, используя характеристики реального трафика. При моделировании будущей NGN сети, которая должна заменить телефонную сеть с коммутацией каналов, можно использовать существующие статистические данные продолжительности и времени вызовов. Если нет доступа к точным данным, можно использовать данные о средней, максимальной и минимальной продолжительности вызова и интервала между вызовами или использовать предполагаемые значения данных величин.

Алгоритм моделирования на данном уровне генерирует события двух типов: начало вызова и завершение вызова. Продолжительность событий берется из соответствующего распределения.

Моделирование событий VAD. Для моделирования событий VAD необходимо определить следующие параметры:

- распределение продолжительности фразы и его параметры;
- распределение интервалов между фразами и его параметры.

Следует учитывать, что в вызове участвует более одного человека, значит, существуют интервалы времени, в которых пользователь только слушает, т. е. получает входящий трафик. В большинстве вызовов участвуют два абонента, но следует учитывать возможность осуществления конференции. Распределение количества участников вызова близко к логарифмическому, т. к. вероятность значительно уменьшается с увеличением количества участников.

Для продолжительности длины фраз достаточно оптимальным выбором является лог-нормальное распределение (плотность вероятности и функция распределения заданы уравнениями 3 и 4 соответственно).

На данном уровне алгоритм моделирования генерирует события трех типов: пауза, разговор текущего пользователя, разговоров иного участника вызова. При этом необходимо также случайным образом выбирать участника, продолжающего разговор следующим. Распределение вероятности выбора того или иного участника может значительно различаться для разных вызовов. Для генерации трафика максимально случайным образом стоит использовать различные распределения со случайными параметрами в пределах определенных интервалов.

Как правило, реальные данные, на основе которых можно вычислить параметры указанных распределений для моделирования VAD, отсутствуют. Поэтому имеет смысл использования большого числа гипотез для данных параметров при моделировании будущей сети NGN.

Моделирование генерации VoIP пакетов. Для моделирования генерации пакетов на низком уровне необходимо определить следующие характеристики:

- размер пакетов;
- скорости передачи пакетов;
- количество пакетов в единицу времени.
- распределение количества потерянных пакетов.

Для определения данных характеристик необходимо учитывать особенности конкретного протокола передачи данных и алгоритма сжатия мультимедиа трафика, а также характеристики сети и канала передачи данных. В таблице 1 определены основные характеристики VoIP-кодеков [10].

Таблица 1 – Характеристики VoIP-кодеков

Кодек	Полезная нагрузка пакета, байт	Скорость передачи, кбит/с	Алгоритмическая задержка, миллисекунд	Занимаемый поток, кбит/с	
				IP-пакеты	Ethernet-фреймы
G.711	160	64	20	78	80
G.723.1 (6.3)	24	6,3	37,5	6,9	17,1
G.723.1 (5.3)	20	5,3	37,5	5,9	16
G.726-32	160	32	20	32,8	42,7
G.726-24	160	24	20	24,8	34,7
G.726-16	160	16	20	16,8	26,7
G.729 (8)	20	8	25	8,8	18,7
G.729 (6.4)	16	6,4	25	7,2	17,1

Данные характеристики можно использовать для моделирования генерации пакетов протокола с определенным кодеком. Следует учитывать, что многие кодеки (например, G.729) имеют фиксированную скорость передачи данных. В некоторых кодеках скорость может изменяться

динамически в зависимости от степени и сжатия. В последних случаях степень сжатия будет колебаться около некоторого постоянного значения и иметь близкое к нормальному распределение. Также следует учитывать, что до определенного количества, потерянные пакеты не переотправляются, т.к. это не приводит к значительному ухудшению качества передаваемого звука. Следует учитывать характеристики канала передачи данных для правильного моделирования скорости доставки пакетов.

Заключение. Описанная концептуальная модель может использоваться для построения симулятора реалистичного, отзывчивого, случайного VoIP трафика для имитационного моделирования сетей NGN. При этом алгоритм моделирования трафика параметризуется как на основе характеристик существующего сетевого трафика, так и с использованием данных о внешних условиях при проектировании будущей сети. Для валидации алгоритма моделирования трафика может быть применен коэффициент Хертца.

Литература

1. Dang, T.D. Fractal analysis and modeling of VoIP traffic / T.D. Dang, B. Sonkoly, S. Molnar // Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium. Networks 2004, 11th International. – 2004. – P. 123–130.
2. De Mattos, C.I. A New Model for VoIP Traffic Generation / C.I. de Mattos, E.P. Ribeiro, C.M. Pedroso // The 7th International Telecommunications Symposium, ITS 2010. – 2010. – P. 1–5.
3. Ji, L. Conversational Model Based VoIP Traffic Generation / L. Ji, X. Yin, X. Shi, Z. Wang // Networking and Services, 2007. ICNS. Third International Conference on. – 2007. – 14 p.
4. Демиденко, О.М. Имитационное моделирование распределенной обработки информации в ЛВС / О.М. Демиденко, И.В. Максимей, С.Ф. Маслович, В.И. Селицкий // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2008. – № 5 (50). – С. 140–143.
5. Быченко, О.В. Имитационные модели режимов обработки информации в ЛВС / О.В. Быченко, О.М. Демиденко, В.Д. Левчук, С.Ф. Маслович, В.И. Селицкий // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2008. – № 5 (50). – С. 3–6.
6. Pedro, O.S. Surprising Patterns for the Call Duration Distribution of Mobile Phone Users / O.S. Pedro, V. de Melo, L. Akoglu, C. Faloutsos, A.A.F. Loureiro // Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. Lecture Notes in Computer Science. – 2010. – P. 354–369.
7. Guo, J. Estimate the Call Duration Distribution Parameters in GSM System Based on K-L Divergence Method / J. Guo, F. Liu, Z. Zhu // Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. – 2007. – P. 2988–2991.
8. Seshadri, M. Mobile Call Graphs : Beyond Power-Law and Lognormal Distributions / M. Seshadri, S. Machiraju, A. Sridharan [etc.] // Proceedings of the 14th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining. – 2008. – P. 596–604.
9. Pattavina, A. Modelling voice call interarrival and holding time distributions in mobile networks / A. Pattavina, A. Parini // Teletraffic Science And Engineering. – 2005. – № 6a. – P. 729–738.
10. Филимонов, А.Ю. Построение мультисервисных сетей Ethernet / А.Ю. Филимонов. – С-Пб. : БХВ-Петербург, 2007. – 592 с.

УДК 519.174-047.58

Вероятностно-алгебраические модели технологических систем производства с элементами потенциальной опасности

Ю.В. ЖЕРДЕЦКИЙ

Описываются взаимно-дополняющие вероятностно-алгебраические модели технологических систем производства с элементами потенциальной опасности. Модели учитывают структурную сложность технологического процесса, реализуют точные вероятностные характеристики надёжности исследуемой системы по вероятностным характеристикам надёжности их элементов.

Ключевые слова: надёжность, риск, технологические операции, вероятностно-алгебраическая модель.

The mutually complementary probability-algebraic models of technological production systems with elements of potential risk are described. Models take into account the structural complexity of technological process, implement accurate probabilistic characteristics of system reliability according to probabilistic reliability characteristics of its elements.

Keywords: reliability, risk, technological operations, probability-algebraic model.

Введение. Технологические системы производства (ТСП) относятся к классу сложных систем, которые, как правило, можно представить в виде графовых структур. Наличие потенциально опасных элементов в составе ТСП требует использования автоматизированных систем управления в виде человеко-машинных систем, обеспечивающих надёжное функционирование подобных объектов путём автоматизации самих технологических процессов производства и интеллектуальной поддержки процессов управления с использованием разнообразных структурных подходов и математических моделей. Структурный анализ позволяет получить заключение о структурных свойствах ТСП в целом и основных ее подсистем, исходя из заданного описания элементов системы и непосредственных связей между ними. Математическое моделирование направлено на более глубокое изучение объектов с учётом особенностей их функционирования как на стадии их проектирования, так и в ходе их эксплуатации.

Интерес представляют математические модели, учитывающие вероятностную природу процессов ТСП. Это, в первую очередь, имитационные модели, позволяющие на высоком уровне детализации изучить поведение объекта в динамике, выявить его «узкие места», выбрать рациональный вариант их организации [1]. На их основе для ТСП с переменной структурой возможна реализация метода пошаговой реструктуризации, который в ряде случаев позволяет решить классическую проблему синтеза оптимальных систем [2]. Ограничениями применения имитационных моделей является большая ресурсоемкость моделирования и возможность получения лишь приближённого решения, что в ряде случаев затрудняет выбор решения при управлении ТСП с элементами потенциальной опасности.

В статье предлагается взаимнодополняющие вероятностно-алгебраические модели, анализирующие ТСП на разных уровнях детализации технологического процесса, учитывающие сложность его структурной организации и позволяющие оценить степень влияния потенциальноопасных элементов ТСП на надёжность функционирования системы в целом. Первая модель позволяет описать ТСП с простой структурной организацией, для которых возможно представление технологического процесса в виде упорядоченной структуры технологических операций, реализуемых последовательно или параллельно. Вторая модель имеет целью детальное исследование ТХО, выполнение которых реализуется совокупностью микротехнологических операций (МТХО), взаимосвязи между которыми представляются структурно-сложным графом.

Рассмотрение ТСП на разных уровнях детализации с использованием набора моделей, имеющих теоретическое обоснование в виде стохастических алгебр [3], позволяет оперативно

провести точные расчёты вероятностных характеристик надёжности исследуемых объектов, оценить изменения вероятностного поведения системы в результате отказа составляющих её ТХО, выявить ТХО, приводящих к авариям на системном уровне.

Описание объекта исследования. Объектом исследования является ТСП, включающая в качестве структурных элементов упорядоченные ТХО, при выполнении которых задействовано оборудование, предполагаемое число исполнителей и имеющиеся материалы. При рассмотрении технологического производственного процесса следует учитывать, что ТХО имеют вероятностные времена выполнения, зависящие от множества случайных факторов: интенсивности входного потока, обеспеченности необходимыми ресурсами, влияния внешней среды и др. Часть ТХО, нарушения в выполнении которых могут снижать надёжность ТСП, а в предельном случае приводить к чрезвычайным ситуациям и опасным авариям, по ряду признаков можно отнести к элементам потенциальной опасности.

С надёжностью напрямую связана эффективность организации технологического производственного процесса, критерием которой может являться время и/или стоимость выполнения взаимосвязанных ТХО. Для оценки эффективности ТСП выделяются состояния, характеризующие время и/или стоимость выполнения технологических операций, а по эмпирическим данным устанавливаются вероятности выделенных состояний. Поскольку сбой в реализации одной из операций влечёт за собой последовательные сбои множества других технологических операций, то время и стоимость реализации технологического производственного процесса значительно возрастают, а эффективность работы ТСП снижается. При снижении надёжности функционирования ТСП время и стоимость её функционирования могут значительно превосходить установленные предельные значения и в этом смысле свидетельствовать об аварийном функционировании системы.

Для оценки надёжности ТСП предлагается использовать аппарат вероятностно-алгебраического моделирования и универсальную схему формализации [4], в которой исходные данные представляются в виде векторов вида:

$$P^i = (p_0^i, p_1^i, \dots, p_n^i), \sum_{j=1}^n p_j^i = 1, i = \overline{1, m}, \quad (1)$$

Вектора (1) определяют вероятности состояний надёжности элементов ТСП. Результат моделирования представляется в виде вектора вероятностей состояний надёжности ТСП, имеющего вид:

$$P^s = (p_0^s, p_1^s, \dots, p_n^s), \sum_{j=0}^n p_j^s = 1., \quad (2)$$

Он характеризует вероятности состояний надёжности всей ТСП. С позиций надёжности ТСП может находиться в следующих состояниях: работоспособное, неработоспособное и предельное. Работоспособное состояние – это состояние объекта (элемента, системы), при котором значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции, соответствует требованиям нормативно-технической документации, в которой отражены количественные значения параметров, а также их допустимые пределы изменения. Состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической документации, называется неработоспособным. Предельное состояние обусловлено физической невозможностью дальнейшей эксплуатации ТСП, либо недопустимым снижением его эффективности, либо требованиями безопасности и определяется установленным критерием предельного состояния. Критерий предельного состояния объекта представляет собой признак или совокупность признаков, установленные нормативно-технической документацией. К типичным критериям предельных состояний можно отнести:

– отказ при выполнении одной или нескольких ТХО, восстановление или перезапуск которых не предусмотрен в процессе функционирования ТСП;

– механический износ ответственных деталей оборудования, задействованного при выполнении ТХО, до предельно допустимого уровня;

– снижение наработки на отказ (повышение интенсивности отказов) ниже (выше) допустимого уровня. Все они определяют экономическую нецелесообразность дальнейшей эксплуатации ТСП.

Предложенный в [4] способ формализации ориентирован на выявление вероятностных предельных значений надёжности анализируемых объектов, определяющих их опасные состояния, в результате сбоев в ходе реализации технологического цикла производственной системы.

Вероятностно-алгебраическая модель ТСП простой графовой структуры. На рисунке 1 представлен пример графа ТСП, включающей совокупность технологических операций, однотипным образом представленных в модели элементами $ТХО = \{ТХО_i\}, i = \overline{1, 52}$. Представленный объект исследования при незначительном упрощении (исключении участка С) может быть отнесён к классу систем простой графовой структуры, а для оценки его вероятностных характеристик может быть использован метод вероятностно-алгебраического моделирования [5], не имеющий ограничений на число элементов сетевой структуры и число состояний его элементов.

Если в качестве характеристики надёжности рассматривается время/стоимость безотказного функционирования ТСП, вероятностным образом зависящее от вероятности безотказного выполнения совокупности ТХО, то j -ый элемент вектора (1) указывает на вероятность выполнения технологической операции в пределах j -го интервала времени/стоимости. Второй аспект при оценке надёжности организации ТСП предполагает учёт вероятностей возможных отказов, возникающих в ходе выполнения ТХО (с классификацией и ранжированием их по типам в зависимости от причины отказа и/или степени опасности). Первые элементы p_0^i векторов (1) определяют вероятность безотказного выполнения i -ой ТХО, остальные указывают на вероятности отказов j -ых типов, упорядоченных по степени возрастания опасности отказов соответствующих i -ых ТХО. В этом смысле n -ый элемент вектора (1) определяет вероятность наиболее опасного отказа, возникающего при выполнении ТХО.

Для описания связей между ТХО используются функции, определяющие коэффициенты вероятностно-алгебраического умножения, однозначно позволяющие рассчитать вероятностные характеристики всей подсистемы (2) на основе известных значений векторов вида (1).

При исследовании надёжности выполнения технологического производственного цикла для описания ТХО, реализуемых последовательно, используются функции вида $F_1(i, j) = \max(i, j)$. Такой выбор функции означает, что при выполнении совокупности последовательных отказ происходит в результате отказа наименее надёжной ТХО. Такой технологической операцией является ТХО из множества $\{ТХО_i\}$, которая находится в состоянии с максимальным номером, определяющим её показатель надёжности. Для описания ТХО, реализуемых параллельно используются функции вида $F_2(i, j) = \min(i, j)$. Это означает, что при одновременном выполнении цепочек параллельных технологических операций $\{ТХО_5-ТХО_8; ТХО_{34}-ТХО_{38}; ТХО_{44}-ТХО_{48}\}$ отказ происходит только в случае отказа самой надёжной ТХО. Такой ТХО является та из множества $\{ТХО_i\}$, которая находится в состоянии с минимальным номером. Для расчёта участков, на которых реализуется выполнение совокупности ТХО с резервированием по схеме мажоритарной логики $\{ТХО_{50}-ТХО_{52}\}$, использование функции вида $F_3(i, j, l)_{2/3} = [(i + j + l - \min(i, j, l)) / 2]$ означает, что при одновременном выполнении множества $\{ТХО_i\}$, участок надёжен, если выполняются как минимум две из трёх ТХО.

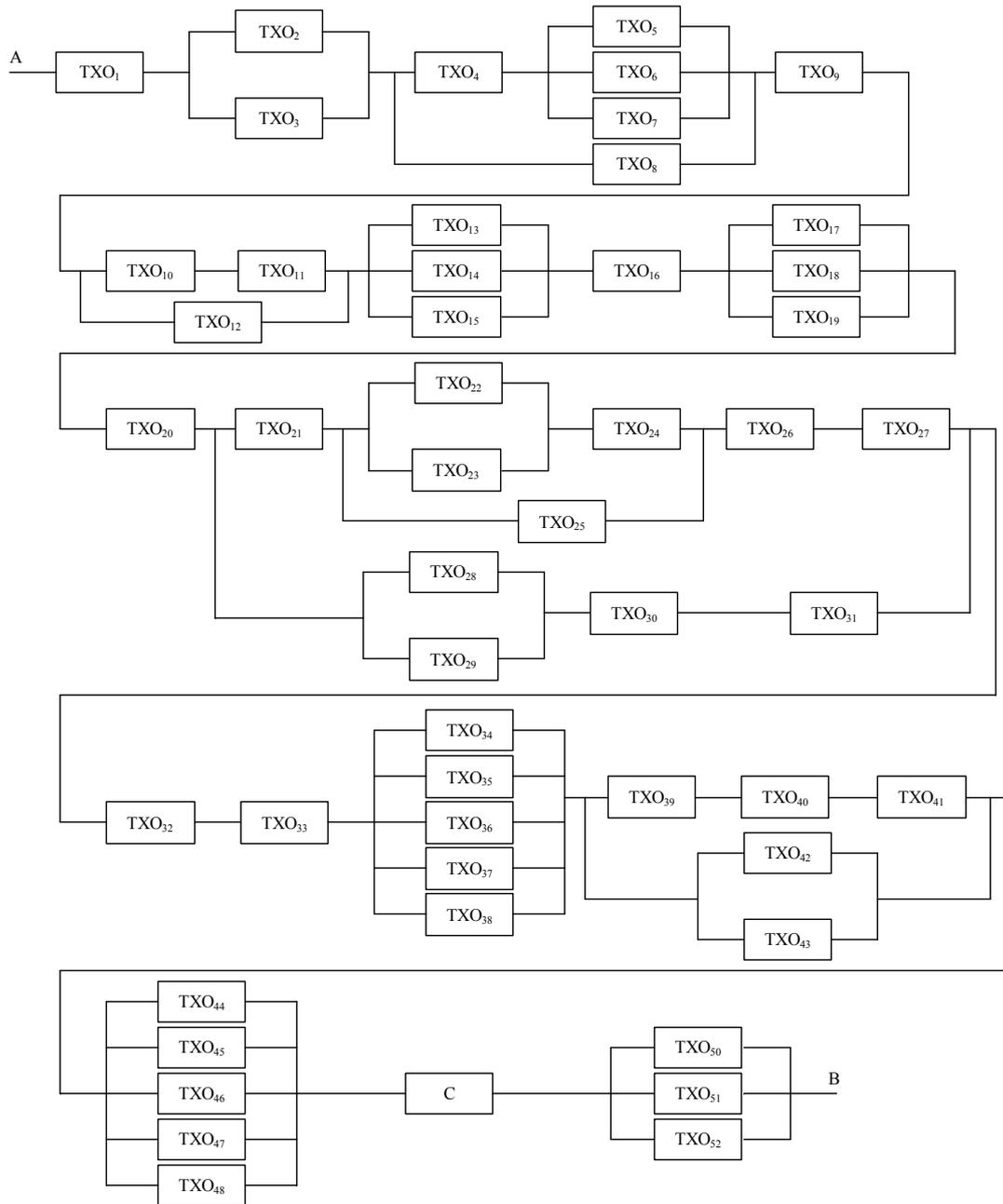


Рисунок 1 – Структура технологической системы производства с выделением отдельных технологических операций в её составе

Переход к оценке времени/стоимости организации ТСП осуществляется путём изменения функций, определяющих коэффициенты ВАЛМ, и обновлением значений векторов вероятностей (1) в соответствии с выбранной семантикой. В этом случае для определения оценки времени/стоимости ТХО, реализуемых последовательно используются функции вида $F_4(i, j) = \min(i + j - 1, n)$. Это означает, что при выполнении цепочки последовательных ТХО из множества $\{ТХО_i\}$ происходит суммирование значений времени/стоимости их выполнения с одновременным формированием интегральных значений вероятностей этой величины. При оценке вероятностных характеристик времени/стоимости последовательности ТХО, реализуемых параллельно, реализуется вероятностно-алгебраическое умножение с использованием коэффициентов, вычисленных по функции $F_1(i, j) = \max(i, j)$. То есть при выполнении операций ТХО, реализующих однотипные функциональные действия, результирующим состоянием является состояние с максимальным номером, указывающим на максимальный расход времени/стоимости при реализации однотипных ТХО.

Поскольку модель параметризована, то переход к оценке альтернативных свойств исследуемого объекта полностью автоматизирован за счёт выбора соответствующих функций вероятностно-алгебраического моделирования.

Вероятностно-алгебраическая модель ТСП структурно-сложной организации. Поскольку метод ВАЛМ поддерживает многоступенчатое моделирование, то для схемы ТСП, представленной на рисунке 1, возможно детальное рассмотрение работы участка С, имеющего структурно-сложную организацию (рисунок 2).

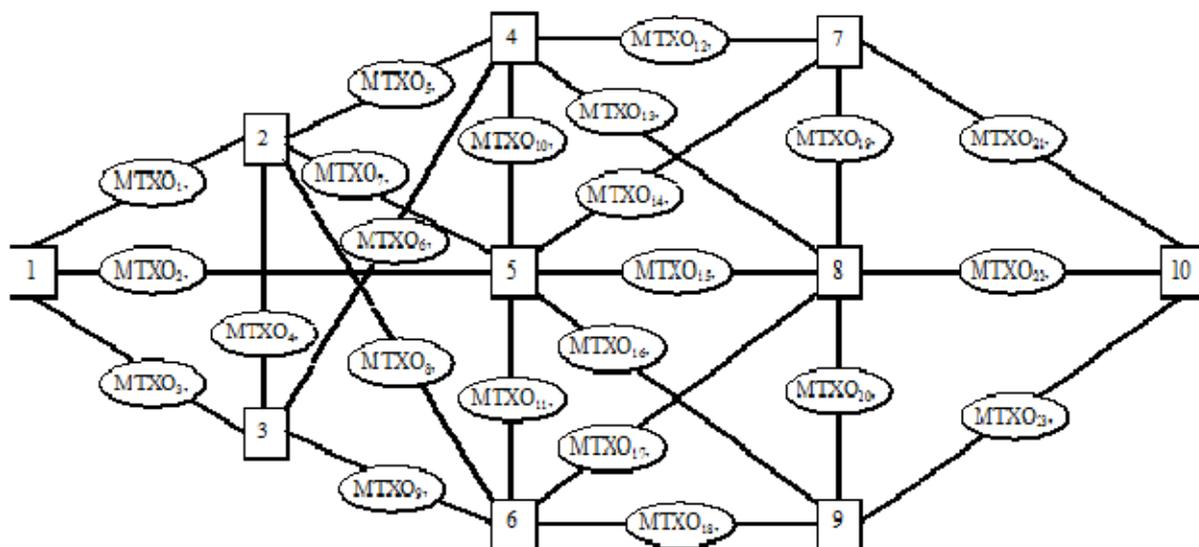


Рисунок 2 – Детальная схема участка (С) технологической системы производства структурно-сложной организации

На рисунке 2 представлена совокупность микротехнологических операций $МТХО = \{МТХО_i\}, i = \overline{1, 23}$, упорядоченное выполнение которых обеспечивает реализацию технологической операции С. Вид схемы участка (наличие множественных связей между МТХО; сложная последовательность выполнения МТХО) позволяет отнести его к классу структурно-сложных систем и использовать методику расчёта вероятностных характеристик их надёжности [6].

Исходной информацией для моделирования являются экспертные оценки специалистов технологов, полученные с учетом накопленной статистики по времени выполнения ТХО и их отказам, возникающим в ходе многократной реализации технологического цикла ТСП в условиях предполагаемого объема материальных ресурсов и имеющегося оборудования. В результате обработки этих данных формируются значения векторов вероятностей состояний надёжности элементов (1) вероятностно-алгебраической модели исследуемой ТСП. Поскольку модель параметризована, то варьирование параметров в заданных пределах позволит оценить их влияние на изменение надёжности организации системы и подобрать те из них, которые обеспечивают наиболее надёжный вариант организации ТСП с учётом выбранного критерия.

Заключение. Использование предложенных моделей в качестве основного звена системы управления ТСП позволит организовать оперативное управление организацией ТСП в реальном масштабе времени и управление её развитием с целью обеспечения заданного уровня надёжности её функционирования при наличии потенциально опасных элементов (ТХО), обеспечивающего наилучшие экономические показатели реализации производственного процесса и прибыль. Очевидно, что оперативное управление ТСП и управление на перспективу взаимосвязаны. В случаях отставания темпов совершенствования ТСП от увеличения её нагрузки и развития передовых технологий реализации производственного процесса система будет работать со сбоями, задержками выполнения ТХО. Как следствие, оперативное управление технологическим процессом будет усложняться. С другой стороны, поиск наилучших решений развития ТСП не возможен без анализа множества реальных оперативных ситуаций, определяющих многовариантность этого развития.

В обоих случаях модели позволят решить типовые задачи моделирования:

- анализ надёжности структурной организации ТСП с рассмотрением различных вариантов логических схем, обеспечивающих резервирование ТХО;
- оценка изменения надёжности организации ТСП в результате изменения параметров надёжности их элементов;
- выявления «узких мест» в процессе функционирования ТСП;
- расчёт параметров надёжности элементов, обеспечивающих заданный уровень надёжности и безопасности ТСП для заданной структурной организации.

Литература

1. Максимей, И.В. Имитационные модели случайных технологических процессов опасных производств / И.В. Максимей, В.С. Смородин, Е.И. Сукач // Системні дослідження та інформаційні технології (System Research&Information Technologies). – 2005. – № 3. – С. 73–87.
2. Смородин, В.С. Метод пошаговой реструктуризации имитационных моделей для исследования вероятностных технологических процессов / В.С. Смородин // Математичні машини і системи (Mathematical Machines and Systems). – 2008. – № 3. – С. 108–114.
3. Сукач, Е.И. Метод вероятностно-алгебраического моделирования надёжности структурно-сложных систем большой размерности / Е.И. Сукач // Математические машины и системы. – 2014. – № 1. – С. 195–200.
4. Сукач, Е.И. Способ формализации объектов графовой структуры с вероятностными параметрами функционирования / Е.И. Сукач, Д.В. Ратобыльская, Ю.В. Жердецкий, Г.А. Мальцева // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2012. – № 5 (74). – С. 195–202.
5. Демиденко, О.М. Анализ надёжности электроэнергетических систем на основе вероятностно-алгебраического моделирования / О.М. Демиденко, Е.И. Сукач, Д.В. Ратобыльская, Ю.В. Жердецкий // Проблемы физики, математики и техники. – 2014. – № 2 (13). – С. 87–94.
6. Жердецкий, Ю.В. Методика расчёта надёжности многокомпонентных структурно-сложных систем со многими состояниями / Ю.В. Жердецкий, Г.А. Мальцева // Сб. науч. статей «Творчество молодых». – ГГУ им. Ф. Скорины. – Гомель, 2013. – С.111-114.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 14.11.2014

Аналитический метод определения несущей способности свай-РИТ в грунтовом основании

Д.В. ПРОКОПЕНКО, В.Е. БЫХОВЦЕВ, С.В. КИРГИНЦЕВА

Предлагается оригинальный аналитический метод определения несущей способности свай, устроенных с применением резонансно-импульсной технологии (свай-РИТ) в грунтовом основании при учёте его уплотнения в области камуфлетного уширения.

Ключевые слова: свая-РИТ, аналитический метод, грунтовое основание, уплотнение грунта.

The original analytical method of definition of bearing the ability of the piles arranged with application of resonance-pulse technology (CIT-pile) in the soil basis is offered at the account of its consolidation in area kamufletny broadening.

Keywords: CIT-pile, analytical method, soil basis, ground consolidation.

Введение. В строительной практике расчёт фундаментов зданий, согласно существующим строительным нормам и правилам (СНиП), должен производиться по двум предельным состояниям: по несущей способности и по деформациям. В СНиП предлагаются соответствующие методики, основанные на обширном табличном материале и приближённых формулах. При таком подходе изменённое состояние грунтовых оснований и некоторые конструктивные особенности фундаментов учитываются недостаточно. В настоящей работе рассматриваются фундаменты на основе свай сложной конфигурации, которые устроены с применением резонансно-импульсной технологии. При этом в грунтовом основании в области камуфлетного уширения образуется уплотнённая зона, размеры которой зависят от первичных характеристик грунта и от силы взрыва. В целом образующееся уширение и уплотнённая зона грунта, примыкающая к уширению, значительно повышают несущую способность свай-РИТ. Для расчёта таких свай по несущей способности (по первому предельному состоянию) предлагается оригинальный аналитический метод, учитывающий указанные особенности РИТ-свай и её грунтового основания как единой физической системы, что, в целом, позволяет значительно повысить точность определения несущей способности свай длиной L , с радиусом ствола r_c и с радиусом камуфлетного уширения r_y .

Технология изготовления свай-РИТ. Сущность разрядно-импульсной технологии изготовления свай заключается в следующем: по соответствующей технологии в грунт на расчётную глубину опускается обсадная труба с встроенными на конце трубы электродами. Обсадная труба заполняется бетоном. При подаче высокого напряжения на электроды, погруженные в бетонную смесь, происходит пробой межэлектродного промежутка с взрывообразным преобразованием электрической энергии. В результате серии электровзрывов в зоне разряда ствол сваи приобретает увеличенный объем, который заполняется бетоном и, вследствие этого, на конце сваи образуется камуфлетное уширение, которое обеспечивает работу сваи с грунтом как единой геотехнической системы.

Испытания свай-РИТ по несущей способности грунтового основания подтверждают их высокую несущую способность в сравнении с другими сваями равного диаметра и длины.

Деформирование грунтового основания одиночной свай-РИТ. По технологии устройства РИТ-сваю можно классифицировать как буронабивную. Поэтому при действии вертикальной нагрузки на сваю по всей её контактной поверхности проскальзывание будет отсутствовать. В силу этого несущая способность РИТ-свай будет определяться несущей способностью контактной поверхности ствола сваи P_c и камуфлетного уширения P_y .

$$P = P_c + P_y, \quad (1)$$

Проведенными ранее экспериментальными и теоретическими исследованиями различными специалистами показано, что в области грунта, примыкающего к боковой поверхности

сваи, при условии линейного и нелинейного деформирования, существует телескопический сдвиг [1]. Методом вычислительного эксперимента показано, что при телескопическом сдвиге с достаточной для практических целей точностью можно принять

$$U = 0, W = f(r), \quad (2)$$

U, W – горизонтальная и вертикальная компоненты вектора перемещения в цилиндрической системе координат с осями r, z .

$$\text{Из (2) следует} \quad \varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \varepsilon_z = 0; \quad \gamma_{rz} = \frac{\partial W}{\partial r}, \quad (3)$$

При условиях (2) и (3) уравнения равновесия рассматриваемой физической системы можно представить только одним уравнением

$$\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} = 0,$$

или в более компактной форме

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial W}{\partial r} \right) = 0, \quad (4)$$

Из (4) следует $r \frac{\partial W}{\partial r} = c_1$, следовательно

$$\frac{\partial W}{\partial r} = \frac{c_1}{r}, \quad (5)$$

Несущая способность боковой поверхности сваи. Несущая способность боковой поверхности сваи определяется уравнением

$$P_\sigma = 2\pi r_c \int_0^L \tau_{rz} dh, \quad (6)$$

При условиях (3) и (5)

$$\tau_{rz} = G \gamma_{rz} = G \frac{\partial W}{\partial r} = G \frac{c_1}{r}, \quad (7)$$

следовательно,

$$P_\sigma = 2\pi r \int_0^L G \frac{c_1}{r} dh = 2\pi G L c_1, \quad (8)$$

По закону Кулона:

$$\tau_{np} = c + \sigma_{np} \operatorname{tg} \phi, \quad (9)$$

где c, ϕ, σ_{np} – нормативные характеристики грунтов: сцепление, угол внутреннего трения и предельное нормальное напряжение;

τ_{np} – предельное касательное напряжение в грунте.

Рассматривая совместно соотношения (7–9) для определения несущей способности боковой поверхности сваи получим следующее выражение:

$$P_\sigma = 2\pi r_c L (c + \sigma_{np} \operatorname{tg} \phi), \quad (10)$$

Несущая способность камуфлетного уширения сваи. При устройстве сваи-РИТ происходит уплотнение грунта только в области камуфлетного уширения. Несущая способность уплотнённого грунта будет максимальной в контактной поверхности, постепенно убывая до её начального значения. В настоящем исследовании математическая модель несущей способности уплотнённого грунта принята в виде степенной функции гиперболического типа:

$$\{ y = ax^n, a > 0, n < 0 \}, \quad (11)$$

В соответствии с (11) механико-математическая модель предельного нормального напряжения в уплотнённой зоне грунта будет иметь вид:

$$\sigma_{np} = ar^k, \quad a > 0, \quad k < 0, \quad r_c < r < r_{\max}, \quad (12)$$

где r_{\max} – радиус зоны уплотнения;

σ_{np} – предельное нормальное напряжение грунта.

Поставим в соответствие зоне уплотнения некоторое эквивалентное по несущей способности однородное грунтовое основание с предельным нормальным напряжением $\sigma_{np.y}$.

Потенциал несущей способности этой зоны будет:

$$W_{\text{экс}} = \sigma_{np.y} (r_{\max} - r_y), \quad (13)$$

Считая, что уплотнение происходит по гиперболическому закону (12), получим:

$$W_{\text{зун}} = \int_{r_y}^{r_{\max}} ar^k dr = \frac{a}{1+k} (r_{\max}^{k+1} - r_y^{k+1}), \quad (14)$$

Из условия построения эквивалентного грунтового основания следует

$$\sigma_{np.y} (r_{\max} - r_y) = \frac{a}{1+k} (r_{\max}^{k+1} - r_y^{k+1}), \quad (15)$$

откуда следует:

$$\sigma_{np.y} = \frac{a}{1+k} \frac{r_{\max}^{k+1} - r_y^{k+1}}{r_{\max} - r_y}, \quad (16)$$

После несложных преобразований получим:

$$\sigma_{np.y} = \frac{\sigma_{np}}{1+k} \frac{r_{\max}}{r_{\max} - r_y}, \quad (17)$$

Несущую способность камуфлетного уширения основания сваи-РИТ при учёте уплотнения, учитывая (17), получим по формуле:

$$P_y = 2\pi \int_0^{r_y} \sigma_{np.y} \cdot r dr = \pi r_y^2 \frac{\sigma_{np}}{1+k} \frac{r_{\max}}{r_{\max} - r_y}, \quad (18)$$

где $\sigma_{np.y}$ – предельное нормальное напряжение уплотнённого грунта;

k – коэффициент зависящий от характеристик грунта и сваи [3]:

$$k = -\mu_0 \frac{r_{\max} - r_y}{r_{\max}}$$

Таким образом, для расчёта сваи-РИТ по несущей способности (по первому предельному состоянию) получаем следующую формулу:

$$P = 2\pi r_c L (c + \sigma_{np} \operatorname{tg} \phi) + \pi r_y^2 \frac{\sigma_{np}}{1+k} \frac{r_{\max}}{r_{\max} - r_y}, \quad (19)$$

Покажем расчёт сваи-РИТ по несущей способности (по первому предельному состоянию) по разработанному методу на примере конкретной задачи. Для этого воспользуемся экспериментальными данными для свай-РИТ, представленными в работе О.В. Козуновой [2].

Численный анализ несущей способности РИТ-свай. Оценку полученного аналитического решения покажем на примере реальной задачи (результаты испытания сваи-РИТ [2]): грунтовые условия, характеристики сваи-РИТ, объект, на котором установлена свая-РИТ и результаты определения несущей способности, полученные методом натурного эксперимента и по аналитическому решению, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчет несущей способности свай-РИТ

№	Объект	Характеристики свай-РИТ	Грунтовые условия	Расчетная НС по СНиП, т	Нагрузка эксп.	$S_{\text{эксп. см.}}$	Аналитич. НС, т	$S_{\text{в. см.}}$
1	Б. Знаменский пер., д. 23, свайный фундамент 10-ти этажного корпуса	d=250 мм, L=15,2 м	Пески м., ср. пл., сугл. теку-чепл.	92	120	0.41	131	0.46
2	ул. Остоженка, вл. 35, свайное основание	d=250 мм, L=11,5 м	Пески м.ср. пл., песок ср. кр., в/нас	90	110	0.68	150	0.78

где $S_{\text{эксп}}$ – осадка свай-РИТ, полученная в эксперименте;

$S_{\text{в}}$ – осадка свай-РИТ, полученная по компьютерному моделированию при действии максимально допустимой нагрузки на сваю, рассчитанной по предложенной аналитической формуле (19).

В таблице 1 приведен расчет несущей способности свай-РИТ по нормативным материалам и по разработанному аналитическому методу, осадки свай-РИТ, полученные с помощью эксперимента и компьютерного моделирования.

Из таблицы видно, что осадки, полученные экспериментально и при компьютерном моделировании, близки, несущая способность, полученная с помощью аналитической формулы, превышает несущую способность, рассчитанную по формулам, приведенным в СНиП. Эта разница обуславливается тем, что формулы СНиП-а не учитывают нелинейность деформирования грунтового основания и уплотнение грунта вокруг камуфлетного уширения, образованное вследствие электровзрыва. Доказательством этого является пример, когда на сваю-РИТ подается нагрузка, которая превышает несущую способность, рассчитанную по рекомендациям СНиП в 1.25–1.3 раза (см. таблицу 1).

Литература

1. Быховцев, В.Е. Компьютерное объектно-ориентированное моделирование нелинейных систем деформируемых твердых тел / В.Е. Быховцев – Гомель : УО «ГГУ им. Ф. Скорины», 2007. – 219 с.
2. Невейков, А.Н. Свая, изготовленная по разрядно-импульсной технологии, свая нового поколения с уширениями в Республике Беларусь [Электронный ресурс] / А.Н. Невейков, О.В. Козунова // ОАО «Буровая компания «Дельта». Режим доступа : http://belniis.by/sites/default/files/neveykov_a.n._kozunova_o.v._svaya_rit.pdf.
3. Быховцев, В.Е. Приближенный аналитический метод определения осадки винтовой сваи в нелинейно-деформируемом грунтовом основании с учетом его уплотнения / В.Е. Быховцев, Д.В. Прокопенко // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2012. – № 6 (75) – С. 110–114.

Технология автоматизированного вероятностно-алгебраического моделирования систем сетевого типа

Д.В. РАТОБЫЛЬСКАЯ

Представлена технология автоматизированного вероятностно-алгебраического моделирования систем сетевого типа, при оценке надежности и эффективности их функционирования.

Ключевые слова: вероятностно-алгебраическое моделирование, система сетевого типа, надежность, эффективность, производительность.

The technique of automated probabilistic algebraic modeling of the net line system while evaluating reliability, efficiency functioning are presented.

Keywords: probabilistic algebraic modeling, net line system, reliability, efficiency, productivity.

Введение. Метод вероятностно-алгебраического моделирования (ВАЛМ), разработанный для исследования систем сетевого типа (ССТ), позволяет проводить анализ состава и структуры объектов с позиций оценки надежности и эффективности их функционирования. Базу метода составляют стохастические алгебры [1]. Метод применим при исследовании систем сетевого типа с учетом выделения двух и более несовместных состояний их элементов. Он позволяет поддерживать концепцию иерархического и сетевого моделирования. Расчет выходных параметров моделирования ВАЛМ реализуется точными преобразованиями, что позволяет избежать погрешностей вычислений, связанных с процессом имитации.

Метод ВАЛМ в общем виде включает этапы формализации, построения вероятностно-алгебраической модели, определения расчетных вероятностных формул, анализа полученных результатов и эксплуатации вероятностных моделей. Автоматизация этапов ВАЛМ для ССТ является единственным способом практического решения проблем трудоемкости и размерности вычислений в ходе расчета вероятностных характеристик систем. С целью детализации применения метода в работе представлена технология автоматизации его основных этапов, реализуемая программными системы моделирования Probability Algebraic Simulation (PALS) [2].

Определение объекта исследования. К *системам сетевого типа* (ССТ) отнесем сложные системы с обобщенной сетевой и/или иерархической структурой. Сложная система представляет собой составной объект, части которого можно рассматривать как подсистемы, объединенные в единое целое в соответствии с определенными принципами или связанные между собой заданными отношениями.

Структурно-простые системы (СПС) при математическом описании сводятся к последовательно-параллельным или древовидным структурам. Сложность таких систем, как объекта исследования связывают со сложностью реализуемых между элементами системы функциональных связей и наличием управляющих внешних воздействий на систему.

Под *структурно-сложными системами* (ССС) будем понимать системы, которые при математическом описании не сводятся к последовательным, параллельным или древовидным структурам, описываются сценариями сетевого типа с циклами и неустранимой повторностью аргументов при их формализации [3].

Сетевая структурная схема предполагает представление системы в виде графа. С помощью сетевых структур отображаются пространственные взаимосвязи между элементами, как правило, одного иерархического уровня детализации объекта исследования. *Обобщенная сетевая структура* может содержать древовидную и кольцевую структуры, характеризуется многочисленными межэлементными связями. *Иерархические структуры* представляют декомпозицию системы в пространстве и предполагают наличие связей, реализующих отношения подчинения.

В качестве *параметров оценки ССТ* используются показатели надежности и эффективности функционирования системы. Выбор обусловлен практической значимостью, и актуальность решения задач обеспечения надежности и безопасности ССТ, вместе с задачами обеспечения эффективности, занимает ключевые позиции при принятии управленческих решений на этапах проектирования и эксплуатации сложных технических систем.

Показатели надежности разделим на количественные и качественные. Первые позволяют оценить надежность, безопасность, отказоустойчивость и время наработки на отказ для всей системы. Вторые характеризуют структуру системы с точки зрения влияния отдельных элементов системы на надежность: вес, значимость, вклад.

В качестве общего показателя *эффективности* функционирования определим вероятностный показатель пропускной способности, который выражает отношение объема единиц (информации, транспортных), фактически проходящих через контрольную точку, канал, узел системы (информационной, транспортной), в единицу времени к величине максимального потока для заданного участка системы.

Формализация систем сетевого типа. В основу формализации ССТ положен способ представления системы в виде связного графа без петель либо реберного графа. Базу формализации составляет декомпозиция объекта согласно задачам исследования и требуемому уровню детализации. Разделение системы на подсистемы, подсистемы на более простые структурные части производится до выделения структур, не подлежащих дальнейшему дроблению и позволяющих однозначно определить значения параметров и переменных модели. Подобные структуры называют *элементами*.

В случае исследования системы, имеющей явно выраженную графовую структуру [4], выбор состава элементов системы определяется целью исследования, проводится по функциональному или конструктивному признаку и не является сложной задачей. Функциональные связи между элементами устанавливаются с учетом реального взаимного расположения объектов в исследуемой системе и в соответствии с решаемой задачей. При формализации функционально-сложных систем (сценарии опасного состояния) необходимо выделение существенных и исключение тривиальных связей.

Пусть система представлена совокупностью элементов $K_i, i = \overline{1, n}$. Для каждого из выделенных элементов и всей системы в целом выделены m несовместных состояний. Состояния могут характеризовать различные уровни износа элементов, соответствовать различным видам отказов или определять возможные значения исследуемого свойства. Количество элементов и состояний определяются уровнем детализации исследования. Это могут быть как неделимые элементы, представляющие собой самый высокий уровень детализации, так и подсистемы. Каждый из выделенных элементов характеризуется численным значением совокупности параметров, изменение которого определяет переход из одного выделенного состояния в другое.

В начальный момент времени моделирования каждый из элементов системы может с заданной вероятностью $p^i = (p_1^i \dots p_m^i)$ находиться в одном из выделенных состояний $S_j, j = \overline{1, m}$.

При исследовании динамики развития ССТ законы распределения, определяющие изменения векторов вероятностей. При этом предполагается, что система функционирует циклически и за определенный интервал времени выполняет некоторую функцию.

Связи между элементами системы зависят от решаемой задачи. Формализуются с учетом отношений между элементами на этапе декомпозиции и задаются набором функций $F_l, l = \overline{1, z}$. Функции могут быть детерминированными и стохастическими [4], [5].

Ставится задача определения вектора вероятностей состояний исследуемого свойства системы по вероятностным значениям исследуемых свойств ее элементов:

$$P^s = (p_1^s \dots p_m^s), \sum_{i=1}^m p_i^s = 1 \quad (1)$$

Выделенные элементы и функциональные связи задают структуру исследуемой системы, вероятностные характеристики элементов являются параметрами расчетных вероятностно-алгебраических моделей, вероятностные характеристики всей системы – откликами моделирования.

Для структурно-сложных систем возможны два варианта формирования графической модели системы:

1. Схема формализации реберным графом. Выделенным элементам сопоставляются ребра графа, а вершины определяют места связи и варианты ветвления. Вне зависимости от объекта исследования граф такой системы всегда связан и ориентирован, не содержит петель. Количество входов и выходов из системы не ограничено, при этом на точки входа и выхода должны указывать вершина-источник и целевая вершина.

Примерами ССТ, описываемых подобными схемами формализации, являются транспортные системы сообщения, трубопроводные теплосети, электросети, при решении задач оценки пропускной способности и эффективности функционирования.

2. Схема формализации «элементы – вершины». Элементом, образующим систему, сопоставляются вершины графа, а ребра определяют линии связи между ними. Наряду с функциональными вершинами, соответствующими элементам системы, выделяют фиктивные вершины, служащие для уточнения типа соединения. Граф такой системы может быть как ориентированным, так и не ориентированным, не содержит петель, имеет один вход и один выход. Для сетевых систем (информационные, компьютерные сети) ребра определяют пространственные связи, для функциональных (автоматизированные системы управления, производственные системы) – временные отношения.

Наибольшее применение подобная схема формализации имеет при исследовании показателей надежности, отказоустойчивости и безопасности систем.

На рисунке 1 представлен вариант перевода схемы простой электрической цепи (центральная часть рисунка) в граф при формализации «элементы-вершины» (левая часть) и «элементы – ребра» (правая часть) при расчете уровня сопротивления.

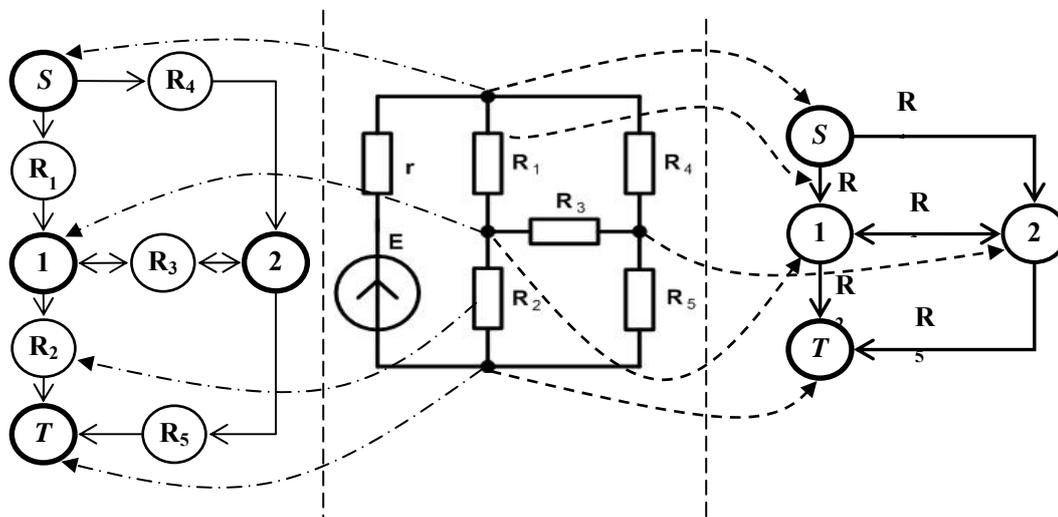


Рисунок 1 – Перевод схемы электрической цепи в оргграф при формализации «элементы-вершины» и «элементы-ребра»

Любую структурно-сложную ССТ возможно представить как в виде реберного графа, так и графа с элементами – вершинами. При этом, выбор способа формализации оказывает влияние на состав и сложность графовой структуры, определяет возможные направления исследования модели.

Для структурно-простых систем на основе выделенной совокупности элементов $K_i (i = \overline{1, n})$ и установленных функциональных отношений $F_l (l = \overline{1, z})$ между ними может быть разработана древовидная графическая структура. В качестве элементов в такой структуре

выступают листья дерева, функциональные отношения определяют внутренние вершины, порядок и направление взаимодействия – ребра. Источниками выступают вершины графа, представляющие элементы, в качестве целевого назначается корневой узел.

Подобная схема формализации характерна для задач исследования безопасности, надежности, безотказности ССТ и является вариантом деревьев событий и отказов. На рисунках 2 и 3 представлены варианты реализации деревьев аварии и безопасного состояния на участке железной дороги [6].

Вершины-элементы:

- 1 – излом рельса
- 2 – предмет на рельсах
- 3 – тормоз исправен
- 4 – действия машиниста верны
- 5 – индикатора излома исправен

Фиктивные вершины:

- F₁ – логическое И
- F₂ – логическое ИЛИ
- F₃ – логическое НЕ
- T – безопасное состояние

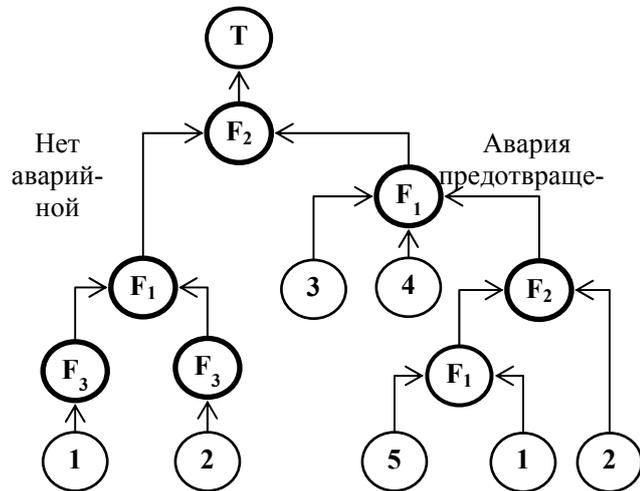


Рисунок 2 – Дерево аварии на участке железной дороги

Вершины-элементы:

- 1 – излом рельса
- 2 – предмет на рельсах
- 3 – отказ тормоза
- 4 – отказ машиниста
- 5 – отказ индикатора излома

Фиктивные вершины:

- F₁ – логическое И
- F₂ – логическое ИЛИ
- F₃ – логическое НЕ
- T – авария

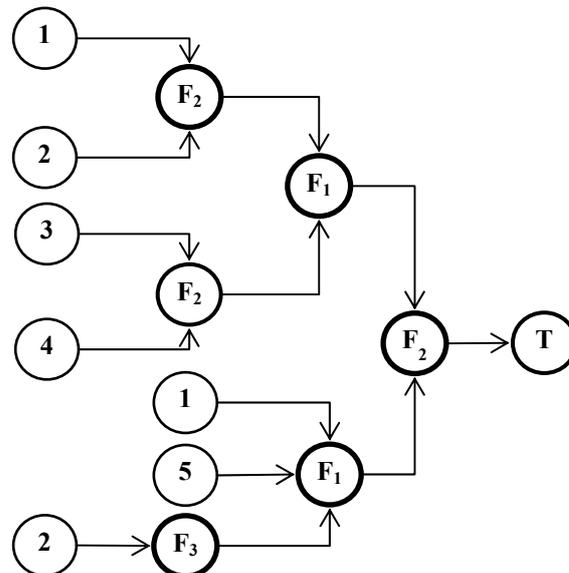


Рисунок 3 – Дерево безопасности на участке железной дороги

В качестве элементов системы выделены события отказов (безотказной работы) тормоза, индикатора излома рельсов, при работе машиниста состава, а также излом и наличие постороннего предмета на рельсах. В качестве исходных причин аварии выступают излом рельса и (или) наличие постороннего предмета.

Этапы создания вероятностно-алгебраической модели.

1. *Содержательное описание объекта моделирования.* На данном этапе проводится декомпозиция системы на составные элементы. Определяются цель и задачи моделирования, количественные характеристики оценок. Задаются управляющие характеристики и переменные моделирования. Определяются ограничения модели. В качестве завершающего шага первого этапа приводится упрощенное математическое или алгоритмическое описание исследуемой системы.

2. *Формальное описание объекта моделирования* определяется целями проводимого исследования; структурой исследуемой ССТ, уровнем детализации.

Исходя из целей проводимого исследования, производится уточнение декомпозиции исследуемой системы:

- при исследовании надежности проводится проверка совместимости выполнения условий появления событий в реальной системе;
- при исследовании эффективности проверяется состав и направление связей между структурными элементами.

Уточняются состав и порядок наступления несовместных событий для элементов системы. После уточнения декомпозиции корректируются алгоритмы, реализующие функциональные действия системы. Составляются временные диаграммы для выбора шага изменения модельного времени.

Устанавливаются управляющие связи между элементами модели. Структурная схема исследуемого объекта в ВАЛМ представляется графом. Уточнение порядка и приоритета функциональных действий реализуется включением в схему фиктивных элементов.

Завершающим этапом формализации является уточнение параметров для управляющей программы моделирования: определение законов изменения модельного времени для отдельных элементов схемы и всей системы; просмотр управляющих правил и коррекция модели (при достижении отдельными элементами критического уровня – отказа); проверка условий окончания моделирования.

3. *Построение алгебраической и вероятностной модели.* На данном этапе производится построение структурной схемы системы для выбранной схемы формализации, составляется алгебраическая модель реализации исследуемого свойства системы. Затем, согласно правилам метода ВАЛМ и алгоритма исключения, полученная алгебраическая модель переводится в вероятностную форму.

4. Заключительным этапом создания модели является *этап тестирования*. Данный этап позволяет убедиться в соответствии созданной структурной схемы цели исследования, правильности выбора параметров модели. При выявлении отклонений результатов моделирования в тестовых примерах от полученных аналитически или эмпирическим путем данных производится возврат на этапы формализации и составления алгебраической и вероятностной моделей.

5. Использование вероятностно-алгебраической модели. Основной проблемой данного шага моделирования является получение и оценка достоверности исходной информации, проведение натурных экспериментов.

Реализация этапов ВАЛМ при решении задачи анализа структурной надежности ССТ включает последовательное выполнение следующих шагов:

- анализ функций, выполняемых системой и ее составными частями, определение взаимосвязей составных частей;
- формирование содержания понятия «безотказной работы» для данной системы;
- определение возможных типов отказов составных частей и системы в целом, их причин и последствий;
- оценка влияния отказов составных частей системы на ее работоспособность;
- разделение системы на элементы, показатели надежности которых известны;
- составление структурно-логической схемы надежности ССТ, которая является моделью ее безотказной работы;
- составление расчетных зависимостей для определения показателей надежности ССТ с использованием данных по надежности ее элементов и с учетом структурной схемы.

Применение ВАЛМ для анализа пропускной способности системы предназначено для оценки структуры системы по величине максимального потока, ориентировано на ССТ простой структуры и реализуется следующей последовательностью шагов:

- анализ состава и структуры сети сообщения;
- определение наличия и типа управляющих воздействий на систему;
- задание значений пропускной способности и режима эксплуатации элементов системы;
- построение структурной схемы функционирования системы;

- определение функций управляющих воздействий на систему;
- составление расчетных зависимостей для определения показателей пропускной способности системы.

Расчет пропускной способности системы строится на следующих предположениях: рассматривается потоковая модель сети; потоки на входе переходника (структурного элемента) суммируются; потоки на выходе из переходника равны входному потоку, деленному на количество выходов.

Функциональные управляющие воздействия влияют на пропускную способность определенных элементов системы, но не изменяют параметры режима их эксплуатации.

В общем случае структурно-простая система может быть формализована в виде дерева, где терминальные узлы соответствуют элементам системы, внутренние реализуют функции связи, определяют порядок и направление соединения элементов, внешние управляющие воздействия, и их вклад в значение пропускной способности.

В качестве показателей оценки структуры системы рассматривается *пропускная способность (производительность) системы (С)*. Для конкретных предметных областей параметр может обозначать:

- пропускную способность железнодорожного участка – максимальные размеры движения в поездах (парах поездов), которые могут быть реализованы по данному участку за единицу времени в зависимости от числа главных путей, средств связи по движению поездов, типа и мощности тяговых средств и способа организации движения поездов;
- теоретическую и максимальную практическую пропускную способность для сети автомобильных дорог;
- производительность технической системы.

В качестве вспомогательного показателя для оценки качества структуры системы при исследовании пропускной способности может быть использован показатель веса элемента. Структурные элементы с высоким относительным весом зачастую являются узкими местами системы.

Заключение. Предложена технология автоматизации вероятностно-алгебраического моделирования систем сетевого типа на этапах их разработки и эксплуатации, позволяющая учесть особенности структурной организации объекта, использовать одну из схем формализации ВАЛМ и графический редактор при создании и верификации модели, решить типовые задач оценки надежности и пропускной способности ССС, функционирующих в условиях случайных воздействий.

Литература

1. Сукач, Е.И. Метод вероятностно-алгебраического моделирования надёжности структурно-сложных систем большой размерности / Е.И. Сукач // Математические машины и системы. – 2014. – № 1. – С. 195–200.
2. Система вероятностно-алгебраического моделирования «Probability Algebraic Simulation (PALS)»: свидетельство о регистрации компьютерной программы № 450 / Е.И. Сукач, Д.В. Ратобыльская ; НЦИС. – № С20120049 ; заявл. 25.06.2012.
3. Рябинин, И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. / И.А. Рябинин – СПб. : Издательство Санкт-Петербургского университета, 2007. – 278 с
4. Сукач, Е.И. Способ формализации объектов графовой структуры с вероятностными параметрами функционирования / Е.И. Сукач, Д.В. Ратобыльская, Ю.В. Жердецкий, Г.А. Мальцева // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2012. – № 5 (74). – С. 195–202.
5. Демиденко, О.М Анализ надёжности электроэнергетических систем на основе вероятностно-алгебраического моделирования / О.М. Демиденко, Е.И. Сукач, Д.В. Ратобыльская, Ю.В. Жердецкий // Проблемы физики, математики и техники. – 2014. – № 2 (13). – С. 87–94.
6. Ратобыльская, Д.В. Метод вероятностно-алгебраического моделирования транспортных систем сообщения / Д.В. Ратобыльская // Математические машины и системы. – 2013. – № 3. – С. 162–169.

Сравнительный анализ подходов к моделированию трафика в сетях передачи данных

А.И. ХОБНЯ

Представлены результаты сравнительного анализа подходов к моделированию трафика в сетях передачи данных, в частности в сетях нового поколения NGN. Рассматриваются преимущества и недостатки как ранних, так и современных методов. Предлагаются пути решения проблем и направления развития современных методов моделирования трафика в сетях NGN.

Ключевые слова: сетевой трафик, моделирование, сети, NGN.

The results of comparative analysis of networks traffic simulation approaches and traffic simulation in Next Generation Networks (NGN) in particular are presented. Advantages and disadvantages of both early and modern approaches are considered. The ways of solving problems and future work directions for modern approaches of traffic simulation are presented.

Keywords: network traffic, simulation, networks, NGN.

Введение. Целями моделирования сетей NGN являются определение оптимальной топологии, выбор соответствующего сетевого оборудования, определение характеристик работы сети и возможностей для ее будущего развития.

В процессе моделирования сети могут выясняться следующие параметры:

- предельная пропускная способность определенного фрагмента сети;
- зависимость потерь пакетов от нагрузки на отдельных узлах сети;
- время отклика серверов в различных режимах, в том числе в режимах экстремальной нагрузки;
- влияние подключения новых серверов на перераспределение загрузки различных участков сети;
- оптимальная топология сети;
- оптимальные протоколы маршрутизации и их параметры;
- максимальное число пользователей того или иного сервера сети;
- степень влияния мультимедийного трафика на работу сети.

Существуют аналитические и имитационные модели сетей. Аналитические модели сетей как правило строятся на основе аппарата теорий вероятности, массового обслуживания и марковских процессов. Также в данных моделях применяются методы диффузной аппроксимации, алгебраические и дифференциальные уравнения. Несмотря на значительные достижения в области математического моделирования, многие реальные системы невозможно представить с помощью соответствующих математических моделей. При наличии возможности формализации какой-либо системы посредством построения математической модели, полученная на ее основе задача оптимизации может являться слишком сложной для современных алгоритмов решения задач данного класса.

Альтернативным подходом моделирования сложных систем является *имитационное моделирование (ИМ)*, метод исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей реальную систему, с которой проводятся эксперименты с целью исследования данной системы.

Подходы к моделированию трафика и их проблемы. Одним из важнейших аспектов моделирования сетей NGN является моделирование трафика. Моделирование сетевого трафика используется как основа для разработки сетевых приложений и для планирования мощностей сетевых систем.

Существуют две основные характеристики, генерируемые моделями сетевого трафика: распределение длин пакетов и распределение длин временных интервалов между прибытиями пакетов. Другие параметры, такие как маршруты, распределения мест и т. д., имеют меньшее значение.

Проблема распределения размера пакетов довольно хорошо изучена на данное время. Существующие модели размеров пакета являются действенными и простыми. Большинство моделей размера пакетов не рассматривают проблему порядка размеров. Например, дельта-грамма TCP в одном направлении, скорее всего, последует крошечной АСК в другом направлении спустя около половины одного времени обхода (RTT).

Проблема распределения интервалов времени между прибытиями пакетов гораздо сложнее. Понимание сетевого трафика значительно менялось со временем, что привело к серии эволюций в подходах к моделированию сетевого трафика.

Самые первые модели были основаны на основе простых распределений вероятности с предположением, что они справедливы для больших выборок. Например, распределение трафика Пуассона (с экспоненциальными интервалами между прибытиями пакетов) часто использовались в различных сетевых моделях [1]. Данные модели использовались в литературе с появлением компьютерных сетей, а до этого использовались в области телекоммуникаций [2]. Модели без использования памяти очень привлекательны с аналитической точки зрения [3], и при правильном подборе параметров модели Пуассона могут показывать достаточно точное соответствие для большинства последовательностей сетевого трафика на достаточно коротких промежутках времени. Чистые модели Пуассона имеют один параметр – средняя скорость прибытия пакета (λ). Таким образом, интервалы между прибытиями пакетов имеют экспоненциальное распределение со средним равным $1/\lambda$. Прибытия пакетов на интервале $[t_1, t_2]$, если $t=t_2-t_1$, имеют распределение Пуассона со средними $t\lambda$.

Модели Пуассона популярны в теории массового обслуживания, потому что они имеют привлекательные аналитические свойства: они не имеют памяти (будущее поведение не имеет связи с прошлым или последним поведением), а также сумма нескольких потоков Пуассона генерирует новый Пуассона поток с $\lambda'=\sum\lambda$. Благодаря этим привлекательным свойствам, модели Пуассона были предложены в качестве основы для моделирования сетевых коммуникаций [3].

Составная модель Пуассона расширяет базовую возможность доставки партий пакетов. Интервалы времени прибытия пакетов внутри партии распределены экспоненциально, в то время как размеры партий распределены геометрически [4]. Данная модель позволяет генерировать неравномерный пульсирующий трафик. Составная модель Пуассона имеет некоторые из аналитических преимуществ чистой модели Пуассона: она по-прежнему не использует память, сумма потоков по-прежнему генерирует поток Пуассона, и стационарное уравнение по-прежнему достаточно просто рассчитать.

Однако, простые модели Пуассона демонстрировали слишком слабую пульсацию для реалистичного сетевого трафика. В частности в телекоммуникационных сетях наблюдаются всплески прибытия пакетов (когда люди говорят) и пауза между всплесками (когда люди молчат). В 1986 г. голос и данные начали делить телекоммуникационные каналы связи, таким образом исследования трафика начали рассматривать суперпозицию трафика из нескольких типов источников.

Реальный процесс, лежащий в основе голосовой сети, слишком сложен для эффективного моделирования. Исследователи стремились создать упрощенную модель. Необходима была модель трафика с изменяющейся скоростью прибытия пакетов. Тем не менее, в соответствии с голосовой моделью, имеет смысл изменять скорость прибытия квантовым образом. Очевидным решением стали цепи Маркова Пуассона (MMPPs) [5]. Непрерывная цепь Маркова определяет скорость прибытия модели Пуассона. Цепь Маркова является цепью с двумя состояниями, каждое с соответствующей скоростью λ и с определенным средним временем действия τ . Таким образом MMPP определяется кортежем $(\lambda_1, \lambda_2, R_1, R_2)$. Для определения этих четырех параметров необходимы измерения реального сетевого трафика. Параметры MMPP выбираются таким образом, чтобы соответствовать реальному трафику для следующих характеристик:

- скорость прибытия пакетов;
- отношение дисперсии к среднему для числа прибывших пакетов в течение короткого периода времени;

– отношение дисперсии к среднему для числа прибывших пакетов в течение длительного периода времени;

– третий момент для числа прибывших пакетов в течение короткого периода времени.

К сожалению, модели трафика на основе ММРPs были валидированы путем симуляции с параметрами, которые были выбраны для голосового трафика, идущего по телекоммуникационным каналам связи. Как и ожидалось, результаты аналитических исследований модели соответствовали результатам имитационного моделирования.

Описанные выше модели, как правило, были недостаточно точны, если применялись для достаточно длительных промежутков времени. В начале 1990-х гг. были проведены всесторонние исследования большого количества высококачественных измерений сетевого трафика. Анализ данных показал четкие доказательства самоподобия [6]. Это объясняло расхождение между моделями и реальным поведением сетевого трафика. Модели трафика на основе самоподобия сложнее создавать и анализировать, также сложно вычислить параметры для самоподобных моделей, используя измерения реального сетевого трафика. Тем не менее, несколько моделей были улучшены путем использования генерации самоподобного трафика [7]. Впоследствии были созданы системы, упрощающие анализ существующих измерений трафика для вычисления реалистичных параметров самоподобных моделей [8].

Когда самоподобные модели трафика были впервые введены, не было каких-либо эффективных поддающихся анализу процессов для генерации данного типа моделей. Затем был разработан стохастический процесс для создания модели с самоподобным вводом и постоянной скоростью вывода. Данная модель основана на нормализованном броуновском движении [9]. Несмотря на то, что данная начальная модель была непрерывной, а не дискретной, она была эффективной и простой.

Все ранние самоподобные модели трафика имеют один существенный недостаток: оценки параметров самоподобия реального сетевого трафика требуют огромных объемов данных и тяжелых вычислений. Метод, используемый в первоначальном исследовании требует сходимости тысяч наблюдений [10]. Наиболее современный метод, вейвлет-анализ нескольких разрешений [8], является более эффективным, но все еще очень дорогостоящим. Это, безусловно, нежелательно для моделирования трафика. В более поздних исследованиях авторы пытаются построить систему, которая фиксирует пакетные взаимодействия, извлекает распределения из различных аспектов трафика, а затем моделирует реалистичный трафик с теми же характеристиками [11].

Метод SWING использует сравнительно простую модель для анализа сетевого трафика и дальнейшей симуляции. Модель анализирует характеристики пользователей, обмена запрос-ответ (RRE), соединений, отдельных пакетов и всей сети в целом. В рамках данной модели не предпринимается никаких попыток проанализировать характеристики самоподобия трафика. Самоподобие в созданном данной моделью трафике приходит естественно, благодаря агрегации множества периодических включений и выключений различных источников.

Метод SWING проходил валидацию на данных реального трафика путем извлечения коэффициентов Хёрста от генерируемого и реального трафика. Данная модель работает очень хорошо даже на близких к RTT временных масштабах. Можно по-прежнему ожидать, что математически сгенерированный трафик не будет проявлять самоподобие на чрезвычайно больших периодах времени. Тем не менее, с практической точки зрения, SWING работает исключительно хорошо для моделирования web-трафика.

Моделирование трафика сетей NGN. В сетях NGN различным видам трафика присваивается различный приоритет. Поэтому очень важно иметь возможность моделирования различных видов трафика отдельно. При моделировании существующей сети NGN можно воспользоваться одним из существующих алгоритмов самоподобия, использующих измерения характеристик трафика в реальной сети. Однако данные методы не могут помочь исследователю для моделирования будущей сети или поведения сети в других эксплуатационных условиях. Например, в процессе моделирования сети NGN могут выясняться следующие вопросы:

– как изменится нагрузка после подключения новых пользователей;

- как изменится нагрузка после введения новых сервисов;
- как изменится нагрузка после изменения среднего времени разговора (например, при предоставлении услуг телефонии офисам, колл-центрам и т. д.).

Для моделирования описанных выше ситуаций имеет смысл использовать алгоритм моделирования трафика, который в качестве параметров использует характеристики внешней для сети среды (средняя продолжительность разговора, средняя интенсивность разговора, средняя интенсивность использования других типов услуг NGN сети и т.д.), т.е. алгоритм на основе поведенческих моделей пользователей. Алгоритм такого типа позволит предсказывать характеристики трафика в зависимости от условий эксплуатации NGN сети пользователями:

- какие сервисы NGN сети используются пользователями;
- как часто данные сервисы используются;
- каким образом пользователи используют данные сервисы (длительность, интенсивность и т. д.).

В качестве основы для моделирования трафика в сети NGN может быть взят алгоритм SWING. Однако оригинальный алгоритм SWING направлен в большей степени на моделирование web-трафика. Для моделирования VoIP и других типов трафика необходимо осуществить определенные модификации данного алгоритма, учитывающие специфику протоколов данных типов трафика. Например, для VoIP трафика, как правило, одно соединение соответствует одному пользовательскому сеансу, который является VoIP-вызовом. Однако количество передаваемых данных неравномерно в пределах одного соединения, т.к. современные VoIP протоколы поддерживают VAD (Voice Activity Detection). VAD позволяет экономить пропускную способность каналов связи, т.к. перерывы в речи не оцифровываются и не передаются по сети. Для наиболее точного моделирования VAD следует учитывать наличие возможности осуществлять VoIP-вызовы с участием более двух пользователей. Количество пользователей в конкретном VoIP-вызове влияет на продолжительность пауз, в пределах которых не генерируется исходящий трафик, т.к. пользователь слушает другого участника вызова. Следует учитывать возможные различия параметров распределения продолжительности и частоты пауз в рамках различных VoIP-вызовов. Для более точного моделирования VoIP трафика необходимо использовать наиболее реалистичные распределения характеристик пользовательских сеансов. Современные работы [12] в области моделирования VoIP трафика используют экспоненциальные распределения для продолжительности вызова и интервалов между вызовами, при этом исследования данных характеристик для телефонных сетей обнаруживают иные зависимости. Для некоторых типов протоколов следует учитывать возможности балансировки нагрузки и распределенной обработки информации [13], [14].

Таким образом, моделируя необходимые реальные эксплуатационные условия, возможно осуществить правильный выбор сетевого оборудования и определить этапы будущего развития моделируемой сети NGN.

Заключение. Рассмотрены преимущества и недостатки различных методов моделирования сетевого трафика. Обозначена специфика моделирования трафика сетей нового поколения NGN. Предложено учитывать наличие возможности осуществлять VoIP-вызовы с участием более двух пользователей и различия параметров распределения продолжительности и частоты пауз в рамках различных VoIP-вызовов при моделировании работы VAD, а также использовать распределения, полученные в результате исследований телефонных сетей, при моделировании VoIP трафика в сетях NGN.

Литература

1. Marathe, M. Predicted Capacity of Ethernet in a University Environment / M. Marathe, W. Hawe // Proceedings of Southcon. – 1982. – P. 1–10.
2. Mandelbrot, B. Self-similar error clusters in communication systems and the concept of conditional stationarity / B. Mandelbrot // IEEE Transactions on Communication Technology. – 1965. – Т. 13. – № 1. – P. 71–90.
3. Frost, V. Traffic Modeling for Telecommunications Networks / V. Frost, B. Melamed // IEEE Communications Magazine. – 1994. – Т. 32. – № 3. – P. 70–81.

4. Jain, R. Packet Trains - Measurements and a New Model for Computer Network Traffic / R. Jain, S.A. Routhier // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. – 1986. – Т. 4. – № 6. – P. 986–995.
5. Heffes, H. A Markov Modulated Characterization of Packetized Voice and Data Traffic and Related Statistical Multiplexer Performance / H. Heffes, D.M. Lucantoni // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. – 1986. – Т. 4. – № 6. – P. 856–868.
6. Willinger, W. The Discovery of Self-Similar Traffic / W. Willinger // *In Performance Evaluation: Origins and Directions* / Под. ред. G. Haring, C. Lindemann, M. Reiser. – London : Springer-Verlag, 2000. – Vol. 2. – P. 513–527.
7. Erramilli, A. Self-Similar Traffic and Network Dynamics / A. Erramilli, M. Roughan, D. Veitch, W. Willinger // *In Proc. of the IEEE*. – 2002. – Т. 90. – № 5. – P. 800–819.
8. Abry, P. Wavelet analysis of long-range-dependent traffic / P. Abry, D. Veitch // *IEEE Transactions on Information Theory*. – 1998. – Т. 44. – № 1. – P. 2–15.
9. Norros, I. A storage model with self-similar input / I. Norros // *Queueing Systems*. – 1994. – Т. 16. – № 3–4. – P. 387–396.
10. Leland, W.E. On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version) / W.E. Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, D.V. Wilson // *Networking, IEEE / ACM Transactions*. – 1994. – Т. 2. – № 1. – P. 1–15.
11. Vishwanath, K.V. Swing : Realistic and Responsive Network Traffic Generation / K.V. Vishwanath, A. Vahdat // *Networking, IEEE / ACM Transactions*. – 2009. – Т. 17. – № 3. – P. 712–725.
12. Ji, L. Conversational Model Based VoIP Traffic Generation / L. Ji, X. Yin, X. Shi, Z. Wang // *Networking and Services, 2007. ICNS. Third International Conference on*. – 2007. – 14 p.
13. Демиденко, О.М. Имитационное моделирование распределенной обработки информации в ЛВС / О.М. Демиденко, И.В. Максимей, С.Ф. Маслович, В.И. Селицкий // *Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины*. – 2008. – № 5 (50). – С. 140–143.
14. Быченко, О.В. Имитационные модели режимов обработки информации в ЛВС / О.В. Быченко, О.М. Демиденко, В.Д. Левчук, С.Ф. Маслович, В.И. Селицкий // *Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины*. – 2008. – № 5 (50). – С. 3–6.

УДК 512.542

О гиперрадикальных формациях в классе конечных групп \mathfrak{X}

А.Ф. ВАСИЛЬЕВ, И.Н. ХАЛИМОНЧИК

Рассматривается проблема описания гиперрадикальных формаций в классе X и обсуждаются некоторые направления ее решения. Устанавливается связь наследственных гиперрадикальных формаций с наследственными решеточными формациями в классе X . Приводится описание наследственных формаций, гиперрадикальных в классе всех разрешимых групп, нильпотентная длина которых ограничена натуральным числом k . Сформулирован ряд открытых проблем, стимулирующих дальнейшее развитие теории гиперрадикальных формаций.

Ключевые слова: конечная группа, нильпотентная длина, формация, гиперрадикальная формация, решеточная формация.

The problem of describing hyperradical formations in class X and discuss some of the directions of its solution is considered. A connection of hereditary hyperradical formations with hereditary lattice formations in class X is established. A description of the hereditary hyperradical formations in the class of solvable groups, nilpotent length of which at most a given positive integer k is presented. A number of open problems that stimulate the further development of the theory hyperradical formations are formulated.

Keywords: finite group, nilpotent length, formation, hyperradical formation, lattice formation.

1. Введение. Рассматриваются только конечные группы. Одним из центральных в теории групп является понятие субнормальной подгруппы, которое тесно связано с классом всех нильпотентных групп. В 1938 г. Фиттинг в [1] показал, что класс всех нильпотентных групп является замкнутым относительно взятия произведений (или, что эквивалентно, относительно порождений) субнормальных подгрупп. В работе [2] Виландт установил, что множество всех субнормальных подгрупп образует подрешетку решетки всех подгрупп в любой конечной группе.

Обобщая понятие субнормальности, в 1969 г. Хоукс в [3] ввел понятие \mathfrak{F} -субнормальной подгруппы в классе разрешимых групп. В 1978 г. Л.А. Шеметков в монографии [4] распространил понятие \mathfrak{F} -субнормальности на произвольные конечные группы.

Пусть \mathfrak{F} – непустая формация. Подгруппа K группы G называется \mathfrak{F} -субнормальной, если либо $K = G$, либо существует максимальная цепь подгрупп $K = K_0 \subset K_1 \subset \dots \subset K_n = G$ такая, что $(K_i)^\mathfrak{F} \subseteq K_{i-1}$ для всех $i = 1, \dots, n$.

Формация \mathfrak{F} называется решеточной в классе групп \mathfrak{X} , если в каждой \mathfrak{X} -группе G множество всех \mathfrak{F} -субнормальных подгрупп образует подрешетку решетки всех подгрупп G . Решеточные формации исследовались в работах [5], [6]. В работе [6] была выявлена тесная связь решеточных формаций с формациями, замкнутыми относительно взятия порождений \mathfrak{F} -субнормальных \mathfrak{F} -подгрупп. Поэтому в [7] было введено следующее

Определение 1.1. Пусть \mathfrak{X} – некоторый непустой класс групп. Формация \mathfrak{F} , содержащаяся в \mathfrak{X} , называется гиперрадикальной в классе \mathfrak{X} , если выполняются следующие утверждения:

1. формация \mathfrak{F} является нормально наследственной;
2. любая \mathfrak{X} -группа $G = \langle A, B \rangle$, где A и B – \mathfrak{F} -субнормальные \mathfrak{F} -подгруппы в G , принадлежит \mathfrak{F} .

Если \mathfrak{X} – класс всех групп, то гиперрадикальную формацию \mathfrak{F} в \mathfrak{X} будем просто называть гиперрадикальной. Отметим, что формация всех нильпотентных групп является гиперрадикальной. С другой стороны, формация всех сверхразрешимых групп не является гиперрадикальной. Поэтому в связи с общей задачей классификации гиперрадикальных формаций возникает следующая общая

Проблема 1.2. Пусть \mathfrak{X} – наследственная насыщенная формация.

1. Описать все формации \mathfrak{F} являющиеся гиперрадикальными в \mathfrak{X} .
2. Для данной наследственной насыщенной формации \mathfrak{F} описать формации \mathfrak{X} , для которых \mathfrak{F} гиперрадикальна в \mathfrak{X} .

Ранее проблема 1.2 исследовалась в случаях, когда \mathfrak{X} совпадает с классом всех разрешимых или всех произвольных групп. Так из работы [6] следует описание насыщенных наследственных гиперрадикальных формаций. В [7] было получено конструктивное описание гиперрадикальных формаций в классе \mathfrak{S} всех разрешимых групп.

В [8] были установлены насыщенные наследственные формации \mathfrak{X} , у которых любая ее насыщенная наследственная подформация \mathfrak{F} является гиперрадикальной в \mathfrak{X} .

В частности, было доказано, что любая насыщенная наследственная подформация формации \mathfrak{NA} всех групп с нильпотентным коммутантом является гиперрадикальной в \mathfrak{NA} .

Напомним [4], что формация \mathfrak{F} называется насыщенной, если из $G/\Phi(G) \in \mathfrak{F}$ следует, что $G \in \mathfrak{F}$.

Как следует из работы [7], всякая разрешимая наследственная гиперрадикальная формация является насыщенной. С другой стороны, в работе [9] приведен пример ненаследственной гиперрадикальной формации, не являющейся насыщенной. Вместе с тем остается открытой следующая

Проблема 1.3. Пусть \mathfrak{X} – наследственная насыщенная формация. Доказать, что любая наследственная формация \mathfrak{F} , являющаяся гиперрадикальной в \mathfrak{X} , будет насыщенной.

Рассмотрению ряда случаев проблем 1.2 и 1.3 и посвящена данная работа.

2. Предварительные сведения. В работе используются обозначения, определения и результаты из [4], [10]. Напомним, что формация – это класс групп, замкнутый относительно взятия гомоморфных образов и конечных подпрямых произведений. Формация называется наследственной, если она вместе с каждой группой содержит все ее подгруппы. Пусть \mathfrak{F} – некоторая непустая формация. Тогда \mathfrak{F} -корадикалом группы G называется наименьшая нормальная подгруппа из G , факторгруппа по которой принадлежит \mathfrak{F} и обозначается через $G^{\mathfrak{F}}$.

Сформулируем в виде лемм вспомогательные результаты необходимые для доказательства основных результатов.

Лемма 2.1 [10]. Пусть \mathfrak{F} – непустая формация, H и N – подгруппы группы G , причем N нормальна в G . Тогда справедливы следующие утверждения:

- 1) если H \mathfrak{F} -субнормальна в G , то HN \mathfrak{F} -субнормальна в G , а HN/N \mathfrak{F} -субнормальна в G/N ;
- 2) если $N \subseteq H$, то подгруппа H \mathfrak{F} -субнормальна в G тогда и только тогда, когда подгруппа H/N \mathfrak{F} -субнормальна в G/N ;
- 3) если подгруппа H \mathfrak{F} -субнормальна в подгруппе K , а K \mathfrak{F} -субнормальна в группе G , то H \mathfrak{F} -субнормальна в G .

Лемма 2.2 [10]. Пусть \mathfrak{F} – непустая наследственная формация. Тогда справедливы следующие утверждения:

- 1) если H – подгруппа группы G и $G^{\mathfrak{F}} \subseteq H$, то H – \mathfrak{F} -субнормальная подгруппа группы G ;
- 2) если H – \mathfrak{F} -субнормальная подгруппа и K – подгруппа группы G , то подгруппа $H \cap K$ – \mathfrak{F} -субнормальная подгруппа в K ;

3) если H_1 и H_2 – \mathfrak{F} -субнормальные подгруппы группы G , то $H_1 \cap H_2$ – \mathfrak{F} -субнормальная подгруппа в G ;

4) если все композиционные факторы группы G принадлежат формации \mathfrak{F} , то каждая субнормальная подгруппа группы G является \mathfrak{F} -субнормальной;

5) если H – \mathfrak{F} -субнормальная подгруппа группы G , то H^g – \mathfrak{F} -субнормальная подгруппа в G для любого элемента g из G .

3. Гиперрадикальные и решеточные формации. Связь гиперрадикальных и решеточных формаций в классе групп \mathfrak{X} устанавливает следующая

Теорема 3.1. Пусть \mathfrak{X} – наследственная насыщенная формация. Если \mathfrak{F} – наследственная гиперрадикальная формация в \mathfrak{X} , то \mathfrak{F} является решеточной формацией в \mathfrak{X} .

Доказательство. Пусть \mathfrak{F} – наследственная гиперрадикальная формация в классе \mathfrak{X} . По 3) леммы 2.2 пересечение \mathfrak{F} -субнормальных подгрупп является \mathfrak{F} -субнормальной подгруппой. Предположим, что \mathfrak{F} не является решеточной формацией в \mathfrak{X} . Пусть \mathfrak{X} -группа G – контрпример минимального порядка к утверждению теоремы. Тогда в G найдутся две \mathfrak{F} -субнормальные подгруппы A и B такие, что подгруппа $\langle A, B \rangle$ не является \mathfrak{F} -субнормальной в G . Ясно, что $\langle A, B \rangle \neq G$ и $\langle A, B \rangle \in \mathfrak{X}$. Если $G \in \mathfrak{F}$, то из наследственности формации \mathfrak{F} следует, что $\langle A, B \rangle$ является \mathfrak{F} -субнормальной в G . Противоречие. Следовательно, G не принадлежит \mathfrak{F} .

Пусть N – минимальная нормальная подгруппа группы G . Если $N = G$, то G – простая группа. Так как $G \notin \mathfrak{F}$, то $G^{\mathfrak{F}} = G$. Следовательно, $AG^{\mathfrak{F}} = G$. Противоречие с тем, что A – \mathfrak{F} -субнормальная подгруппа в G . Будем считать, что $N \neq G$. По 1) леммы 2.1 AN/N и BN/N – \mathfrak{F} -субнормальные подгруппы в $G/N \in \mathfrak{X}$. По индукции $\langle AN/N, BN/N \rangle = \langle A, B \rangle N/N$ – \mathfrak{F} -субнормальная подгруппа в G/N . Отсюда и из 2) леммы 2.1 подгруппа $\langle A, B \rangle N$ – \mathfrak{F} -субнормальна в G . Если $\langle A, B \rangle N \neq G$, то $\langle A, B \rangle$ – \mathfrak{F} -субнормальна в $\langle A, B \rangle N$. Тогда по 3) леммы 2.1 $\langle A, B \rangle$ – \mathfrak{F} -субнормальная подгруппа в G . Противоречие. Итак, $\langle A, B \rangle N = G$ для любой минимальной нормальной подгруппы группы G . Так как $\langle A, B \rangle \neq G$, то нетрудно видеть, что $\langle A, B \rangle_G = 1$.

Пусть $A^{\mathfrak{F}} \neq 1$. Ввиду леммы 2.1 из [11] подгруппа $A^{\mathfrak{F}}$ субнормальна в G . Тогда по теореме 7.10 из [4] следует, что

$$1 \neq (A^{\mathfrak{F}})^G = (A^{\mathfrak{F}})^{N \langle A, B \rangle} = (A^{\mathfrak{F}})^{\langle A, B \rangle} \subseteq \langle A, B \rangle.$$

Откуда следует, что $\langle A, B \rangle_G \neq 1$. Получили противоречие. Значит, $A^{\mathfrak{F}} = 1$ и $A \in \mathfrak{F}$. Аналогично доказывается, что $B \in \mathfrak{F}$. Так как $\langle A, B \rangle \in \mathfrak{X}$, то из гиперрадикальности формации \mathfrak{F} в \mathfrak{X} следует, что $\langle A, B \rangle \in \mathfrak{F}$. Так как \mathfrak{F} и \mathfrak{X} – формации, то \mathfrak{X} -группа G имеет единственную минимальную нормальную подгруппу $N = G^{\mathfrak{F}}$ и $\langle A, B \rangle N = G$.

Рассмотрим подгруппу AN . Так как $N = G^{\mathfrak{F}}$ и A является \mathfrak{F} -субнормальной в G , то $AN \neq G$. Из того, что $A \in \mathfrak{F}$ следует, что $(AN)^{\mathfrak{F}} \subseteq N$.

Пусть $(AN)^{\mathfrak{F}} \subset N$. Тогда из наследственности формации \mathfrak{F} и $AN/(AN)^{\mathfrak{F}} \in \mathfrak{F}$ следует, что $N/(AN)^{\mathfrak{F}} \in \mathfrak{F}$. Так как N – элементарная группа, то нетрудно видеть, что $N \in \mathfrak{F}$. Так как $G^{\mathfrak{F}} \subseteq N$, то по 1) леммы 2.2 N – \mathfrak{F} -субнормальна в G . Из $AN \in \mathfrak{X}$ и гиперрадикальности \mathfrak{F} в \mathfrak{X} получаем, что $AN \in \mathfrak{F}$. Аналогично $BN \in \mathfrak{F}$. Так как AN и BN – \mathfrak{F} -субнормальные \mathfrak{F} -подгруппы в G , то $G = \langle AN, BN \rangle \in \mathfrak{F}$. Противоречие.

Пусть $(AN)^\delta = N$. Так как A является \mathfrak{F} -субнормальной подгруппой в G , то по 2) леммы 2.2 следует, что A \mathfrak{F} -субнормальна в AN . Если $A \neq AN$, то $A(AN)^\delta \neq AN$. Противоречие. Поэтому $A = AN \in \mathfrak{F}$. Аналогично $B = BN \in \mathfrak{F}$. Из гиперрадикальности \mathfrak{F} в \mathfrak{X} следует, что $G = \langle AN, BN \rangle = \langle A, B \rangle \in \mathfrak{F}$. Противоречие. Значит, наше предположение неверно и \mathfrak{F} – решеточная формация в \mathfrak{X} . Теорема доказана.

Когда \mathfrak{X} класс всех групп, теорема 1 была доказана в работе [12].

Как следует из работ [7], [11], обратное утверждение теоремы 1 неверно, так как существуют решеточные формации, которые не являются гиперрадикальными.

Следующая теорема развивает основной результат работы [12].

Теорема 3.2. Пусть \mathfrak{F} – наследственная формация, \mathfrak{X} – насыщенная формация, причем $\mathfrak{X} = \mathfrak{S}_\pi \mathfrak{X}$, где $\pi = \pi(\mathfrak{F})$. Если \mathfrak{F} – гиперрадикальная формация в \mathfrak{X} , то \mathfrak{F} является насыщенной решеточной в \mathfrak{X} .

Следствие 3.3. Всякая наследственная гиперрадикальная формация является насыщенной решеточной формацией.

Замечание. Следствие 3 с учетом основного результата из работы [6] дает ответ на вопрос 4.8 из работы [13].

4. Гиперрадикальные формации в классе \mathfrak{N}^k . В следующих теоремах описаны насыщенные формации, гиперрадикальные в классе \mathfrak{N}^k всех разрешимых групп, нильпотентная длина которых не превосходит натуральное число k . Пусть π – некоторое множество простых чисел. Тогда \mathfrak{N}_π^k обозначает класс всех разрешимых π -групп, нильпотентная длина которых не превосходит k , где k – некоторое неотрицательное целое число. В частности, если $k = 0$, то \mathfrak{N}_π^k совпадает с классом всех единичных групп. Если $k = 1$, то $\mathfrak{N}_\pi^k = \mathfrak{N}_\pi$. Если π совпадает с множеством всех простых чисел, то $\mathfrak{N}_\pi^k = \mathfrak{N}^k$.

Используя результаты работы [7], нетрудно получить следующий результат.

Теорема 4.1. Пусть \mathfrak{F} – подформация формации \mathfrak{N} . Тогда следующие утверждения эквивалентны:

- 1) \mathfrak{F} является гиперрадикальной формацией в \mathfrak{N} ;
- 2) $\mathfrak{F} = \mathfrak{N}_\pi$, где $\pi = \pi(\mathfrak{F})$.

Напомним [10], что формация \mathfrak{F} конечных групп называется формацией Шеметкова в классе \mathfrak{X} , если каждая минимальная не \mathfrak{F} -группа из \mathfrak{X} является либо группой Шмидта, либо группой простого порядка. Наиболее важную роль для приложений играют формации Шеметкова в классе \mathfrak{X} , состоящих из разрешимых групп. В работе [14] были описаны наследственные насыщенные формации Шеметкова в классе \mathfrak{X} в случае, когда $\mathfrak{F} \subseteq \mathfrak{X} = \mathfrak{S}_{\pi(\mathfrak{X})}$. В работе [15] получено описание наследственных локальных формаций Шеметкова \mathfrak{F} в классе \mathfrak{X} при предположении, что $\mathfrak{F} \subseteq \mathfrak{X}$ и \mathfrak{X} – наследственная насыщенная формация конечных разрешимых групп.

Теорема 4.2. Пусть \mathfrak{F} – насыщенная формация, $\mathfrak{F} \subseteq \mathfrak{N}^2$. Следующие утверждения эквивалентны.

- 1) \mathfrak{F} является гиперрадикальной формацией в \mathfrak{N}^2 ;
- 2) \mathfrak{F} является формацией Шеметкова в \mathfrak{N}^2 ;
- 3) \mathfrak{F} имеет максимальный внутренний локальный экран f такой, что $f(p) = \mathfrak{N}_p \mathfrak{N}_{\pi(f(p))}$ для любого $p \in \pi(\mathfrak{F})$.

Теорема 4.3. Пусть \mathfrak{F} – нормально наследственная формация, $\mathfrak{F} \subseteq \mathfrak{N}^k$, где k – фиксированное натуральное число и $k \geq 3$. Формация \mathfrak{F} является гиперрадикальной в \mathfrak{N}^k тогда и только тогда, когда существует разбиение $\{\pi_i \mid i \in I\}$ множества $\pi(\mathfrak{F})$ такое, что $\mathfrak{F} = D_0(\bigcup_{i \in I} \mathfrak{N}_{\pi_i}^k)$.

Литература

1. Fitting, H. Beitrage zur Theorie der endlichen Gruppen / H. Fitting // Jahresber. Deutsch. Math., Verein. – 1938. – Bd. 48. – P. 77–141.
2. Wielandt, H. Eine Verallgemeinerung der invarianten Untergruppen / H. Wielandt // Math. Z. – 1939. – Bd. 45. – S. 209–244
3. Hawkes, T. On formations subgroups of a finite soluble groups / T. Hawkes // J. London Math.Soc. – 1969. – V. 44. – P. 243–250.
4. Шеметков, Л.А. Формации конечных групп / Л.А. Шеметков // М. : Наука, 1978.
5. Ballester-Bolinches, A. On the lattice on \mathfrak{F} -subnormal subgroups / A. Ballester-Bolinches, K. Doerk, M.D. Perez-Ramos // J.Algebra. – 1992. – V. 115. – P. 393–396.
6. Васильев, А.Ф. О решетках подгрупп конечных групп / А.Ф. Васильев, С.Ф. Каморников, В.Н. Семенчук // Бесконечные группы и примыкающие алгебраические системы. – Киев : Ин-т математики АН Украины, 1993. – С. 27–54.
7. Васильев, А.Ф. Гиперрадикальные формации конечных разрешимых групп / А.Ф. Васильев // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2004. – № 6 (27). – С. 62–70.
8. Халимончик, И.Н. О решеточных, гиперрадикальных и сверхрадикальных формациях конечных групп / И.Н. Халимончик // Весн. Віцебск. дзярж. ун-та. – 2012. – № 3 (69). – С. 20–24.
9. Каморников, С.Ф. Об одном примере гиперрадикальных формаций / С.Ф. Каморников // Проблемы физики, математики и техники. – 2014. – № 3 (20). – С. 61–64.
10. Каморников, С.Ф. Подгрупповые функторы в теории классов конечных групп / С.Ф. Каморников, М.В. Селькин. – Мн. : Беларуская навука, 2003. – 238 с.
11. Васильев, А.Ф. К проблеме Кегеля-Шеметкова о решетках обобщенно субнормальных подгрупп конечных групп / А.Ф. Васильев, С.Ф. Каморников // Алгебра и логика. – 2002. – Т. 41, № 4. – С. 411–428.
12. Васильев, А.Ф. Гиперрадикальные формации конечных групп / А.Ф. Васильев, И.Н. Халимончик // Труды института математики. – 2008. – Т. 16, № 2. – С. 15–18.
13. Каморников, С.Ф. Сверхрадикальные формации / С.Ф. Каморников // Изв. Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2014. – № 3. – С. 47–49.
14. Васильев, А.Ф. Характеризация локальных формаций \mathfrak{F} по заданным свойствам минимальных не \mathfrak{F} -групп / А.Ф. Васильев, В.Н. Семенчук // Исследование нормального и подгруппового строения конечных групп : тр. Гомельского семинара. – Мн. : Наука и техника, 1984. – С. 175–181.
15. Халимончик, И.Н. Формации Шеметкова в классе \mathfrak{X} / И.Н. Халимончик // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2009. – № 4 (55). – С. 219–223.

Множества Фиттинга и инъекторы конечной группы

Н.Т. ВОРОБЬЕВ, М.Г. СЕМЕНОВ

Пусть G – конечная π -разрешимая группа и \mathcal{F} – локальное множество Фиттинга группы G такое, что множество всех простых делителей порядков подгрупп из \mathcal{F} совпадает с π . Доказано, что в этом случае \mathcal{F} -инъектор группы G – это подгруппа $Z = W \cdot C_{D_p}(W/W_{F(p)})$, где Σ – холловская система G , $D = N_G(\Sigma)$, $D_p \in \Sigma \cap D$, W – \mathcal{F} -инъектор группы $O^p(G)$, $\Sigma \setminus W$ и G определяется полной приведенной H -функцией F .

Ключевые слова: конечная π -разрешимая группа, множество Фиттинга, \mathcal{F} -инъектор.

Let G be a π -soluble group and \mathcal{F} be a local Fitting set of G such that the set of all prime divisors of orders of \mathcal{F} -subgroups coincides with π . It is proved that in this case \mathcal{F} -injector of G is a subgroup $Z = W \cdot C_{D_p}(W/W_{F(p)})$ where Σ is a Hall system of G , $D = N_G(\Sigma)$, $D_p \in \Sigma \cap D$, W is an \mathcal{F} -injector of $O^p(G)$, $\Sigma \setminus W$ and G is defined by full integrated H -function F .

Keywords: finite π -soluble group, Fitting set, \mathcal{F} -injector.

Введение. В работе рассматриваются только конечные группы.

В теории разрешимых групп известен результат Гашюца [1] о том, что для любой разрешимой насыщенной формации \mathfrak{F} в каждой группе G существует единственный класс сопряженных \mathfrak{F} -покрывающих подгрупп. Напомним, что \mathfrak{F} -покрывающей подгруппой группы G называют [2, с. 280] такую \mathfrak{F} -подгруппу E , что из $E \leq H \leq G$, $K \trianglelefteq H$ и $H/K \in \mathfrak{F}$ всегда следует $H = EK$. Заметим, что в случае, когда $\mathfrak{F} = \mathfrak{S}_\pi$ – класс всех разрешимых π -групп (в частности, $\mathfrak{F} = \mathfrak{N}_p$ – класс всех p -групп) \mathfrak{F} -покрывающая подгруппа группы G совпадает с холловой π -подгруппой G (в частности, с силовой p -подгруппой G) и поэтому в классе \mathfrak{S} всех разрешимых групп теорема Гашюца обобщает фундаментальные теоремы Силова и Холла.

В последующем Гашюцом было установлено [3], что в классе \mathfrak{S} всех разрешимых групп \mathfrak{F} -покрывающие подгруппы группы совпадают с её \mathfrak{F} -проекторами. При этом \mathfrak{F} -проектором группы G называют такую подгруппу F , что FN/N – \mathfrak{F} -максимальная подгруппа в G/N для любой нормальной подгруппы N из G .

В работе [4] были определены объекты, дуальные понятиям формации и проектора – классы Фиттинга и инъекторы. Класс групп \mathfrak{F} называют [2, с. 274] классом Фиттинга, если \mathfrak{F} замкнут относительно взятия нормальных подгрупп и произведений нормальных \mathfrak{F} -подгрупп. Подгруппу V группы G называют \mathfrak{F} -инъектором G , если $V \cap N$ является \mathfrak{F} -максимальной подгруппой в N для каждой субнормальной подгруппы N группы G . Развивая силовскую теорию Гашюц, Фишер и Хартли доказали [4], что в каждой разрешимой группе G для любого разрешимого класса Фиттинга \mathfrak{F} существует единственный класс сопряженных \mathfrak{F} -инъекторов. Указанная теорема впервые была обобщена в работе Л.А. Шеметкова [5], где установлено, что для любого множества Фиттинга \mathcal{F} конечной π -разрешимой группы G (π – множество всех простых делителей порядков всех групп из \mathcal{F}) в G существует единственный класс сопряженных \mathcal{F} -инъекторов. Множеством Фиттинга группы G называют [5] такое множество подгрупп группы G , которое замкнуто относительно взятия нормальных подгрупп, их произведений и сопряжений. Примечателен тот факт, что каждому классу Фиттинга \mathfrak{F} соответствует множество Фиттинга $\mathcal{F} = Tr_{\mathfrak{F}}(G) = \{H \leq G : H \in \mathfrak{F}\}$, которое называют следом класса Фиттинга \mathfrak{F} , хотя обратное в

общем случае неверно [2, пример VIII.2.2(b)]. Кроме того, для случая, когда множество Фиттинга $\mathcal{F} = Tr_{\mathfrak{F}}(G)$, множества \mathfrak{F} -инъекторов и \mathcal{F} -инъекторов группы G совпадают, и поэтому, указанная выше теорема Гашюца-Фишера-Хартли [4] является следствием теоремы Л.А. Шеметкова.

Задача описания общего метода построения \mathfrak{F} -проектора для разрешимой насыщенной формации в разрешимой группе восходит к работам Дерка [6] и Дарси [7]. Вместе с тем, формула \mathfrak{F} -проектора группы G до сих пор известна лишь для случая, когда G – разрешимая группа, факторизуемая в виде $G = L \cdot F(G)$, где $F(G)$ – подгруппа Фиттинга G [8]. В связи с этим представляет интерес решение дуальной задачи – задачи нахождения формулы \mathfrak{F} -инъектора группы для произвольного локального класса Фиттинга \mathfrak{F} . Такая задача была решена Н.Т. Воробьевым и В.Н. Загурским [9] для случая π -разрешимой группы G , где π – множество всех простых делителей порядков групп из локального класса Фиттинга \mathfrak{F} . Используя результаты Л.А. Шеметкова об инъекторах для множеств Фиттинга, в настоящей работе найдена формула \mathcal{F} -инъектора для любого локального множества Фиттинга π -разрешимой группы, где $\pi = \bigcup \{ \sigma(H) \mid H \leq G \wedge H \in \mathcal{F} \}$ и $\sigma(H) = \{ p : p \mid |H| \}$.

В определениях и обозначениях мы следуем [2].

1. Предварительные сведения. Пусть \mathcal{F} – множество Фиттинга. Символом $G_{\mathcal{F}}$ обозначают [2, с. 538] наибольшую из нормальных \mathcal{F} -подгрупп группы G . Такую подгруппу называют \mathcal{F} -радикалом группы G . Понятие \mathcal{F} -инъектора группы для её множества Фиттинга \mathcal{F} определяется аналогично, как и понятие \mathfrak{F} -инъектора для класса Фиттинга \mathfrak{F} . Символом $\sigma(\mathcal{F})$ мы будем обозначать множество всех простых делителей порядков всех групп из \mathcal{F} .

Если $H \leq G$, то $\mathcal{F}_H = \{ S \leq H : S \in \mathcal{F} \}$ является множеством Фиттинга группы G и, очевидно, является множеством Фиттинга группы H . Следуя [2], мы будем обозначать \mathcal{F}_H во многих случаях просто символом \mathcal{F} .

Холловской системой π -разрешимой группы G [10] называется такое множество Σ холловских подгрупп из G , что выполняются следующие условия: 1) для всякого множества простых чисел p из π $G_p \in \Sigma$, а также $G_{p \cup \pi'} \in \Sigma$; 2) если $H, K \in \Sigma$, то $HK = KH$. Если R подгруппа группы G , то через $\Sigma \cap R$ обозначают множество подгрупп $\{ S \cap R \mid \forall S \in \Sigma \}$. Если $\Sigma \cap R$ – холловская система группы R , то говорят, что Σ *редуцирует* холловскую систему Σ_R подгруппы R и обозначают $\Sigma \searrow R$.

Подгруппа $N_G(\Sigma) = \{ g \in G \mid H = H^g, \forall H \in \Sigma \}$ называется *нормализатором* холловской системы Σ . Подгруппа A π -разрешимой группы называется *π -связной* [11], если либо A – π -подгруппа, либо A содержит холловскую π' -подгруппу группы G .

Лемма 1.1 [11, с. 56]. Пусть H – π -связная подгруппа π -разрешимой группы G . Подгруппа H *пронормальна тогда и только тогда, когда всякая холловская система Σ группы G редуцируется точно в одну подгруппу, сопряженную с H .*

Подгруппа A группы G называется *p -нормально погруженной* [2] в G , если для простого числа p силовская p -подгруппа A_p группы A будет силовской p -подгруппой некоторой нормальной в G подгруппы. Подгруппу A группы G назовем *π -нормально погруженной* в G , если A p -нормально погружена в G для любого p из π . Если для любого простого делителя p порядка группы A эта подгруппа является p -нормально погруженной в G , то A называется *нормально погруженной* в G .

2. Локальные множества Фиттинга. Локальный метод для изучения структуры классов Фиттинга впервые был предложен Хартли [12]. Для этой цели в [12] используются отображения вида $f: \mathbb{P} \rightarrow \{ \text{классы Фиттинга} \}$. Такие отображения называют *функциями Хартли* [13]. При этом если класс Фиттинга $\mathfrak{F} = \bigcap_p f(p) \mathfrak{N}_p \mathfrak{C}_p$ для некоторой функции Хартли f , то его называют *локальным* [13]. По аналогии с функциями Хартли в теории классов Фиттинга мы определим *H -функции* для некоторой группы G .

Определение 2.1. Локальной функцией Хартли или H -функцией группы G назовем отображение $f: \mathbb{P} \rightarrow \{\text{множества Фиттинга группы } G\}$.

Определение 2.2. Произведением $\mathcal{F} \circ \mathfrak{X}$ множества Фиттинга \mathcal{F} группы G и класса Фиттинга \mathfrak{X} назовем множество подгрупп $\{H \leq G : H / H_{\mathcal{F}} \in \mathfrak{X}\}$.

Аналог известных свойств произведений классов Фиттинга [2, теорема IX.1.12] для множеств Фиттинга представляет

Лемма 2.3. Пусть \mathcal{F} – множество Фиттинга группы G , \mathfrak{X} – класс Фиттинга и $H \leq G$. Тогда справедливы следующие утверждения:

- 1) произведение $\mathcal{F} \circ \mathfrak{X}$ является множеством Фиттинга группы G ;
- 2) $(H / H_{\mathcal{F}})_{\mathfrak{X}} = H_{\mathcal{F} \circ \mathfrak{X}} / H_{\mathcal{F}}$;
- 3) если \mathfrak{X}_1 и \mathfrak{X}_2 – классы Фиттинга, то $(\mathcal{F} \circ \mathfrak{X}_1) \circ \mathfrak{X}_2 = \mathcal{F} \circ (\mathfrak{X}_1 \mathfrak{X}_2)$.

Справедливость леммы легко установить, следуя доказательству теоремы IX.1.12 [2].

В дальнейшем мы будем использовать также следующие простейшие свойства произведения множества Фиттинга группы G и класса Фиттинга.

Лемма 2.4. Пусть \mathcal{F}_1 и \mathcal{F}_2 – множества Фиттинга группы G . Тогда:

- 1) если \mathfrak{X} является одновременно классом Фиттинга и гомоморфом, то из включения $\mathcal{F}_1 \subseteq \mathcal{F}_2$ следует $\mathcal{F}_1 \circ \mathfrak{X} \subseteq \mathcal{F}_2 \circ \mathfrak{X}$;
- 2) если \mathfrak{X} – формация Фиттинга, то $(\mathcal{F}_1 \cap \mathcal{F}_2) \circ \mathfrak{X} = \mathcal{F}_1 \circ \mathfrak{X} \cap \mathcal{F}_2 \circ \mathfrak{X}$;
- 3) если \mathfrak{X}_1 и \mathfrak{X}_2 – классы Фиттинга, то $\mathcal{F} \circ (\mathfrak{X}_1 \cap \mathfrak{X}_2) = \mathcal{F} \circ \mathfrak{X}_1 \cap \mathcal{F} \circ \mathfrak{X}_2$.

Доказательство леммы осуществляется непосредственной проверкой.

Определение 2.5. Множество Фиттинга \mathcal{F} группы G назовем локальным, если $\mathcal{F} = \bigcap_p f(p) \circ \mathfrak{N}_p \mathfrak{E}_p$, для некоторой H -функции f группы G . В данном случае f назовем H -функцией \mathcal{F} .

Определение 2.6. Пусть f – H -функция множества Фиттинга \mathcal{F} группы G . Тогда f назовем: 1) внутренней, если $f(p) \subseteq \mathcal{F}$ для каждого простого p ; 2) полной, если $f(p) \circ \mathfrak{N}_p = f(p)$ для всех простых p .

Следуя доказательству леммы 3 [14], нетрудно показать, что справедлива

Лемма 2.7. Каждое локальное множество Фиттинга группы G определяется полной внутренней H -функцией.

Известно [14, лемма 2], что каждый локальный класс Фиттинга является классом Фишера. Мы установим справедливость аналогичного утверждения и в теории множеств Фиттинга.

Определение 2.8 [2, с. 554]. Множество Фиттинга группы G называется множеством Фишера, если из того, что $L \leq G$, $K \trianglelefteq L \in \mathcal{F}$ и H/K – p -подгруппа L/K (p – простое число), всегда следует $H \in \mathcal{F}$.

Теорема 2.9. Каждое локальное множество Фиттинга группы G является множеством Фишера G .

Доказательство. Пусть $\mathcal{F} = \bigcap_p f(p) \circ \mathfrak{N}_p \mathfrak{E}_p$, для некоторой H -функции f . Покажем, что произведение $f(p) \circ \mathfrak{N}_p \mathfrak{E}_p$ является множеством Фишера G для произвольного простого p .

Пусть $L \leq G$, $K \trianglelefteq L \in f(p) \circ \mathfrak{N}_p \mathfrak{E}_p$ и H/K – q -подгруппа L/K . Рассмотрим два следующих случая:

1. $q \neq p$.

В этом случае $H/K \in \mathfrak{E}_p$. Из того, что $f(p) \circ \mathfrak{N}_p \mathfrak{E}_p$ является множеством Фиттинга, следует $K \in f(p) \circ \mathfrak{N}_p \mathfrak{E}_p$. Значит, $H \in (f(p) \circ \mathfrak{N}_p \mathfrak{E}_p) \circ \mathfrak{E}_p = f(p) \circ \mathfrak{N}_p \mathfrak{E}_p$.

2. $q = p$.

Пусть $P \in \text{Syl}_p(H)$. Заметим, что $L/L_{f(p) \circ \mathfrak{N}_p} \in \mathfrak{C}_{p'}$. Следовательно, $P \leq L_{f(p) \circ \mathfrak{N}_p}$. Тогда $[K, P] \leq K \cap L_{f(p) \circ \mathfrak{N}_p} = K_{f(p) \circ \mathfrak{N}_p}$. Значит, $K_{f(p) \circ \mathfrak{N}_p} P \leq KP = H$. Ввиду того, что $K_{f(p) \circ \mathfrak{N}_p} P / K_{f(p) \circ \mathfrak{N}_p} \in \mathfrak{N}_p$, имеем $K_{f(p) \circ \mathfrak{N}_p} P \in f(p) \circ \mathfrak{N}_p \mathfrak{N}_p = f(p) \circ \mathfrak{N}_p$. Так как $K / K_{f(p) \circ \mathfrak{N}_p} \in \mathfrak{C}_{p'}$, то

$$\begin{aligned} H / K_{f(p) \circ \mathfrak{N}_p} P &= KP / K_{f(p) \circ \mathfrak{N}_p} P = KK_{f(p) \circ \mathfrak{N}_p} P / K_{f(p) \circ \mathfrak{N}_p} P \cong \\ &\cong K / K \cap K_{f(p) \circ \mathfrak{N}_p} P = K / K_{f(p) \circ \mathfrak{N}_p} (K \cap P) \in \mathfrak{C}_{p'}. \end{aligned}$$

Значит, $H \in f(p) \circ \mathfrak{N}_p \mathfrak{C}_{p'}$.

Итак, мы показали, что для любого простого p множество Фиттинга $f(p) \circ \mathfrak{N}_p \mathfrak{C}_{p'}$ является множеством Фишера. Следовательно, \mathcal{F} является множеством Фишера. Теорема доказана.

3. Перестановочные множества Фиттинга. В настоящем разделе мы расширим результаты Локета [15] о перестановочных разрешимых классах Фиттинга на случай перестановочного множества Фиттинга π -разрешимой группы G .

Пусть Σ – холловская система π -разрешимой группы G . Подгруппа A называется Σ -перестановочной [2, с. 230], если A перестановочна со всякой подгруппой из Σ . Если A перестановочна с некоторой холловской системой группы G , то она называется *системно перестановочной*. Через $A \perp \Sigma$ обозначим Σ -перестановочность подгруппы A .

Определение 3.1. Множество Фиттинга \mathcal{F} группы G назовем *перестановочным*, если \mathcal{F} -инъектор каждой подгруппы H группы G является системно перестановочной подгруппой в H .

Следуя доказательству теоремы 4.5 [15] легко показать, что справедлива

Лемма 3.2. *Всякое множество Фишера \mathcal{F} $\sigma(\mathcal{F})$ -разрешимой группы G является перестановочным.*

Лемма 3.3. *Пусть G – π -разрешимая группа, \mathcal{F} – множество Фиттинга группы G , $\pi = \sigma(\mathcal{F})$, $N \trianglelefteq G$ и G/N является π' -группой или нильпотентной π -группой. Если максимальная \mathcal{F} -подгруппа V группы G содержит \mathcal{F} -инъектор W группы N , то V – \mathcal{F} -инъектор группы G .*

Доказательство вытекает из теоремы 2.1 [5] и следствия 1 [16].

Лемма 3.4 [5, теорема 2.3]. *Пусть \mathcal{F} – множество Фиттинга $\sigma(\mathcal{F})$ -разрешимой группы G и V – \mathcal{F} -инъектор группы G . Если $V \leq H \leq G$, то V также является \mathcal{F} -инъектором группы H .*

Определение 3.5 [2, с. 241]. Пусть G – группа и $U \leq G$. Тогда U называют *пронормальной* в G (обозначают $U \text{ rg } G$) если подгруппы U и U^g сопряжены в $\langle U, U^g \rangle$ для всех элементов $g \in G$.

Лемма 3.6. *Пусть \mathcal{F} – множество Фиттинга $\sigma(\mathcal{F})$ -разрешимой группы G и N – нормальная подгруппа G . Тогда \mathcal{F} -инъектор V группы N является пронормальной подгруппой в G .*

Непосредственной проверкой легко убедиться, что справедливы следующие леммы.

Лемма 3.7. *Пусть G – π -разрешимая группа и ρ – такое множество простых чисел, что либо $\rho \subseteq \pi$, либо $\pi' \subseteq \rho$. Если $G = G_1 G_2$, то существуют такие холловские ρ -подгруппы H, H_1 и H_2 соответственно в группах G, G_1 и G_2 , что $H = H_1 H_2$.*

Лемма 3.8. *Пусть Σ – холловская система π -разрешимой группы G . Если Σ редуцируется в пронормальную π -связную подгруппу H , то $N_G(\Sigma)$ нормализует подгруппу H и $\Sigma \searrow N_G(H)$.*

Лемма 3.9. *Пусть \mathcal{F} – множество Фиттинга π -разрешимой группы G для $\pi = \sigma(\mathcal{F})$, V – \mathcal{F} -инъектор группы G и V – π -связная подгруппа, причем холловская система Σ группы G редуцируется в V . Пусть $K \trianglelefteq G$ и G/K является π' -группой или нильпотентной π -группой. Тогда если \mathcal{F} – перестановочное множество Фиттинга, то $V \leq N_G(\Sigma)(V \cap K)$.*

4. Формула инъектора. Лемма 4.1 [17, лемма 7]. Пусть локальное множество Фиттинга \mathcal{F} π -разрешимой группы G , где $\pi = \sigma(\mathcal{F})$ с полной приведенной H -функцией F группы G и K – \mathcal{F} -подгруппа G . Если S является p -подгруппой G , то $K \cdot C_S(K / K_{F(p)}) \in \mathcal{F}$. В случае, когда $K \trianglelefteq G$, $K \leq H \leq G$ и $H \in \mathcal{F}$, выполняется включение $C_S(H / H_{F(p)}) \leq C_S(K / K_{F(p)})$.

Основной результат работы представляет

Теорема 4.2. Пусть $\pi = \sigma(\mathcal{F})$, где \mathcal{F} – локальное множество Фиттинга π -разрешимой группы G определяемое полной приведенной H -функцией F . Если Σ – холловская система G , $D = N_G(\Sigma)$ и $D_p \in \Sigma \cap D$, W – \mathcal{F} -инъектор группы $O^p(G)$ и $\Sigma \searrow W$, то для $p \in \pi$ подгруппа $Z = W \cdot C_{D_p}(W / W_{F(p)})$ является \mathcal{F} -инъектором группы G и $\Sigma \searrow Z$, а для $p \in \pi'$ подгруппа W – \mathcal{F} -инъектор группы G .

Доказательство. Пусть $p \notin \pi$ и V – \mathcal{F} -инъектор группы G , содержащий подгруппу W . Тогда $V / W = V / V \cap O^p(G) \cong VO^p(G) / O^p(G) \in \mathcal{R}_p$ и из $p \notin \pi = \sigma(\mathcal{F})$ следует $V = W$.

Пусть $p \in \pi$. Легко видеть, что W – π -связная подгруппа. Так как по лемме 3.6 $W \text{ pr } G$ и $\Sigma \searrow W$, то ввиду леммы 3.8 $D \leq N_G(W)$. Если $d \in D$, то $W = W^d$. Из $W_{F(p)} \trianglelefteq W$ следует $(W_{F(p)})^d \trianglelefteq W^d = W$. Так как $F(p)$ – множество Фиттинга группы G , то $(W_{F(p)})^d \in F(p)$. Тогда, из определения $F(p)$ -радикала вытекает $(W_{F(p)})^d \leq W_{F(p)}$ для любого элемента $d \in D$. Значит, $(W_{F(p)})^{d^{-1}} \leq W_{F(p)}$ и $W_{F(p)} = (W_{F(p)})^d$. Значит, $D \leq N_G(W_{F(p)})$. Отсюда получаем $(wW_{F(p)})^d \in W / W_{F(p)}$ для любого элемента $w \in W$. Следовательно, $D \leq N_G(W / W_{F(p)})$. Обозначим $Y = C_{D_p}(W / W_{F(p)})$. Ввиду леммы 4.1, $Z = WY \in \mathcal{F}$.

Пусть V – \mathcal{F} -максимальная подгруппа в G такая, что $Z \subseteq V$. Так как $p \in \pi$ и $W \subseteq V$, то по лемме 3.3 $V \in \text{Inj}_{\mathcal{F}}(G)$. Следовательно, $\Sigma \searrow V^g$ для некоторого элемента $g \in G$.

Докажем, что $W \trianglelefteq V^g$. Так как по лемме VIII.2.6 [2] $V \cap O^p(G) \in \text{Inj}_{\mathcal{F}}(O^p(G))$ и $W \in \text{Inj}_{\mathcal{F}}(O^p(G))$, то ввиду выбора V , получаем $W = V \cap O^p(G) \trianglelefteq V$. Но тогда из $W^g \trianglelefteq V^g$ и $\Sigma \searrow V^g$ вытекает, что $\Sigma \searrow W^g$. Следовательно, учитывая $\Sigma \searrow W$ и $W \text{ pr } G$, по лемме 1.1 $W = W^g$ и поэтому $W \trianglelefteq V^g$.

Покажем $C_{D_p}(V^g / V_{F(p)}^g) \leq V^g$. По лемме VIII.2.7 [2] $V^g \in \text{Inj}_{\mathcal{F}}(G)$. Тогда, ввиду леммы 4.1, $V^g \cdot C_{D_p}(V^g / V_{F(p)}^g) \in \mathcal{F}$. Так как V^g – \mathcal{F} -инъектор группы G , то $V^g \cdot C_{D_p}(V^g / V_{F(p)}^g) = V^g$ и $C_{D_p}(V^g / V_{F(p)}^g) \leq V^g$.

Установим, что $C_{D_p}(V^g / V_{F(p)}^g) \leq Y$. Рассмотрим группу V^g . Из леммы 4.1, ввиду $W \trianglelefteq V^g$, вытекает, что $C_{D_p \cap V^g}(V^g / V_{F(p)}^g) \leq C_{D_p \cap V^g}(W^g / W_{F(p)}^g)$. Так как $C_{D_p}(V^g / V_{F(p)}^g) \leq V^g$, то $C_{D_p}(V^g / V_{F(p)}^g) \leq C_{D_p \cap V^g}(V^g / V_{F(p)}^g)$. Тогда, учитывая $C_{D_p \cap V^g}(W^g / W_{F(p)}^g) \leq Y$, имеем $C_{D_p}(V^g / V_{F(p)}^g) \leq Y$.

Проверим, что $V^g \cap D_p = C_{D_p}(V^g / V_{F(p)}^g)$. Учитывая изоморфизм

$$(V^g \cap D_p)V_{F(p)}^g / V_{F(p)}^g \cong V^g \cap D_p / V^g \cap D_p \cap V_{F(p)}^g,$$

$a = |V^g \cap D_p : V_{F(p)}^g \cap D_p| = |(V^g \cap D_p)V_{F(p)}^g : V_{F(p)}^g|$. Очевидно, что a является p -числом.

Кроме того, выполняется равенство $a = \frac{|V^g \cap D_p|}{|V_{F(p)}^g \cap D_p|} = \frac{|V^g| |D_p|}{|V^g D_p|} \cdot \frac{|V_{F(p)}^g| |D_p|}{|V_{F(p)}^g D_p|} = \frac{|V^g|}{|V_{F(p)}^g|} \cdot \frac{|V_{F(p)}^g D_p|}{|V^g D_p|}$.

Следовательно, $a \cdot \frac{|V^g D_p|}{|V_{F(p)}^g D_p|} = \frac{|V^g|}{|V_{F(p)}^g|}$. Так как $V^g \in \mathcal{F}$ и F является полной локальной

H -функцией группы G , то $\frac{|V^g|}{|V_{F(p)}^g|}$ является p' -числом. Следовательно, $a - p'$ -число и $a = 1$.

Значит, $V^g \cap D_p = V_{F(p)}^g \cap D_p$ и, ввиду $V_{F(p)}^g \trianglelefteq V^g$, получаем $V_{F(p)}^g \cap D_p \leq C_{D_p}(V^g / V_{F(p)}^g)$. Тогда $V^g \cap D_p \leq C_{D_p}(V^g / V_{F(p)}^g)$. Так как $C_{D_p}(V^g / V_{F(p)}^g) \leq V^g$, то $V^g \cap D_p = C_{D_p}(V^g / V_{F(p)}^g)$.

По теореме 2.9 локальное множество Фиттинга \mathcal{F} является множеством Фишера и, значит, ввиду леммы 3.2, \mathcal{F} – перестановочное множество Фиттинга. Следовательно, для \mathcal{F} -инъектора V^g группы G выполняются все условия леммы 3.9 и поэтому $V^g \leq D(V^g \cap O^p(G))$. Учитывая $W = V \cap O^p(G)$ и $W = W^g$, получаем $W = V^g \cap O^p(G)$. Значит, $V^g \leq WD$.

Покажем, что $V^g \leq WD_p$. Так как $W \trianglelefteq V^g \leq N_G(W)$, $W \trianglelefteq N_G(W)$, $D \leq N_G(W)$, то $V^g / W \leq WD / W$. Теперь из $W = V^g \cap O^p(G)$ и $V^g / V^g \cap O^p(G) \cong V^g O^p(G) / O^p(G)$ следует $V^g / W \in \mathfrak{X}_p$. По лемме 3.7 выполняется $WD_p / W = (W_p D_p)W / W = (WD)_p W / W \in \text{Syl}_p(WD / W)$.

Следовательно, $(V^g / W)^{wdW} \leq WD_p / W$ для некоторого элемента $wdW \in WD / W$, где $w \in W$ и $d \in D$. Так как $V^g - \pi$ -связная группа, $\Sigma \searrow V^g$, и, ввиду леммы 3.6, $V^g \text{ pr } G$, то по лемме 3.8 $D \leq N_G(V^g)$. Значит, $V^g / W = (V^g / W)^{wdW} \leq WD_p / W$ и поэтому $V^g \leq WD_p$.

Учитывая $V^g \leq WD_p$ и $V^g \cap D_p = C_{D_p}(V^g / V_{F(p)}^g)$, получаем $V^g \leq V^g \cap WD_p = W(V^g \cap D_p) = W \cdot C_{D_p}(V^g / V_{F(p)}^g)$. Тогда из $C_{D_p}(V^g / V_{F(p)}^g) \leq Y$ следует $V^g \leq WY$. Ввиду выбора V , получаем $V^g \leq WY \leq V$. Таким образом, $V^g = WY = V$ и $\Sigma \searrow V$. Теорема доказана.

Литература

1. Gaschütz, W. Zur Theorie der endlichen auflösbaren Gruppen / W. Gaschütz // Math. Z. – 1963. – Bd. 80, № 4. – P. 300–305.
2. Doerk, K. Finite soluble groups / K. Doerk, T. Hawkes. – Berlin. – New York : Walter de Gruyter, 1992. – 891 p.
3. Gaschütz, W. Selected topics in the theory of soluble groups. Lectures given at the 9th Summer Research Institute of the Austral. Math. Soc. / W. Gaschütz. – Canberra, 1969.
4. Fischer, B. Injektoren endlichen auflösbaren Gruppen / B. Fischer, W. Gaschütz, B. Hartley // Math. Z. – 1967. – Bd. 102, № 5. – S. 337–339.
5. Шеметков, Л.А. О подгруппах π -разрешимых групп / Л.А. Шеметков – Конечные группы. – Минск : Наука и техника, 1975. – С. 207–212.
6. Doerk, K. Zur Theorie der Formationen endlichen auflösbaren Gruppen / K. Doerk // J. Algebra. – 1969. – Vol. 13, № 3. – P. 345–373.
7. D’arcy, P. \mathfrak{F} -Abnormality and the theory of finite solvable groups / P. D’arcy // J. Algebra. – 1974. – Vol. 28. – P. 342–361.
8. Воробьев, Н.Т. О построении некоторых классов формаций / Н.Т. Воробьев // Исследование нормального и подгруппового строения конечных групп : сб. науч. тр. / Ин-т математики АН БССР, Труды Гомельского семинара ; под ред. В.И. Сергиенко. – Минск : Наука и техника, 1984. – С. 39–47.
9. Загурский, В.Н. Инъекторы локальных классов Фиттинга / В.Н. Загурский, Н.Т. Воробьев // Веснік ВДУ. – 2010. – № 4 (58). – С. 17–20.
10. Гольберг, П.А. Холловские θ -базы конечных групп / П.А. Гольберг // Известия высших учебных заведений. – 1961. – № 1 (20). – С. 36–43.

11. Сементовский, В.Г. О пронормальных подгруппах конечных π -разрешимых групп / В.Г. Сементовский // Весн. Віцебс. дзярж. ун-та. – 2000. – № 3. – С. 55–59.
12. Hartley, B. On Fischer's dualization of formation theory / B. Hartley // Proc. London Math. Soc. – 1969. – Vol. 3, № 2. – P. 193–207.
13. Воробьев, Н.Т. О предположении Хоукса для радикальных классов / Н.Т. Воробьев // Сиб. матем. журн. – 1996. – Том 37, № 6. – С. 1296–1302.
14. Воробьев, Н.Т. О радикальных классах конечных групп с условием Локетта / Н.Т. Воробьев // Математические заметки. – 1988. – Т. 43, № 2. – С. 161–168.
15. Lockett, F.P. On the Theory of Fitting Classes of finite and soluble groups / F.P. Lockett // Math. Z. – 1973. – Vol. 131. – P. 103–115.
16. Сементовский, В.Г. Инъекторы конечных π -разрешимых групп для произведений и пересечений классов Фиттинга / В.Г. Сементовский // Весн. Віцебс. дзярж. ун-та. – 2002. – № 1. – С. 79–84.
17. D'arcy, P. Locally defined fitting classes / P. D'arcy // J. Austral. Math. Soc. – 1975. – Vol. 20, Series A. – P. 25–32.

Витебский государственный
университет им. П.М. Машерова

Поступила в редакцию 15.09.2014

Об одном свойстве формации всех p -нильпотентных групп

С.Ф. КАМОРНИКОВ

Для формации \mathfrak{F} всех p -нильпотентных групп в данной работе доказывается, что если H и K – \mathfrak{F} -субнормальные подгруппы конечной группы G и $G = HK$, то $G^{\mathfrak{F}} = H^{\mathfrak{F}}K^{\mathfrak{F}}$.

Ключевые слова: конечная группа, \mathfrak{F} -субнормальная подгруппа, формация всех p -нильпотентных групп, \mathfrak{F} -корадикал.

For the formation \mathfrak{F} of all p -nilpotent groups, it is proved, that if H, K are \mathfrak{F} -subnormal subgroups of a finite group G and $G = HK$, then $G^{\mathfrak{F}} = H^{\mathfrak{F}}K^{\mathfrak{F}}$.

Keywords: finite group, \mathfrak{F} -subnormal subgroup, formation of all p -nilpotent groups, \mathfrak{F} -residual.

Введение. Конечная группа называется p -нильпотентной, если она обладает нормальной холловой p' -подгруппой. Проверка показывает, что множество всех p -нильпотентных групп образует формацию. Эта формация в теории классов выполняет достаточно важную роль: она выступает в качестве того строительного материала, с помощью которого на основе значений локальной функции конструируются все локальные формации [1].

Особое место формация всех p -нильпотентных групп занимает и при решении целого ряда вопросов теории групп. В частности, к ней редуцируется известная проблема Л.А. Шеметкова о перестановочности корадикалов субнормальных подгрупп [2].

Свойства формации \mathfrak{F} всех p -нильпотентных групп достаточно хорошо изучены. Например, она является наследственной насыщенной формацией Фиттинга [1]. Как показал Ито [3], каждая минимальная не p -нильпотентная группа является группой Шмидта. Поэтому \mathfrak{F} – формация с условием Шеметкова. Кроме того, она является сверхрадикальной [4], но, как отмечено в [5], не индуцирует функтор Виландта на \mathfrak{F} -достижимых и \mathfrak{F} -субнормальных подгруппах (т. е. не является формацией, обладающей обобщенным свойством Виландта для корадикалов, или GWP-формацией, если придерживаться терминологии книги) [6].

В данной работе приводится новое свойство формации всех p -нильпотентных групп, указывающее на близость ее к GWP-формациям. Главная цель работы – доказательство следующей теоремы.

Теорема. Пусть \mathfrak{F} – формация всех p -нильпотентных групп. Если H и K – \mathfrak{F} -достижимые подгруппы группы G и $G = HK$, то $G^{\mathfrak{F}} = H^{\mathfrak{F}}K^{\mathfrak{F}}$.

Следствие. Пусть \mathfrak{F} – формация всех p -нильпотентных групп. Если H и K – \mathfrak{F} -субнормальные подгруппы группы G и $G = HK$, то $G^{\mathfrak{F}} = H^{\mathfrak{F}}K^{\mathfrak{F}}$.

Предварительные результаты. В работе рассматриваются только конечные группы. Используются определения и обозначения, принятые в [7].

Напомним, что *формация* – это класс групп, замкнутый относительно взятия гомоморфных образов и конечных подпрямых произведений. Если \mathfrak{F} – непустая формация, то через $G^{\mathfrak{F}}$ обозначается пересечение всех тех нормальных подгрупп N группы G , для которых $G/N \in \mathfrak{F}$ (подгруппа $G^{\mathfrak{F}}$ называется *F-корадикалом* группы G).

Если \mathfrak{F} – непустая формация, то подгруппа H группы G называется *\mathfrak{F} -достижимой*, если либо $H = G$, либо существует цепь подгрупп

$$H = H_0 \subseteq H_1 \subseteq \dots \subseteq H_n = G, \quad (1)$$

такая, что для каждого $i = 1, 2, \dots, n$ либо подгруппа H_{i-1} нормальна в H_i , либо подгруппа H_{i-1} максимальна в H_i и $H_i / \text{Core}_{H_i}(H_{i-1}) \in \mathfrak{F}$.

Подгруппа H называется \mathfrak{F} -субнормальной, если либо $H = G$, либо существует максимальная цепь подгрупп

$$H = H_0 \subset H_1 \subset \dots \subset H_n = G, \quad (2)$$

такая, что $H_i / \text{Core}_{H_i}(H_{i-1}) \in \mathfrak{F}$ для каждого $i = 1, 2, \dots, n$.

Из определений следует, что каждая \mathfrak{F} -субнормальная подгруппа группы G является \mathfrak{F} -достижимой в G .

В виде лемм приведем ряд утверждений, необходимых для доказательства основного результата работы. Первые три леммы содержат информацию об общих свойствах \mathfrak{F} -достижимых подгрупп. Доказательство их можно найти в [7].

Лемма 2.1. Пусть \mathfrak{F} – непустая формация. Пусть H и N – подгруппы группы G , причем подгруппа N нормальна в G . Тогда:

- 1) если подгруппа H \mathfrak{F} -достижима в группе G , то подгруппа HN/N \mathfrak{F} -достижима в G/N , а подгруппа HN \mathfrak{F} -достижима в G ;
- 2) если $N \subseteq H$, то подгруппа H \mathfrak{F} -достижима в G тогда и только тогда, когда подгруппа H/N \mathfrak{F} -достижима в G/N .

Лемма 2.2. Пусть \mathfrak{F} – непустая наследственная формация. Тогда справедливы следующие утверждения:

- 1) если \mathfrak{F} -корадикал группы G содержится в подгруппе H , то H – \mathfrak{F} -достижимая подгруппа группы G ;
- 2) если H и K – подгруппы группы G , причем H \mathfrak{F} -достижима в G , то подгруппа $H \cap K$ \mathfrak{F} -достижима в K ;
- 3) если подгруппа H \mathfrak{F} -достижима в K и подгруппа K \mathfrak{F} -достижима в G , то подгруппа H \mathfrak{F} -достижима в G ;
- 4) если подгруппы H и K \mathfrak{F} -достижимы в G , то подгруппа $H \cap K$ \mathfrak{F} -достижима в G .

Лемма 2.3. Пусть \mathfrak{F} – непустая наследственная формация. Если подгруппа H \mathfrak{F} -достижима в G , то подгруппа H^δ субнормальна в G .

Лемма 2.4. Пусть \mathfrak{F} – формация всех p -нильпотентных групп. Пусть H – \mathfrak{F} -достижимая подгруппа группы G . Если K – нормальная p -подгруппа группы G и $G = HK$, то $G^\delta = H^\delta$.

Доказательство. Пусть G – группа наименьшего порядка, для которой лемма неверна, т. е. $G^\delta \neq H^\delta$.

Пусть L – минимальная нормальная подгруппа группы G . На основании леммы 2.1 подгруппа HL/L \mathfrak{F} -достижима в группе G/L . Поскольку $|G/L| < |G|$, то по индукции справедливо равенство $(G/L)^\delta = (HL/L)^\delta$. Отсюда имеем $G^\delta L = H^\delta L$. Так как формация \mathfrak{F} наследственна, то $H^\delta \subseteq G^\delta$. Если $\text{Core}_G(H^\delta) \neq 1$, то, выбрав подгруппу L в $\text{Core}_G(H^\delta)$, из $G^\delta L = H^\delta L$ получим равенство $G^\delta = H^\delta$. Противоречие.

Значит, $\text{Core}_G(H^\delta) = 1$. Допустим, что L не содержится в G^δ . Тогда из $H^\delta \subseteq G^\delta$ следует $L \cap H^\delta \neq 1$. Сравнивая порядки подгрупп H^δ и G^δ , из $G^\delta L = H^\delta L$, приходим к равенству $G^\delta = H^\delta$. Противоречие с выбором группы G .

Итак, $\text{Soc}(G) \subseteq G^\delta$. Ввиду леммы 2.3 подгруппа H^δ субнормальна в G . На основании теоремы Виландта из [8] имеем, что подгруппа L нормализует подгруппу H^δ . Отсюда и из равенства $G^\delta = H^\delta L$ следует, что подгруппа H^δ нормальна в G^δ .

Пусть T – минимальная нормальная подгруппа группы L . Так как K – неединичная нормальная p -подгруппа группы G , то, не нарушая общности рассуждений, можно считать, что T – группа порядка p . Обозначим $\mathfrak{F} = \text{form}T$. Так как

$$G^{\mathfrak{F}} / H^{\mathfrak{F}} \simeq L / L \cap H^{\mathfrak{F}} \in \text{form} T, \quad (3)$$

то $(G^{\mathfrak{F}})^{\mathfrak{F}} \subseteq H^{\mathfrak{F}}$. Пусть $(G^{\mathfrak{F}})^{\mathfrak{F}} \neq 1$. Рассмотрим группу $G / (G^{\mathfrak{F}})^{\mathfrak{F}}$. Ввиду выбора группы G из $(G^{\mathfrak{F}})^{\mathfrak{F}} \subseteq H^{\mathfrak{F}}$ следует, что $G^{\mathfrak{F}} / (G^{\mathfrak{F}})^{\mathfrak{F}} = H^{\mathfrak{F}} / (G^{\mathfrak{F}})^{\mathfrak{F}}$, откуда $G^{\mathfrak{F}} = H^{\mathfrak{F}}$. Противоречие. Следовательно, $(G^{\mathfrak{F}})^{\mathfrak{F}} = 1$. Это означает, что $G^{\mathfrak{F}} \in \text{form} T$, т.е. $G^{\mathfrak{F}}$ – элементарная абелева p -группа.

Очевидно, H содержит холлову p' -подгруппу группы G . Поэтому из строения p -нильпотентных групп следует, что подгруппа $HG^{\mathfrak{F}}$ субнормальна в G . Кроме того, группа G представима в виде произведения $G = (HG^{\mathfrak{F}})K$. Теперь ввиду леммы 2.3.2 из [7] справедливо равенство $G^{\mathfrak{F}} = (HG^{\mathfrak{F}})^{\mathfrak{F}}$. Если $|HG^{\mathfrak{F}}| < |G|$, то по индукции $(HG^{\mathfrak{F}})^{\mathfrak{F}} = H^{\mathfrak{F}}$. Отсюда $G^{\mathfrak{F}} = H^{\mathfrak{F}}$.

Значит, полагаем далее, что $HG^{\mathfrak{F}} = G$. Так как подгруппа H \mathfrak{F} -достижима в G и $H \neq G$, то существует цепь подгрупп

$$H = H_0 \subseteq H_1 \subseteq \dots \subseteq H_n = G, \quad (4)$$

такая, что для каждого $i = 1, 2, \dots, n$ либо подгруппа H_{i-1} нормальна в H_i , либо подгруппа H_{i-1} максимальна в H_i и $H_i / \text{Core}_{H_i}(H_{i-1}) \in \mathfrak{F}$. Рассмотрим подгруппу H_{n-1} . Так как $HG^{\mathfrak{F}} = G$, то $H_{n-1}G^{\mathfrak{F}} = G$, т.е. H_{i-1} не может быть \mathfrak{F} -нормальной максимальной подгруппой группы G . Поэтому подгруппа H_{n-1} нормальна в G . Значит, в силу леммы 2.3.2 из [7], справедливо равенство $G^{\mathfrak{F}} = H_{n-1}^{\mathfrak{F}}$.

Очевидно, подгруппа H \mathfrak{F} -достижима в подгруппе H_{n-1} . Кроме того, $H_{n-1} = H(H_{n-1} \cap K)$. По индукции справедливо равенство $H_{n-1}^{\mathfrak{F}} = H^{\mathfrak{F}}$. Отсюда $G^{\mathfrak{F}} = H^{\mathfrak{F}}$. Снова пришли к противоречию. Лемма доказана.

Лемма 2.5. Пусть $G = HK$ – p -разрешимая группа. Тогда найдутся такие холловы p' -подгруппы $H_{p'}$, $K_{p'}$ и $G_{p'}$ соответственно в H , K и G , что $G_{p'} = H_{p'}K_{p'}$.

Доказательство. Пусть H_1 , K_1 и G_1 – холловы p' -подгруппы соответственно в H , K и G . По теореме Холла $H_1^x \subseteq G_1$, $K_1^y \subseteq G_1$ для некоторых $x, y \in G$. По лемме 11.5 из [1] существует такой элемент $z \in G$, что $H_1^{xz} = H$, $K_1^{yz} = K$. Положим $H_1^{xz} = H_{p'}$, $K_1^{yz} = K_{p'}$, $G_1^z = G_{p'}$. Тогда $H_{p'} = H_1^{xz} \subseteq G_1^z = G_{p'}$ и $K_{p'} = K_1^{yz} \subseteq G_1^z = G_{p'}$. Установим теперь справедливость равенства $G_{p'} = H_{p'}K_{p'}$.

Пусть $|G_{p'}| = s$, $|H_{p'}| = h$, $|K_{p'}| = k$, $|G| = sn$, $|H| = hn_1$, $|K| = kn_2$, $|H \cap K| = s'n'$, где s' делит наибольший общий делитель чисел h и k , а n' делит наибольший общий делитель чисел n_1 и n_2 . Тогда имеем:

$$|G| = sn = |HK| = (hk / s')(n_1n_2 / n'), \quad (5)$$

Так как $H_{p'} \cap K_{p'} \subseteq H \cap K$, то $|H_{p'} \cap K_{p'}|$ делит s' . Поэтому

$$|H_{p'}K_{p'}| = hk / |H_{p'} \cap K_{p'}| \geq (hk / s') = s = |G_{p'}|, \quad (6)$$

Отсюда и из $H_{p'}K_{p'} \subseteq G_{p'}$ получаем $G_{p'} = H_{p'}K_{p'}$. Лемма доказана.

3. Доказательство теоремы. Пусть G – группа наименьшего порядка, обладающая некоторыми \mathfrak{F} -достижимыми подгруппами H и K такими, что $G = HK$, но $G^{\mathfrak{F}} \neq H^{\mathfrak{F}}K^{\mathfrak{F}}$. Очевидно, что в этом случае H и K – собственные подгруппы группы G , а сама группа G не является p -нильпотентной.

Среди всех пар \mathfrak{F} -достижимых подгрупп группы G , для которых \mathfrak{F} -корадикал группы G не равен произведению \mathfrak{F} -корадикалов подгрупп, выберем пару (H, K) с наименьшей суммой индексов в группе G . Таким образом, для \mathfrak{F} -достижимых подгрупп H и K группы G имеем $G^{\mathfrak{F}} \neq H^{\mathfrak{F}}K^{\mathfrak{F}}$, а для любых \mathfrak{F} -достижимых подгрупп H_1 и K_1 , для которых $G = H_1K_1$ и $|G : H_1| + |G : K_1| < |G : H| + |G : K|$, справедливо равенство $G^{\mathfrak{F}} = H_1^{\mathfrak{F}}K_1^{\mathfrak{F}}$.

Пусть L – минимальная нормальная подгруппа группы G . Если L не содержится в G^δ , то $L \cap G^\delta = 1$. Так как формация \mathfrak{F} наследственна, то $H^\delta K^\delta \subseteq G^\delta$. На основании леммы 2.1 подгруппы HL/L и KL/L \mathfrak{F} -достижимы в группе G/L . Кроме того, группа G/L представима в виде произведения подгрупп HL/L и KL/L . Значит, ввиду выбора группы G имеем $G^\delta L/L = (HL/L)^\delta (KL/L)^\delta$. Отсюда $G^\delta L = H^\delta K^\delta L$. Сравнивая теперь порядки подгрупп $H^\delta K^\delta$ и G^δ , получаем $G^\delta = H^\delta K^\delta$, что противоречит выбору подгрупп H и K .

Итак, любая минимальная нормальная подгруппа L группы G содержится в G^δ и $G^\delta = H^\delta K^\delta L$.

Пусть \mathfrak{M} – формация всех p -разрешимых групп. На основании теоремы 3.3.8 из [7] она индуцирует оператор Виландта на \mathfrak{M} -достижимых подгруппах. Так как $\mathfrak{F} \subseteq \mathfrak{M}$, то \mathfrak{F} -достижимые подгруппы H и K являются \mathfrak{M} -достижимыми. Поэтому справедливо равенство $G^\mathfrak{M} = \langle H^\mathfrak{M}, K^\mathfrak{M} \rangle$. На основании леммы 3.4.1 из [7] подгруппы $H^\mathfrak{M}$ и $K^\mathfrak{M}$ перестановочны. Поэтому $G^\mathfrak{M} = H^\mathfrak{M} K^\mathfrak{M}$. Если группа G не является p -разрешимой, то $G^\mathfrak{M} \neq 1$. Выбрав тогда подгруппу L в $G^\mathfrak{M}$, из включений $H^\mathfrak{M} \subseteq H^\delta$, $K^\mathfrak{M} \subseteq K^\delta$, $G^\mathfrak{M} \subseteq G^\delta$ и равенства $G^\delta = H^\delta K^\delta L$ получаем, что $G^\delta = H^\delta K^\delta$. Противоречие. Поэтому полагаем далее, что группа G является p -разрешимой.

Ввиду леммы 2.3 подгруппы H^δ и K^δ субнормальны в G . Тогда из свойств субнормальных подгруп следует, что подгруппы $H^\delta L$ и $K^\delta L$ также субнормальны в группе G . Так как группа G p -разрешима, то либо L – p' -группа, либо L – p -группа.

Пусть L – p' -группа и \mathfrak{X} – класс всех p' -групп. Тогда на основании леммы 2.3.2 из [7] справедливо равенство $(G^\delta)^\mathfrak{X} = (H^\delta L)^\mathfrak{X} (K^\delta L)^\mathfrak{X} = (H^\delta)^\mathfrak{X} L^\mathfrak{X} (K^\delta L)^\mathfrak{X} L^\mathfrak{X} = (H^\delta)^\mathfrak{X} (K^\delta)^\mathfrak{X}$.

Если $(G^\delta)^\mathfrak{X} \neq 1$, то, выбрав подгруппу L в $(G^\delta)^\mathfrak{X}$, из равенства $G^\delta = H^\delta K^\delta L$ получаем, что $G^\delta = H^\delta K^\delta$. Противоречие. Значит, $(G^\delta)^\mathfrak{X} = 1$, т. е. G^δ – p' -группа. Но тогда из p -нильпотентности факторгруппы G/G^δ следует, что и группа G p -нильпотентна. Снова пришли к противоречию.

Пусть теперь L – p -группа. Тогда, как и выше, показывается, что G^δ – p -группа.

Обозначим подгруппу G^δ через P . Предположим, что P не содержится хотя бы в одной из подгрупп H и K . Пусть для определенности P не содержится в H . Так как подгруппа HP \mathfrak{F} -достижима в G , $G = (HP)K$ и выполняется неравенство $|G : HP| + |G : K| < |G : H| + |G : K|$, то $G^\delta = (HP)^\delta K^\delta$. На основании леммы 2.4 справедливо равенство $(HP)^\delta = H^\delta$. Значит, $G^\delta = H^\delta K^\delta$. Противоречие.

Итак, далее полагаем, что $G^\delta \subseteq H \cap K$.

Ввиду леммы 2.5 найдутся такие холловы p' -подгруппы $H_{p'}$, $K_{p'}$ и $G_{p'}$ соответственно в H , K и G , что $G_{p'} = H_{p'} K_{p'}$. Рассмотрим группу $T = G^\delta G_{p'}$. Пусть $H_2 = G^\delta H_{p'}$ и $K_2 = G^\delta K_{p'}$. Поскольку $G^\delta \subseteq H_2 \cap K_2$, то ввиду леммы 2.2 подгруппы H_2 и K_2 \mathfrak{F} -достижимы в группе T . Кроме того, $T = H_2 K_2$. Если $|T| < |G|$, то $T^\delta = H_2^\delta K_2^\delta$. Очевидно, $G^\delta = T^\delta$. Кроме того, $H_2^\delta K_2^\delta \subseteq H^\delta K^\delta$. Отсюда следует, что $G^\delta = H^\delta K^\delta$. Противоречие.

Значит, $T = G$ и G^δ – силовская p -подгруппа группы G . Пусть \mathfrak{D} – формация всех p -разложимых групп. Так как $G^\mathfrak{D} \subseteq P \subseteq H$ и $G^\mathfrak{D} \subseteq P \subseteq K$, то на основании леммы 2.2 подгруппы H и K \mathfrak{D} -достижимы в группе G . Теперь в силу теоремы 3.3.8 из [7] справедливо равенство $G^\delta = G^\mathfrak{D} = H^\mathfrak{D} K^\mathfrak{D} = H^\delta K^\delta$. Снова пришли к противоречию. Теорема доказана.

Литература

1. Шеметков, Л.А. Формации конечных групп / Л.А. Шеметков. – М. : Наука, 1978. – 272 с.
2. Каморников, С.Ф. Перестановочные субнормальные подгруппы конечных групп / С.Ф. Каморников // ДАН БССР. – 1989. – Т. 33, № 5. – С. 396–399.
3. Ito, N. Note on (LN)-groups of finite order / N. Ito // Kodai Math. Seminar Report. – 1951. – Vol. 1–2. – P. 1–6.
4. Семенчук, В.Н. Сверхрадикальные формации / В.Н. Семенчук, Л.А. Шеметков // Докл. НАН Беларуси. – 2000. – Т. 44, № 5. – С. 24–26.
5. Каморников, С.Ф. Сверхрадикальные формации / С.Ф. Каморников // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2014. – № 3 (84). – С. 50–57.
6. Ballester-Bolinches, A. Classes of finite groups / A. Ballester-Bolinches, L.M. Ezquerro. – Dordrecht : Springer, 2006. – 385 p.
7. Каморников, С.Ф. Подгрупповые функторы и классы конечных групп / С.Ф. Каморников, М.В. Селькин. – Минск : Беларуская навука, 2003. – 256 с.
8. Wielandt, H. Über den Normalisator subnormalen Untergruppen / H. Wielandt // Math. Z. – 1958. – Vol. 69, № 8. – P. 463–465.

Международный университет
«МИТСО», Гомельский филиал

Поступила в редакцию 10.11.2014

Численная реализация методики по определению напряжений и перемещений в объёмном теле применительно к техническим приложениям

В.В. МОЖАРОВСКИЙ, Д.С. КУЗЬМЕНКОВ

Рассматривается задача определения напряжений и перемещений в объёмном теле, заданной формы при заданных областях контакта и действующем давлении. Для решения поставленной задачи был использован и успешно запрограммирован метод конечных элементов. Описывается разработанный алгоритм решения задачи и основные возможности созданного программного комплекса. Реализована возможность не только построения эпюры на основе заданной, но и работа с готовой эпюрой, загруженной из файла, с распознаванием цвета точек.

Ключевые слова: напряжения и перемещения в объёмном теле, область контакта, метод конечных элементов, распознавание цвета.

The problem of definition of pressure and moving in the volumetric body of the set form is considered at the set areas of contact and working pressure. For the decision of a task in view the method of final elements has been used and successfully programmed. The developed algorithm of the problem's decision and the basic opportunities of the created program complex are described. The opportunity not only for constructions of the drawing on the basis of set, but also the work with the ready drawing loaded from a file, with recognition of color of points is realized.

Keywords: pressure and moving in the volumetric body, areas of contact, method of final elements, recognition of color.

Введение. Задача определения напряжений и перемещений в объёмном теле заданной формы при заданных областях контакта и действующем давлении является достаточно актуальной в настоящее время. Например, одной из таких задач является задача моделирования работы системы «массивная шина – дорожное покрытие» [1], [2]. Определение напряжений и перемещений, возникающих в шине, имеет первостепенное значение для установления физико-технических характеристик шины, влияющих на долговечность шины, износоустойчивость, выбор подходящего рисунка протектора и т. д.

1. Постановка задачи. Настоящая работа посвящена алгоритму решения граничных задач, моделирующих определение напряжений и перемещений в объёмном теле заданной формы при заданных областях контакта и действующем давлении. Для реализации решения данной задачи используем известный аналитический подход, который отражен в работах [3], [4].

Пусть на границу упругого полупространства $x_3 > 0$ нормальная нагрузка, распределенная по площадке ω с плотностью $p(x_1, x_2)$, приложенная в точке $(y_1, y_2, 0)$ и направленная вдоль оси Ox_3 . Необходимо определить перемещения и напряжения в упругом полубесконечном теле.

Следуя схеме, описанной в [3], запишем формулы для перемещений точек упругого полупространства в виде (исходя из предположения, что на упругое тело действует нормальная нагрузка, распределенная по площадке ω с плотностью $p(x_1, x_2)$),

$$u_i = -\frac{1}{4\pi\mu} \left(x_3 \frac{\partial V}{\partial x_i} - \frac{\mu}{\lambda + \mu} \int_{x_3}^{\infty} \frac{\partial V}{\partial x_i} dx_3 \right), \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

$$u_3 = -\frac{1}{4\pi\mu} \left(x_3 \frac{\partial V}{\partial x_3} - \frac{\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} V \right), \quad (2)$$

где $V(x) = \iint_{\omega} \frac{p(y)}{R(y, x)} dy$, $R(y, x) = ((x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + x_3^2)^{1/2}$ – расстояние от точки наблюдения M с координатами (x_1, x_2, x_3) до точки приложения сосредоточенной силы, μ , λ – модуль сдвига и постоянная Ламе.

Полю перемещений (1), (2) соответствуют следующие компоненты тензора напряжений:

$$\begin{aligned}\sigma_{11} &= -\frac{x_3}{2\pi} \frac{\partial^2 V}{\partial x_1^2} + \frac{\lambda}{2\pi(\lambda + \mu)} \frac{\partial V}{\partial x_3} + \frac{\mu}{2\pi(\lambda + \mu)} \int_{x_3}^{\infty} \frac{\partial^2 V}{\partial x_1^2} dx_3, \\ \sigma_{22} &= -\frac{x_3}{2\pi} \frac{\partial^2 V}{\partial x_2^2} + \frac{\lambda}{2\pi(\lambda + \mu)} \frac{\partial V}{\partial x_3} + \frac{\mu}{2\pi(\lambda + \mu)} \int_{x_3}^{\infty} \frac{\partial^2 V}{\partial x_2^2} dx_3, \\ \sigma_{33} &= -\frac{x_3}{2\pi} \frac{\partial^2 V}{\partial x_3^2} + \frac{1}{2\pi} \frac{\partial V}{\partial x_3}, \\ \sigma_{12} &= -\frac{x_3}{2\pi} \frac{\partial^2 V}{\partial x_1 \partial x_2} + \frac{\mu}{2\pi(\lambda + \mu)} \int_{x_3}^{\infty} \frac{\partial^2 V}{\partial x_1 \partial x_2} dx_3, \quad \sigma_{13} = -\frac{x_3}{2\pi} \frac{\partial^2 V}{\partial x_1 \partial x_3}, \quad \sigma_{23} = -\frac{x_3}{2\pi} \frac{\partial^2 V}{\partial x_2 \partial x_3}.\end{aligned}\quad (3)$$

Таким образом, перемещения и напряжения в упругом полубесконечном теле могут быть найдены по формулам Беляева (1)–(3), как только будет известна функция $V(x)$, которая может быть вычислена, когда будет известна плотность $p(x_1, x_2)$ распределения контактного давления [2].

2. Определения напряжений и перемещений в объемном теле, возможности разработанного программного комплекса. Рассмотрим систему «массивная шина – дорожное покрытие». Экспериментально (с помощью специальной чувствительной бумаги) или численно [1], [2], можно получить эпюр нагрузок на шину при соприкосновении ее с поверхностью (рисунок 1). Задача состоит в определении напряжений и перемещений внутри шины.

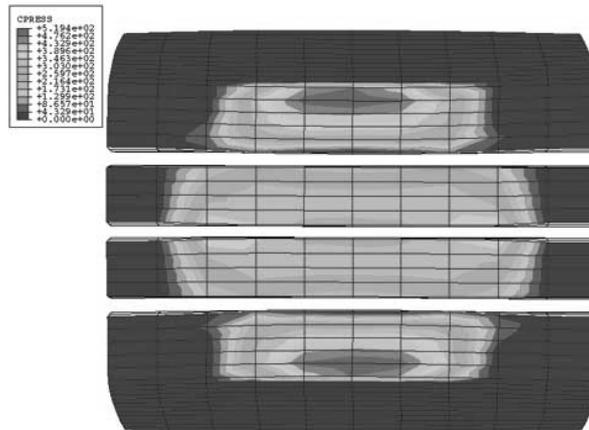


Рисунок 1 – Эпюр нагрузок на поверхности шины

Основываясь на проведенных экспериментальных (или численных) исследованиях, определяется зона контакта и распределение давления в контакте. Далее по созданному алгоритму находим напряженно-деформированное состояние контактирующих тел. Разработан алгоритм и создана программа, реализующая определение напряжений и перемещений в объемном теле, заданной формы (например, в системе «массивная шина – дорожное покрытие»). Для решения поставленной задачи был использован и успешно запрограммирован метод конечных элементов. Применялись прямоугольные конечные элементы. Разработанная программа позволяет находить напряженно-деформированное состояние (НДС) в упругом теле при изменении зон контакта и действующего давления во времени. Метод основан на считывании цвета в зоне контакта (каждому давлению в точке соответствует свой цвет). Так, экспериментально полученные результаты можно обработать и получить картину изменения НДС.

Более подробно рассмотрим алгоритм распознавания загруженного из файла изображения. Сначала загружаем изображение (т. е. эпюр, например в формате .jpg, рисунок 1), его разбиваем на конечные элементы (КЭ), определяем средний цвет в КЭ и соотносим его с

одним из выбранных в программе цветов, которому соответствует определенное значение нагрузки (рисунок 2). В программе также предусмотрена возможность просмотра и изменения значений давления, соответствующих определенным цветам.

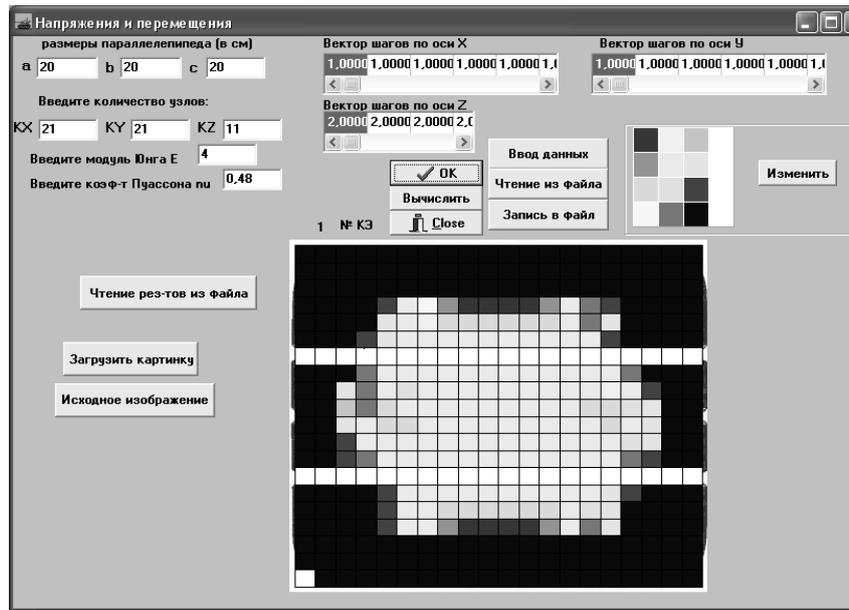
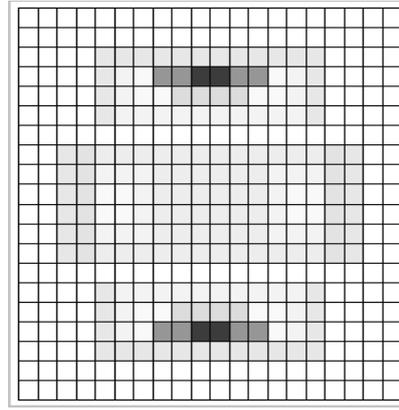
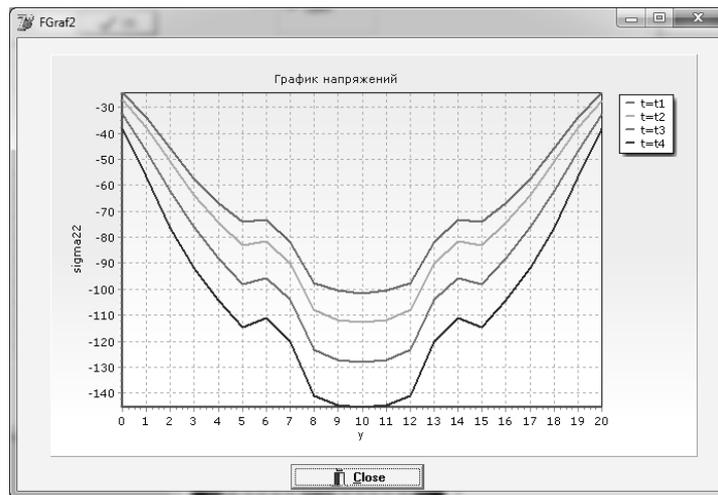


Рисунок 2 – Распознавание цветов

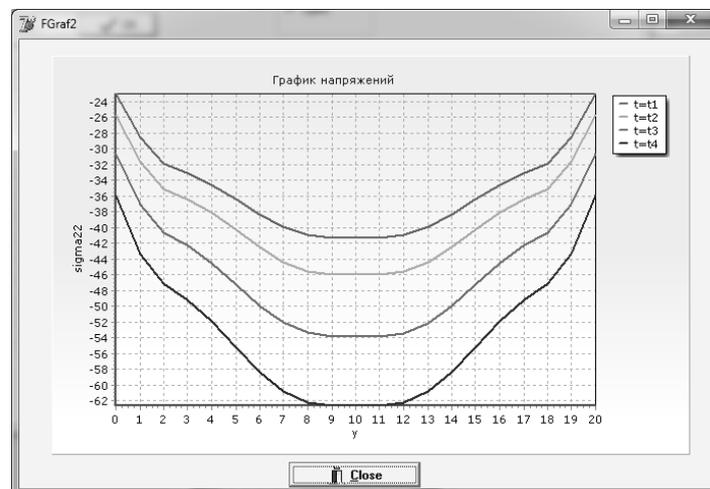
Построенную дискретизацию загруженного из файла изображения можно сохранить в файл на диске. После чего эти данные можно считывать из этого файла, и на экране будет появляться раскрашенная дискретизированная область. Так как при большом числе КЭ программа работает значительное время, была также предусмотрена возможность записи полученных результатов (исходные данные, напряжения, перемещения) в файл. Имя файла генерируется динамически внутри программы и состоит из имен соответствующих величин и их значений. Воспользовавшись кнопкой «Чтение результатов из файла», можно считать эти результаты в любой момент и просмотреть их численное и графическое представление.

Программа также осуществляет автоматическую подгонку загружаемого изображения под заданный в программе размер и конвертирует файл в используемый в программе формат. За один запуск программы можно просчитать несколько различных примеров, исходные данные которых либо вводятся пользователем, либо загружаются из файлов. После расчета нескольких примеров можно построить графики выбранных компонент напряжения или перемещения для всех просчитанных примеров (т. е. изменения компонента напряжения или перемещения с течением времени). После выбора компоненты перемещения или напряжения для вывода и фиксации двух слоев из трех (по x , по y , по z) отображаются перемещения и напряжения при двух фиксированных переменных, и строится соответствующий график выбранной компоненты напряжения или перемещения (рисунок 4).

Рассмотрим пример (рисунок 3). Исследуем зависимость σ_{22} от значений по y (значения по x и по z зафиксируем) при увеличении нагрузки (давления) на поверхности тела с течением времени. Была просчитана серия из 4 примеров, все они имеют одинаковые исходные данные (модуль упругости $E = 4 \cdot 10^{11}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0.48$ и т. д.), за исключением распределения давления на поверхности тела. На рисунках 4 и 5 представлены графики зависимости σ_{22} от y в различных точках по x, z с течением времени ($t = t_1, t_4$) Аналогичные графики и для других компонент тензора напряжений и для перемещений.

Рисунок 3 – Распределение давления на поверхности $t = t_1$ Рисунок 4 – График зависимости напряжений σ_{22} от y в точке $(x = 7.5\tilde{n}\tilde{i}, z = 2.5\tilde{n}\tilde{i})$

Были получены результаты, полностью согласующиеся с экспериментальными данными. Например, установлено, что при увеличении давления на поверхности соответственно увеличиваются напряжения σ_{22} как на поверхности, так и внутри (рисунки 4–5). Также, на рисунке 4 видны 2 значения σ_{22} (около -115 , «минус» показывает направление), соответствующие большим значениям давления на поверхности ($y = 5\tilde{n}\tilde{i}$, $y = 15\tilde{n}\tilde{i}$, рисунок 3). При симметричности действующего на поверхность давления сохраняется симметричность получаемых результатов.

Рисунок 5 – График зависимости напряжений σ_{22} от y в точке $(x = 7.5\tilde{n}\tilde{i}, z = 5\tilde{n}\tilde{i})$

Также разработанный программный комплекс позволяет строить объемные графики напряжений и перемещений как на поверхности шины (рисунок 6), так и внутри ее.

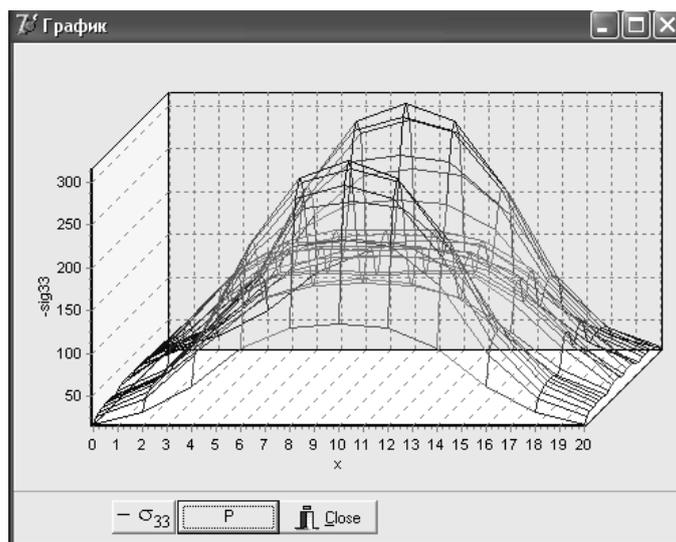


Рисунок 6 – График изменения напряжений $-\sigma_{33}$ при $z = 0$

Заключение. В статье рассмотрена численная реализация методики определения напряжений и перемещений в объемном теле заданной формы при заданных областях контакта и действующем давлении. Описывается алгоритм решения поставленной задачи, для дискретизации областей контакта был использован метод конечных элементов. В статье приведены основные возможности созданного программного комплекса (на примере системы «массивная шина – дорожное покрытие»), реализована возможность дискретизации эпюра областей контакта, загружаемого из файла, с распознаванием цвета точек в прямоугольных конечных элементах. Разработанную методику можно легко обобщить на другие задачи моделирования взаимодействия объемных тел.

Литература

1. Рыжов, С.А. Проектирование шин с использованием программного комплекса ABAQUS / С.А. Рыжов, К.А. Ильин, А.Н. Варюхин // САПР и графика. – 2006. – № 1. – С. 20–40.
2. Можаровский, В.В. Анализ контактного взаимодействия автомобильной шины с колесным диском и дорожным покрытием / В.В. Можаровский [и др.] // Доклады Белорусского конгресса по механике : сборник научных трудов. – 2007. – С. 135–142.
3. Аргатов, И.И. Основы теории упругого дискретного контакта / И.И. Аргатов, Н.Н. Дмитриев. – Мн. : Политехника, 2003. – 233 с.
4. Лурье, А.И. Пространственные задачи теории упругости. / А.И. Лурье. – М. : Гиттл, 1955. – 492 с.

О произведении обратимых элементов кольца классов вычетов

В.С. МОНАХОВ¹, И.К. ЧИРИК²

Доказывается, что в кольце классов вычетов по модулю m произведение всех обратимых элементов равно $\bar{1}$ или $\overline{m-1}$.

Ключевые слова: вычет, кольца классов вычетов, конечная абелева группа, функция Эйлера.

We prove that the product of all inverse elements of residue classes modulo m is equal to $\bar{1}$ or $\overline{m-1}$.

Keywords: residue, residue class rings, finite Abelian group, Euler phi function.

Согласно теореме Вильсона натуральное число p является простым тогда и только тогда, когда $(p-1)! \equiv -1 \pmod{p}$. Карл Фридрих Гаусс заметил [1, с. 77–78]: «В более общем виде теорему Вильсона можно высказать так. Произведение всех чисел, которые меньше некоторого заданного числа A и одновременно взаимно просты с ним, сравнимы по модулю A с единицей, взятой с положительным или с отрицательным знаком. С отрицательным знаком единица получается когда A имеет вид p^m или $2 \cdot p^m$, где p означает отличное от 2 простое число, и, кроме того, при $A = 4$, во всех остальных случаях получается положительная единица». Далее Гаусс отмечает: «Теорема, высказанная Вильсоном, содержится в первом случае. Доказательство мы ради краткости не приводим, заметим только, что оно может быть проведено подобным же образом, как в предыдущем пункте, Можно было бы также вывести доказательство из рассмотрения индексов, ...».

В 1903 г. Миллер [2] привел новое доказательство, использующее теорию групп.

В настоящей заметке мы приводим более современное доказательство теоремы Миллера, которое затем применяем для получения обобщенной теоремы Вильсона. Все используемые понятия и обозначения соответствуют [3]–[4]. Через $|X|$ обозначается порядок конечной группы X , $p(G)$ – произведение всех элементов группы G .

Пусть m – натуральное число и $Z_m = \{\bar{0}, \bar{1}, \dots, \overline{m-1}\}$ – кольцо классов вычетов по модулю m , где $0, 1, \dots, m-1$ – наименьшие неотрицательные вычеты. Мультипликативная группа Z_m^* обратимых элементов абелева порядка $\varphi(m)$ и состоит из тех классов, наименьшие неотрицательные вычеты которых взаимно просты с модулем m , [3, теорема 4.1, с. 86]. Здесь $\varphi(m)$ – функция Эйлера. Заметим, что класс $\overline{m-1}$ принадлежит группе Z_m^* при любом $m > 1$ и является элементом порядка 2 при любом $m > 2$. Группа Z_m^* циклическая [3, теорема 7.4, с. 168] тогда и только тогда, когда $m \in A$, где $A = \{2, 4, p^t, 2 \cdot p^t \mid p \in P \setminus \{2\}, t \in N\}$.

Здесь N – множество всех натуральных чисел, а P – множество всех простых чисел.

Лемма 1. Если $G = A \times B$ – конечная абелева группа, A и B – ее подгруппы, то $p(G) = p(A)^{|B|} p(B)^{|A|}$.

Доказательство. Пусть $A = \{1 = a_1, a_2, \dots, a_n\}$, $n = |A|$, $B = \{1 = b_1, b_2, \dots, b_m\}$, $m = |B|$. Все элементы группы G запишем в виде следующей таблицы умножения элементов подгрупп A и B . В последней строке (последнем столбце) указано произведение элементов столбца (строки) (таблица 1).

Таблица 1 – Умножение элементов подгрупп A и B

1	2	3	4	5	6	7
1	b_2	...	b_j	...	b_m	$p(B)$
a_2	$a_2 b_2$	...	$a_2 b_j$	...	$a_2 b_m$	$a_2^m p(B)$
			...			
a_i	$a_i b_2$	...	$a_i b_j$	...	$a_i b_m$	$a_i^m p(B)$
			...			
a_n	$a_n b_2$	...	$a_n b_j$	...	$a_n b_m$	$a_n^m p(B)$
$p(A)$	$p(A)b_2^n$	...	$p(A)b_j^n$	...	$p(A)b_m^n$	$p(A)^m p(B)^n$

Ясно, что $p(G) = p(A) \cdot p(A)b_2^n \cdot \dots \cdot p(A)b_j^n \cdot \dots \cdot p(A)b_m^n = p(A)^m p(B)^n$.

Лемма 2. Если G – абелева группа нечетного порядка, то $p(G) = 1$.

Доказательство. В группе G нечетного порядка нет элементов порядка 2 по теореме Лагранжа, поэтому $a \neq a^{-1}$ для любого $a \in G \setminus \{1\}$. Действительно, если существует элемент $a \in G \setminus \{1\}$ такой, что $a = a^{-1}$, то $a^2 = a \cdot a = a \cdot a^{-1} = 1$, противоречие. Поэтому все элементы группы G можно выписать, чередуя их с обратными: $a, a^{-1}, b, b^{-1}, c, c^{-1}, \dots$. Теперь $p(G) = aa^{-1}bb^{-1}cc^{-1} \dots = 1$.

Лемма 3. Если P – силовская 2-подгруппа абелевой группы G , то $p(G) = p(G)^{|G:P|}$.

Доказательство. Так как G – абелева группа, то $G = P \times H$, где H – 2'-холлова подгруппа группы G . По лемме 1 $p(G) = p(P)^{|H|} p(H)^{|P|}$. Так как $p(H) = 1$ по лемме 2 и $|H| = |G : P|$, то $p(G) = p(G)^{|G:P|}$.

Заметим, что если в абелевой группе G четного порядка силовская 2-подгруппа циклическая, то элемент порядка 2 в группе G единственный.

Лемма 4. Если $G = \langle a \rangle$ – циклическая группа порядка $2^k > 1$, то $p(G) = a^{2^{k-1}}$.

Доказательство. Пусть $G = \{1, a, a^2, \dots, a^{2^k-1}\}$. Тогда

$$p(G) = a \cdot a^2 \cdot \dots \cdot a^{2^k-1} = a \cdot a^{2^{k-1}} a^2 \cdot a^{2^{k-2}} \dots a^{2^{k-1}} = a^{2^{k-1}}.$$

Заметим, что $a^{2^{k-1}}$ – элемент порядка 2.

Лемма 5. Если абелева 2-группа G нециклическая, то $p(G) = 1$.

Доказательство. Пусть A – циклическая подгруппа наибольшего порядка в группе G . Согласно [4, лемма 3.3] существует подгруппа B такая, что $G = A \times B$. По лемме 1 $p(G) = p(A)^{|B|} p(B)^{|A|}$.

По лемме 4 $p(A) = a$, $|a| = 2$. Так как $|B| = 2^k \geq 2$, то $p(A)^{|B|} = 1$.

Если B нециклическая, то по индукции $p(B) = 1$ и $p(G) = 1$.

Если B циклическая, то по лемме 4 $p(B) = b$, $|b| = 2$. Так как $|A| = 2^l \geq 2$, то $p(A)^{|B|} = 1$ и $p(G) = 1$.

Теорема 1. (Теорема Миллера) Пусть G – конечная абелева группа с единичным элементом 1 и P – ее силовская 2-подгруппа. Если P нециклическая, то $p(G) = 1$. Если P циклическая и $P \neq \{1\}$, то $p(G) = i$, где i – элемент порядка 2.

Доказательство. Пусть P – силовская 2-подгруппа группы G . По лемме 3 $p(G) = p(G)^{|G:P|}$. Если P нециклическая, то $p(P) = 1$ по лемме 5 и $p(G) = 1$. Если P циклическая, то $p(P) = i$ по лемме 4, где i – элемент порядка 2. Так как $|G : P|$ – нечетное число, то $i^{|G:P|} = i$ и $p(G) = i$.

Следствие 1. Пусть $m \in \mathbb{N}$, $m > 1$. Произведение всех обратимых элементов кольца Z_m равно $\overline{m-1}$ при $m \in A$ и $\bar{1}$ при $m \notin A$.

Доказательство. Можно считать $m > 1$. Обратимые элементы кольца Z_m составляют абелеву группу Z_m^* четного порядка $\varphi(m)$. Поэтому произведение обратимых элементов кольца Z_m совпадает с $p(Z_m^*)$.

Если $m \in A$, то группа Z_m^* циклическая [3, теорема 7.4, с. 168] и $p(Z_m^*)$ – элемент порядка 2 по теореме 2. Поскольку в циклической группе четного порядка существует только один элемент порядка 2, то $p(Z_m^*) = \overline{m-1}$.

Пусть $m \notin A$. Тогда либо $m = 2^t > 4$, либо $m = m_1 m_2$, $m_1 > m_2 > 2$, где числа m_1 и m_2 взаимно просты. При $m = 2^t > 4$ группа Z_m^* будет нециклической группой порядка 2^{t-1} . При $m = m_1 m_2$ группа $Z_m^* = Z_{m_1}^* \times Z_{m_2}^*$ [3, теорема 7.4, с. 168]. Так как $Z_{m_1}^*$ и $Z_{m_2}^*$ – группы четных порядков, то силовская 2-подгруппа в Z_m^* нециклическая. Итак, в любом случае при $m \notin A$ силовская 2-подгруппа в Z_m^* нециклическая и $p(Z_m^*) = \bar{1}$ по теореме 2.

Следствие 2. (Теорема Вильсона) *Натуральное число p является простым тогда и только тогда, когда $(p-1)! \equiv -1 \pmod{p}$.*

Доказательство. Если p – простое, то все ненулевые элементы кольца Z_p обратимы и $\bar{1} \cdot \bar{2} \cdot \dots \cdot \overline{p-1} = \overline{p-1}$ по теореме 1. Поэтому $(p-1)! \equiv -1 \pmod{p}$.

Обратно, пусть $(p-1)! \equiv -1 \pmod{p}$. Предположим, что p не простое. Тогда $p = kl$, $1 < k \leq l < p$ и $(p-1)! \equiv 0 \pmod{p}$, противоречие.

Для натурального числа k через $k!_{\varphi}$ будем обозначать произведение всех тех чисел от 1 до k , которые взаимно просты с k .

Следствие 3. (Теорема Гаусса) *Пусть m – натуральное число. Если $m \in A$, то $m!_{\varphi} \equiv -1 \pmod{m}$. Если $m \notin A$, то $m!_{\varphi} \equiv 1 \pmod{m}$.*

Доказательство. Достаточно заметить, что $\overline{m!_{\varphi}}$ совпадает с произведением обратимых элементов кольца Z_m , а затем применить теорему 1.

Литература

1. Гаусс, К.Ф. Труды по теории чисел / К.Ф. Гаусс. – Москва : Издательство Академии наук СССР, 1959. – 981 с.
2. Miller, G.A. A new proof of the generalized Wilson's theorem / G.A. Miller // Ann. of Math. – 1903. – V. 4(2). – P. 188–190.
3. Нестеренко, Ю.В. Теория чисел / Ю.В. Нестеренко. – Москва : Издательский центр «Академия», 2008. – 273 с.
4. Монахов, В.С. Введение в теорию конечных групп и их классов / В.С. Монахов. – Минск : Вышэйшая школа, 2006. – 207 с.

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

²Гомельский инженерный институт МЧС Республики Беларусь

Поступила в редакцию 08.10.2014

Analogues of theorems of Schur and Baer for some locally finite groups

А.А. ПУРКА

It was proved that the class of locally finite groups, whose Sylow p -subgroups have finite exponent is Schur class and Baer class. A similar result for locally finite groups with finite Sylow p -subgroups is obtained.

Keywords: upper and lower central series, locally finite group, finite exponent, Schur class, Baer class.

Доказано, что класс локально конечных групп, в которых силовские p -подгруппы имеют конечную экспоненту, является классом Шура и классом Бэра. Аналогичный результат получен для локально конечных групп с конечными силовскими p -подгруппами.

Ключевые слова: верхний и нижний центральные ряды, локально конечная группа, конечная экспонента, класс Шура, класс Бэра.

1. Introduction. Let G be a group. Recall that the *upper central series* of group G is the series

$$\langle 1 \rangle = \zeta_0(G) \leq \zeta_1(G) \leq \zeta_2(G) \leq \dots \leq \zeta_\alpha(G) \leq \zeta_{\alpha+1}(G) \leq \dots \leq \zeta_\gamma(G), \quad (1)$$

where $\zeta_1(G) = \zeta(G)$ is the center of G , $\zeta_{\alpha+1}(G) / \zeta_\alpha(G) = \zeta(G / \zeta_\alpha(G))$ for every ordinal α , and if λ is a limit ordinal, then $\zeta_\lambda(G) = \bigcup_{\mu < \lambda} \zeta_\mu(G)$. The last term of this series $\zeta_\gamma(G) = \zeta_\infty(G)$ is called

the *upper hypercenter* of G .

The *lower central series* of group G is the series

$$G = \gamma_1(G) \geq \gamma_2(G) \geq \dots \geq \gamma_\alpha(G) \geq \gamma_{\alpha+1}(G) \geq \dots \geq \gamma_\delta(G), \quad (2)$$

where $\gamma_2(G) = [G, G]$ is the derived subgroup of G , $\gamma_{\alpha+1}(G) = [\gamma_\alpha(G), G]$ for every ordinal α , and $\gamma_\lambda(G) = \bigcap_{\mu < \lambda} \gamma_\mu(G)$ for every limit ordinal λ . The last term of this series is called the *lower hypocenter* of G .

Between the upper and lower central series there is a strong connection. For example, if G is a nilpotent group and for some positive integer k we have $G = \zeta_k(G)$, then $\gamma_{k+1}(G) = \langle 1 \rangle$.

I. Schur [1] was one of the first who establishes a connection between the central factor-group $G / \zeta(G)$ of a finite group G and its derived subgroup $[G, G]$. In his paper I. Schur introduced the multiplier (or multiplier) $M(G)$ of G , which is now called the *Schur multiplier* of a group G . I. Schur proved that if G is a finite group then $[G, G] \cap \zeta(G)$ is isomorphic to a subgroup of $M(G / \zeta(G))$. Later, the construction of the Schur multiplier could be extended to arbitrary groups. Note that it can be defined as follows. Let G be a group and $G \cong F / R$, where F is a free group. Then by Hopf's formula $M(G) \cong ([F, F] \cap R) / [F, R]$ [2].

One of the important results in the theory of infinite groups is the following

Theorem 1.1. *Let G be a group and $C \leq \zeta(G)$. If the factor-group G / C is finite then the derived subgroup $[G, G]$ is also finite.*

In this formulation, this result appeared for the first time in the papers of B.H. Neumann [3] and R. Baer [4]. Note that many mathematicians usually know this result as *Schur's theorem*. In connection with this result, the following natural question arises: *for what class \mathfrak{X} of groups the embedding $G / \zeta(G) \in \mathfrak{X}$ always implies the embedding $[G, G] \in \mathfrak{X}$?* A class of groups \mathfrak{X} with this property is called a *Schur class* [5]. Schur's theorem shows that the class \mathfrak{F} of finite groups is a Schur class. Obviously, that the trivial class $\mathfrak{T} = \{\langle 1 \rangle\}$ is a Schur class. Examples of some another Schur classes can be find in [5].

Related to Schur theorem appeared the following problem: *how the order t of the factor-group $G/\zeta(G)$ is connected with the order of $[G, G]$?* This question first has been raised by B.H. Neumann [3] and he got the first bound for $|[G, G]|$. But the best estimate here was obtained by J. Wiegold. In the paper [6] he proved that $|[G, G]| \leq t^m$ where $m = \frac{1}{2}(\log_p t - 1)$ and p is the least prime dividing t . In the same paper J. Wiegold has proved that this bound is attained if and only if $t = p^n$ where p is a prime. When t has more than one prime divisor the picture is less clear.

R. Baer in the paper [4] obtained the following generalization of Schur's theorem: *if factor-group $G/\zeta_k(G)$ is finite then $\gamma_{k+1}(G)$ is also finite.* Similarly to the concept of Schur class we can introduce the concept of Baer class. A class of groups \mathfrak{X} is said to be a *Baer class* if whenever G is a group and we have $G/\zeta_k(G) \in \mathfrak{X}$ for some positive integer k , then $\gamma_{k+1}(G) \in \mathfrak{X}$ [7]. Obviously, that the trivial class \mathfrak{T} is a Baer class. Baer's theorem shows that the class \mathfrak{F} of finite groups is a Baer class. On the other hand, any Baer class is a Schur class. The converse in general is not true.

It is known that the class of locally finite groups having finite exponent is a Schur class [8] and Baer class [7]. Therefore natural to consider a similar problem for the class of locally finite groups, whose Sylow p -subgroups have finite exponent. Also in this paper we consider locally finite groups with finite Sylow p -subgroups.

2. Locally finite groups, whose Sylow p -subgroups have finite exponent.

Lemma 2.1. *Let G be a group such that $G/\zeta(G)$ is finite. If Sylow p -subgroups of $G/\zeta(G)$ have exponent n_p for every prime p , then there exists a function β such that every Sylow p -subgroup of $[G, G]$ has exponent at most $\beta(n_p)$.*

Proof. Let p be a prime and suppose that S_p is a Sylow p -subgroup of central factor-group $G/\zeta(G)$ of G . Put $n_p = \exp(S_p)$ and $C = G/\zeta(G)$. It is well known that $[G, G] \cap \zeta(G)$ is an epimorphic image of $M(C)$ [1]. Let $M_p(C)$ be an arbitrary Sylow p -subgroup of $M(C)$. Then we have inclusion $M_p(C) \leq M(S_p)$ [9]. Since S_p is a finite group having exponent n_p , then there exists a function f such that $\exp(M(S_p)) \leq f(n_p)$ [10]. Therefore every Sylow p -subgroup of $M(C)$ has exponent, which is bounded by $f(n_p)$.

Since the factor-group $[G, G]/\zeta(G)$ is isomorphic to some subgroup of C , $[G, G]/\zeta(G)$ is finite group, whose Sylow p -subgroups have exponent at most n_p . Moreover, since $[G, G]/\zeta(G) \cong [G, G]/([G, G] \cap \zeta(G))$, then for every Sylow p -subgroup H_p of $[G, G]$ we have $\exp(H_p) \leq f(n_p) + n_p = \beta(n_p)$.

The following theorem is the first main result of this paper.

Theorem 2.2. *Let G be a group such that $G/\zeta(G)$ is locally finite. If Sylow p -subgroups of $G/\zeta(G)$ have finite exponent n_p for every prime p , then $[G, G]$ is locally finite group, whose Sylow p -subgroups have finite exponent. Moreover, there exists a function β such that every Sylow p -subgroup of $[G, G]$ has exponent at most $\beta(n_p)$.*

Proof. Let p be a prime and suppose that S_p is a Sylow p -subgroup of central factor-group $G/\zeta(G)$ of G . Put $n_p = \exp(S_p)$. Let $g \in [G, G]$ and suppose that g is a p -element. Then $g = [u_1, v_1] \cdot [u_2, v_2] \cdot \dots \cdot [u_t, v_t]$ for some elements $u_i, v_i \in G$, $i = \overline{1, t}$. Put $C = \zeta(G)$ and $H = \langle C, u_1, v_1, \dots, u_t, v_t \rangle$. Then $H/C = \langle u_1C, v_1C, \dots, u_tC, v_tC \rangle$ is finitely generated group. Since G/C is locally finite, H/C is finite. Moreover, every Sylow p -subgroup of H/C has finite exponent. By Lemma 2.1, every Sylow p -subgroup of $[H, H]$ has exponent at most $\beta(n_p)$. Therefore $[G, G]$ is locally finite group, whose Sylow p -subgroups have exponent at most $\beta(n_p)$.

The following auxiliary lemmas help us to prove that the class of locally finite groups, whose Sylow p -subgroups have finite exponent is a Baer class.

Lemma 2.3. *Let G be a group and suppose that A is an abelian normal subgroup of G such that $G / C_G(A) = \langle x_1 C_G(A), x_2 C_G(A) \rangle$ for some elements $x_1, x_2 \in G$. Then $[A, G] = [A, x_1] \cdot [A, x_2]$.*

Proof. Put $U = [A, x_1] \cdot [A, x_2]$. Obviously, that $U \leq [A, G]$. If $a \in A$, then

$$[a, x_j^2] = [a, x_j] \cdot [y, x_j]^{x_j} = [y, x_j] \cdot [y^{x_j}, x_j] \in [A, x_j] \leq U, j \in \{1, 2\}.$$

It follows, that $[a, x_j^n] \in U$ for every integer n . Let n, k are integers and put $u = x_1^n, v = x_2^k$. If $a \in A$, then $[a, uv] = [a, v] \cdot [a, u]^v, [a, u]^v = [vcv^{-1}, u]^v$, where $c = v^{-1}av \in A$. Put $d = [vcv^{-1}, u]$, then

$$[vcv^{-1}, u]^v = d^v = dd^{-1}v^{-1}dv = d[d, v].$$

Obviously, that $d \in [A, u] = [A, x_1^n] \leq U$ and $[d, v] \in [A, v] = [A, x_2^k] \leq U$, then

$$[a, u]^v = [vcv^{-1}, u]^v = d^v = d[d, v] \in U.$$

It follows, that $[a, uv] \in U$. Applying induction, we see, that

$$[a, x_1^{k_1} x_2^{t_1} \dots x_1^{k_n} x_2^{t_n}] \in U \text{ for each integer } k_1, t_1, \dots, k_n, t_n.$$

Let g be an arbitrary element of group G . Then

$$g = x_1^{r_1} x_2^{s_1} \dots x_1^{r_m} x_2^{s_m} c,$$

for some element $c \in C_G(A)$ and some integers $r_1, s_1, \dots, r_m, s_m$. Then

$$[a, x_1^{r_1} x_2^{s_1} \dots x_1^{r_m} x_2^{s_m} c] = [a, x_1^{r_1} x_2^{s_1} \dots x_1^{r_m} x_2^{s_m}] \in U.$$

Thus, we obtained that U is G -invariant subgroup of A . By the choice of G we have $A/U \leq \zeta(G/U)$ which implies that $[A, G] \leq U$.

Corollary 2.4. *Let G be a group and suppose that A is an abelian normal subgroup of G such that $G = \langle C_G(A), M \rangle$ for a certain subset M of G . Then $[A, G]$ is the product of $[A, x]$, where $x \in M$.*

Proof. Put $V = \langle [A, x] \mid x \in M \rangle$. Obviously, that $V \leq [A, G]$. Let $w \in [A, G]$, then

$$w = [a_1, y_1] \cdot \dots \cdot [a_n, y_n],$$

for some elements $a_1, \dots, a_n \in A$ and $y_1, \dots, y_n \in G$. Then there exists elements $x_1, \dots, x_m \in M$ such that

$$y_1, \dots, y_n \in \langle x_1, \dots, x_m, C_G(A) \rangle = H,$$

and hence $w \in [A, H]$. Since $[A, x_j] \cdot [A, x_k]$ is $\langle x_j, x_k \rangle$ -invariant subgroup for any $j, k \in \{1, \dots, m\}$, then by Lemma 2.3 the subgroup $[A, x_1] \cdot \dots \cdot [A, x_m] = U$ is H -invariant. Then the center of H/U includes A/U , that is $[A, H] \leq U$. Since $U \leq [A, H]$, we obtain that $[A, H] = U$. Therefore

$$w \in [A, x_1] \cdot \dots \cdot [A, x_m] \leq V, \tag{3}$$

and hence $[A, G] = V$.

Lemma 2.5. *Let G be a group and suppose that A is an abelian normal subgroup of G such that $A / (\zeta(G) \cap A)$ is locally finite. If Sylow p -subgroups of $A / (\zeta(G) \cap A)$ have finite exponent n_p for every prime p , then $[A, G]$ is locally finite group, whose Sylow p -subgroups have finite exponent at most n_p .*

Proof. We choose a subset M of G such that $G = \langle C_G(A), M \rangle$. For arbitrary element $g \in G$ we define a mapping $\xi_g : A \rightarrow [A, g]$ by the rule $\xi_g(a) = [a, g], a \in A$. Therefore ξ_g is an endomorphism of A . Since $\zeta(G) \cap A \leq C_G(A) = \text{Ker}(\xi_g)$, then $A / \text{Ker}(\xi_g)$ is locally finite group, whose Sylow p -subgroups have exponent at most n_p . Since $A / \text{Ker}(\xi_g) \cong_G \text{Im}(\xi_g) = [A, g], [A, g]$ is locally finite group, whose Sylow p -subgroups have exponent at most n_p . By Corollary 2.4 $[A, G]$ is the product of the subgroups $[A, g]$, where $g \in M$. Therefore $[A, G]$ is locally finite group, whose Sylow p -subgroups have exponent at most n_p .

We can now prove the second main result of this paper.

Theorem 2.6. *Let G be a group such that $G/\zeta_k(G)$ is locally finite. If Sylow p -subgroups of $G/\zeta_k(G)$ have finite exponent n_p for every prime p , then $\gamma_{k+1}(G)$ is locally finite group, whose Sylow p -subgroups have finite exponent. Moreover, there exists a function η such that every Sylow p -subgroup of $\gamma_{k+1}(G)$ has exponent at most $\eta(n_p, k)$.*

Proof. Let

$$\langle 1 \rangle = Z_0 \leq Z_1 \leq \dots \leq Z_{k-1} \leq Z_k = Z, \tag{4}$$

be the upper central series of G . We proceed by induction on k .

If $k = 1$, then G/Z_1 is locally finite group, whose Sylow p -subgroups have finite exponent n_p . Theorem 2.2 shows that $\gamma_2(G) = [G, G]$ is locally finite and there exists a function β such that every Sylow p -subgroup of $[G, G]$ has exponent at most $\beta(n_p)$.

We now suppose that $k > 1$ and we have already proved that $\gamma_k(G/Z_1)$ is locally finite group and there exist a function η such that every Sylow p -subgroup of $\gamma_k(G/Z_1)$ has exponent at most $\eta(n_p, k-1)$. Put $K/Z_1 = \gamma_k(G/Z_1)$ and $L = \gamma_k(G)$, so that $L \leq K$. By Theorem 2.2 we obtain that $D = [K, K]$ is locally finite group, whose Sylow p -subgroup has exponent at most $\beta(\eta(n_p, k-1))$. Since K/D is abelian, LD/D is also abelian. Thus, we have

$$\begin{aligned} (LD/D)(LD/D \cap Z_1D/D) &= (LD/D)((LD \cap Z_1D)/D) \cong LD/(LD \cap Z_1D) \cong \\ &(LD)(Z_1D)/(Z_1D) = (LZ_1D)/(Z_1D) \cong L/(L \cap Z_1D), \end{aligned}$$

which shows that $(LD/D)(LD/D \cap Z_1D/D)$ is an epimorphic image of $L/(L \cap Z_1)$. Since $L/(L \cap Z_1) \cong LZ_1/Z_1 \leq K/Z_1$, then $L/(L \cap Z_1)$ is locally finite group, whose Sylow p -subgroup has finite exponent at most $\eta(n_p, k-1)$. Therefore, this is true also for $(LD/D)(LD/D \cap Z_1D/D)$. Applying Lemma 2.5 to the factor-group G/D we obtain that its subgroup $V/D = [LD/D, G/D]$ is locally finite group, whose Sylow p -subgroup has exponent at most $\eta(n_p, k-1)$. Since the center of factor-group G/V includes LV/V and $(G/V)/(LV/V)$ is nilpotent of class at most k , $\gamma_{k+1}(G) \leq V$. Therefore $\gamma_{k+1}(G)$ is locally finite group, whose Sylow p -subgroup has finite exponent at most $\beta(\eta(n_p, k-1)) \cdot \eta(n_p, k-1) = \eta(n_p, k)$.

We note that the function $\eta(n_p, k)$ from last theorem is defined recursively by $\eta(n_p, 1) = \beta(n_p)$, $\eta(n_p, 2) = \beta(\beta(n_p)) \cdot \beta(n_p)$ and $\eta(n_p, k) = \beta(\eta(n_p, k-1)) \cdot \eta(n_p, k-1)$.

3. Locally finite groups with finite Sylow p -subgroup. In this section we consider a particular case, namely the situation where all Sylow p -subgroups of locally finite group are finite.

Theorem 3.1. *Let G be a group such that $G/\zeta(G)$ is locally finite. If every Sylow p -subgroup of $G/\zeta(G)$ is finite for every prime p , then $[G, G]$ is locally finite group, whose Sylow p -subgroups are finite. Moreover, there exists a function θ such that every Sylow p -subgroup of $[G, G]$ has order at most θ .*

Proof. Put $\zeta(G) = Z$. Let P/Z is a Sylow p -subgroup of G/Z . Let $P/Z \leq H/Z$ for some subgroup $H \leq G$. Then P/Z is a Sylow p -subgroups of H/Z . Therefore $M_p(H/Z) \leq M(P/Z)$ [9]. Since $M(P/Z)$ is abelian p -group, then $M(P/Z) = \langle a_1 \rangle \times \dots \times \langle a_r \rangle$, where $a_i \in G/Z, i = \overline{1, r}$. And hence $\text{rank}(M(P/Z)) \leq r$. Since P/Z is finite, exponent of $M(P/Z)$ is bounded [10]. Finiteness of rank and exponent of $M(P/Z)$ implies finiteness of $M(P/Z)$, and then every Sylow p -subgroup of $M(H/Z)$ is finite. Moreover, $|M_p(H/Z)| \leq |M(P/Z)| \leq n^r$, where $n = \exp(M(P/Z))$.

As already mentioned above, $[H, H] \cap \zeta(H)$ is an epimorphic image of $M(H/Z)$ [1]. Put $|H/Z| = t$. Finally, since $|M_p(H/Z)| \leq n^r$, then order of every Sylow p -subgroup of $[H, H]$ at most tn^r . By the choice of subgroup H we obtain that $[G, G]$ is locally finite group, whose Sylow p -subgroup is finite. Moreover, $|S_p| \leq tn^r = \theta(t, n, r)$.

It is worth mentioning that in fact a function θ does not depend of p .

The following theorem completes our research and gives us one more Baer class.

Theorem 3.2. *Let G be a group such that $G/\zeta_k(G)$ is locally finite. If every Sylow p -subgroup $G/\zeta_k(G)$ is finite for every prime p , then $\gamma_{k+1}(G)$ is locally finite group, whose Sylow p -subgroups are finite. Moreover, there exists a function δ such that every Sylow p -subgroup of $\gamma_{k+1}(G)$ has order at most δ .*

The proof of Theorem 3.2 is almost completely repeats the proof of Theorem 2.6.

References

1. Schur, I. Über die Darstellungen der endlichen Gruppen durch gebrochene lineare substitutionen / I. Schur // J. Reine Angew. Math. – 1904. – Vol. 127. – P. 20–50.
2. Hopf, H. Fundamentalgruppe und zweite Bettische Gruppe / H. Hopf // Comment. Math. Helv. – 1942. – Vol. 14. – P. 257–309.
3. Neumann, B.H. Groups with finite classes of conjugate elements / B.H. Neumann // Proc. London Math. Soc. – 1951. – Vol. 1. – P. 178–187.
4. Baer, R. Endlichkeitskriterien für Kommutatorgruppen / R. Baer // Math. Ann. – 1952. – Vol. 124. – P. 161–177.
5. Franciosi, S. The Schur property and groups with uniform conjugate classes / S. Franciosi, F. de Giovanni, L.A. Kurdachenko // J. Algebra. – 1995. – Vol. 174. – P. 823–847.
6. Wiegold, J. Multiplicators and groups with finite central factor-groups / J. Wiegold // Math. Z. – 1965. – Vol. 89. – P. 345–347.
7. Kurdachenko, L.A. Relationships between the factors of the upper and the lower central series of a group / L.A. Kurdachenko, J. Otal, A.A. Pypka // Bull. Malays. Math. Sci. Soc., to appear.
8. Mann, A. The exponents of central factor and commutator groups / A. Mann // J. Group Theory. – 2007. – Vol. 10. – P. 435–436.
9. Wiegold, J. The Schur multiplier: an elementary approach / J. Wiegold // London Math. Soc. Lecture Note Ser. – 1981. – Vol. 71. – P. 137–154.
10. Moravec, P. Schur multipliers and power endomorphisms of groups / P. Moravec // J. Algebra. – 2007. – Vol. 308. – P. 12–25.

О собственных подформациях однопорожденной τ -замкнутой ω -насыщенной формации

В.М. СЕЛЬКИН

Исследовалось строение τ -замкнутых ω -насыщенных формаций. Доказано, что всякая собственная τ -замкнутая ω -насыщенная подформация \mathfrak{M} однопорожденной τ -замкнутой ω -насыщенной формации \mathfrak{F} содержится в некоторой максимальной τ -замкнутой ω -насыщенной подформации формации \mathfrak{F} .

Ключевые слова: формация, τ -замкнутая ω -насыщенная формация, однопорожденная формация, спутник

We investigate the structure of τ -closed ω -saturated formations. It is proved that every proper τ -closed ω -saturated subformation \mathfrak{M} of one-generated τ -closed ω -saturated formation \mathfrak{F} is contained in some maximal τ -closed ω -saturated subformation of \mathfrak{F} .

Keywords: formation, τ -closed ω -saturated formations, one-generated formation, satellite.

Все рассматриваемые группы предполагаются конечными. Используется общепринятая терминология [1]-[4].

В группе G выберем некоторую систему подгрупп $\tau(G)$. Исходя из [3], τ называется подгрупповым функтором, если выполняются следующие условия:

1. $G \in \tau(G)$ для любой группы G ;
2. для любого эпиморфизма и любых групп $H \in \tau(A)$ и $T \in \tau(B)$ имеет место $H^{\sigma} \in \tau(B)$ и $T^{\sigma^{-1}} \in \tau(A)$.

Формация \mathfrak{F} называется τ -замкнутой, если $\tau(G) \subseteq \mathfrak{F}$ для любой группы $G \in \mathfrak{F}$. Для подгрупповых функторов τ_1 и τ_2 полагают $\tau_1 \leq \tau_2$, если $\tau_1(G) \subseteq \tau_2(G)$ для любой группы G . Подгрупповой функтор τ называется замкнутым, если всегда из того, что $T \in \tau(H)$, $H \in \tau(G)$, следует $T \in \tau(G)$. Символом $\bar{\tau}$ обозначается наименьший замкнутый подгрупповой функтор со свойством $\tau \leq \bar{\tau}$.

Пусть ω – произвольное непустое множество простых чисел. Всякая функция вида

$$f : \omega \cup \{\omega'\} \mapsto \{\text{формации групп}\}$$

называется ω -локальным спутником [4]. Если все значения ω -локального спутника f являются τ -замкнутыми формациями, то f называется τ -замкнутым ω -локальным спутником. Символом $LF_{\omega} \langle f \rangle$ обозначим класс групп $(G \mid G/O_{\omega}(G) \in f(\omega') \text{ и } G/F_p(G) \in f(p) \text{ для всех } p \in \omega \cap \pi(G))$ для любого произвольного ω -локального спутника f . Пусть $\mathfrak{F} = LF_{\omega} \langle f \rangle$, то говорим, что f – ω -локальный V -спутник формации \mathfrak{F} . В этом случае мы называем \mathfrak{F} ω -насыщенной формацией. Если при этом все значения f лежат в \mathfrak{F} , то f будем называть внутренним ω -локальным V -спутником формации \mathfrak{F} .

Пусть \mathfrak{X} – произвольная совокупность групп, p – простое число. Тогда полагают

$$\mathfrak{X}(F_p) = \begin{cases} \text{form}(G/F_p(G) \mid G \in \mathfrak{X}), & \text{если } p \in \pi(\mathfrak{X}); \\ \emptyset, & \text{если } p \notin \pi(\mathfrak{X}). \end{cases}$$

V -спутник формации \mathfrak{F} называется минимальным τ -значным ω -локальным V -спутником формации \mathfrak{F} , если $f(\omega') = \text{form}(G/O_{\omega}(G) \mid G \in \mathfrak{F})$ и $f(p) = \text{form}(\mathfrak{F}(F_p))$ для всех простых $p \in \omega$. Символом $\tau^{\omega} \text{form}(\mathfrak{X})$ обозначаем пересечение всех τ -замкнутых

ω -насыщенных формаций, содержащих непустое множество групп \mathcal{X} . Формация \mathfrak{F} называется минимальной τ -замкнутой ω -насыщенной \mathfrak{H} -формацией, если \mathfrak{F} не содержится в \mathfrak{H} , но все собственные τ -замкнутые ω -насыщенные подформации формации \mathfrak{F} содержатся в \mathfrak{H} .

Общая теория минимальных τ -замкнутых ω -насыщенных не \mathfrak{H} -формаций построена автором в [5]–[9]. Целью данной работы является нахождение подформации формации \mathfrak{F} , содержащей все собственные τ -замкнутые ω -насыщенные подформации формации.

Теорема 1. Всякая собственная τ -замкнутая ω -насыщенная подформация \mathcal{M} однопорожжденной τ -замкнутой ω -насыщенной формации \mathfrak{F} содержится в некоторой максимальной τ -замкнутой ω -насыщенной подформации формации \mathfrak{F} .

Доказательство. Пусть $\mathfrak{F} = \tau^\omega \text{form}(G)$. Тогда $G \notin \mathcal{M}$, и поэтому множество Σ всех тех τ -замкнутых ω -насыщенных подформаций из \mathfrak{F} , которые включают в себя \mathcal{M} и не содержат G , не пусто и это множество частично упорядочено по включению. Пусть $\{\mathfrak{H}_i \mid i \in I\}$ – произвольная цепь в Σ и $\mathfrak{H} = \cup_{i \in I} \mathfrak{H}_i$. Покажем, что $\mathfrak{H} \in \Sigma$. Понятно, что $\mathcal{M} \subseteq \mathfrak{H}$ и $G \notin \mathfrak{H} \subseteq \mathfrak{F}$. Поэтому нам необходимо лишь установить, что \mathfrak{H} является τ -замкнутой ω -насыщенной формацией. Пусть h_i – минимальный τ -замкнутый ω -локальный V -спутник формации \mathfrak{H}_i и h – такой спутник, что $h(a) = \cup_{i \in I} h_i(a)$ для всех $a \in \omega \cup \{\omega'\}$. По лемме 2.13 [10] включение $\mathfrak{H}_i \subseteq \mathfrak{H}_j$ имеет место тогда и только тогда, когда $h_i(a) \subseteq h_j(a)$ для всех $a \in \omega \cup \{\omega'\}$. Таким образом, относительно включения множество $\{h_i(a) \mid i \in I\}$ является цепью. Поэтому

$$h(a) = \cup_{i \in I} h_i(a)$$

является τ -замкнутой формацией при всех $a \in \omega \cup \{\omega'\}$. Покажем теперь, что $\mathfrak{H} = LF_\omega(h)$. Пусть $G \in \mathfrak{H}$. Тогда для некоторого простого i имеет место $G \in \mathfrak{H}_i$, и поэтому

$$G/O_\omega(G) \in h_i(\omega') \subseteq h(\omega')$$

и

$$G/F_p(G) \in h_i(p) \subseteq h(p)$$

для всех простых $p \in \omega$. Следовательно, $G \in LF_\omega(h)$ и поэтому $\mathfrak{H} \subseteq LF_\omega(h)$. Пусть теперь $G \in LF_\omega(h)$ и

$$\pi = \pi(G) \cap \omega = \{p_1, \dots, p_t\}.$$

Тогда найдутся такие формации $\mathfrak{H}_1, \mathfrak{H}_2, \dots, \mathfrak{H}_t$, что $G/O_\omega(G) \in h(\omega')$ и

$$G/F_{p_{i_j}}(G) \in h_i(p_{i_j}).$$

В свою очередь, поскольку $\{\mathfrak{H}_i \mid i \in I\}$ является цепью, то найдется такая формация \mathfrak{H}_k , которая содержит все формации $\mathfrak{H}_1, \mathfrak{H}_2, \dots, \mathfrak{H}_t$. Значит, $\mathfrak{H}_1, \mathfrak{H}_2, \dots, \mathfrak{H}_t$

$$G \in \mathfrak{H}_k \subseteq \mathfrak{H}.$$

Следовательно, $\mathfrak{H} = LF_\omega(h)$, и поэтому $\mathfrak{H} \in \Sigma$. Теперь утверждение леммы получаем, применяя лемму Цорна. Теорема доказана.

Литература

1. Шеметков, Л.А. Формации конечных групп / Л.А. Шеметков. – Москва : Наука, 1978, – 272 с.
2. Шеметков, Л.А. Формации алгебраических систем / Л.А. Шеметков, А.Н. Скиба. – Москва : Наука, 1989. – 253 с.
3. Скиба, А. Н. Алгебра формаций / А.Н. Скиба. – Минск : Беларуская навука, 1997. – 240 с.
4. Shemetkov, L.A. Multiply ω -local formations and Fitting classes of finite groups / L.A. Shemetkov, A.N. Skiba // Matem. Trudy. – 1999. – № 2. – P. 114–147.

5. Селькин, В.М. О минимальных τ -замкнутых ω -локальных не метанильпотентных формациях / В.М. Селькин // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2008. – № 2 (47). – С. 184–188.
6. Селькин, В.М. Об одной проблеме теории ω -локальных формаций / В.М. Селькин // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2005. – № 5 (32). – С. 166–168.
7. Селькин, В.М. О наследственных критических формациях / В.М. Селькин, А.Н. Скиба // Сибирский математический журнал. – 1996. – № 5 – С. 59–81.
8. Селькин, В.М. Формации с единственной максимальной τ -замкнутой ω -локальной подформацией / В.М. Селькин // Весці НАН Беларусі, Сер.фіз.-матем. навук.– 2002. – № 1. – С. 25–29.
9. Селькин, В.М. Про існування мінімальних τ -замкнених ω -наситених не \mathfrak{S} -формацій / В.М. Селькин // Український математичний журнал. – 2010. – Т. 62, № 4. – С. 572–576.
10. Go, W. Factorization theory of onogenerated Bear ω -local formations / W. Go, V.M. Selkin, K.P. Sham // Communications in Algebra.– 2007. – Vol. 35. – P. 2901–2931.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 10.11.2014

О p -разрешимости конечной группы с заданными индексами некоторых максимальных подгрупп

Д.А. Ходанович

Пусть $p > 3$ – наибольший простой делитель порядка конечной группы G . Доказано, что фактор-группа $G/O_p(G)$ p -нильпотентна, если индекс каждой не p -нильпотентной максимальной подгруппы есть простое число или квадрат простого числа. В частности, такая группа p -разрешима и ее p -длина не превосходит 2.

Ключевые слова: конечная группа, p -нильпотентная группа, p -разрешимая группа, максимальная подгруппа, p -длина.

Let $p > 3$ be the largest prime divisor of the order of finite group G . We prove that the quotient group $G/O_p(G)$ is p -nilpotent if the index of every non- p -nilpotent maximal subgroup is a prime or the square of a prime. In particular, the group G is p -solvable and its p -length is at most 2.

Keywords: finite group, p -nilpotent group, p -solvable group, maximal subgroup, p -length.

Введение. Рассматриваются только конечные группы. Принятые обозначения стандартны и соответствуют [1]–[2].

В 1954 г. Б. Хупперт установил сверхразрешимость группы, у которой индексы максимальных подгрупп – простые числа [3]. В этой же работе он поставил вопрос о разрешимости группы, у которой индексы максимальных подгрупп являются простыми числами или квадратами простых чисел [3, с. 423]. Положительный ответ на этот вопрос получил Ф. Холл.

Теорема А (Ф. Холл) [2, VI. 9.4]. *Если в группе G индексы максимальных подгрупп являются простыми числами или квадратами простых чисел, то группа G разрешима.*

Пример 1. В простой группе $PSL(2, 7)$ индексы максимальных подгрупп исчерпываются числами 7 и 8. Поэтому в теореме Ф. Холла дальнейшее ослабление на показатели степеней простых делителей индексов максимальных подгрупп недопустимо, т. е. группа, у которой индексы максимальных подгрупп являются простыми числами, квадратами простых чисел или кубами простых чисел может быть неразрешимой.

Детальное изучение конечных групп с такими индексами максимальных подгрупп осуществлено в работах С.Ф. Каморникова [4], В.С. Монахова, М.В. Селькина и Е.Е. Грибовской [5], [6]. В частности, эти группы имеют ранг, не превосходящий 2. Разрешимые группы ранга, не превосходящего 3, описаны в [7].

Группой Шмидта называют ненильпотентную группу, у которой все максимальные подгруппы нильпотентны. Еще в 1924 г. О.Ю. Шмидт доказал, что группы Шмидта разрешимы и их порядок делится в точности на два различных простых числа [8]. Обзор результатов о группах Шмидта и перспективы их приложений в теории конечных групп содержится в обзорной статье В.С. Монахова [9]. Из теоремы Фробениуса о нормальных дополнениях вытекает, что группа, в которой все максимальные подгруппы p -нильпотентны, либо сама p -нильпотентна, либо является p -замкнутой группой Шмидта.

Вполне естественно возникает задача изучения строения конечной группы, у которой максимальные подгруппы либо нильпотентны, либо имеют своим индексом простое число или квадрат простого числа. В этом направлении ранее была доказана следующая теорема.

Теорема В [10, теорема 4.1]. *Если в группе G индекс каждой ненильпотентной максимальной подгруппы есть простое число, либо квадрат простого числа, то группа G разрешима и $G \in \mathcal{NN}_2\mathcal{U}$.*

Кроме того, для конечной разрешимой группы принадлежность $G \in \mathfrak{N}\mathfrak{N}_2\mathfrak{A}$ остается истинной [10, теорема 4.3], если индекс каждой ненильпотентной максимальной подгруппы есть простое число, либо квадрат простого числа, или 8.

В работе [11] получена следующая теорема.

Теорема С [11, теорема 1.2]. *Если в группе G индекс каждой ненильпотентной максимальной подгруппы есть простое число, то группа G разрешима и либо группа $G \in \mathfrak{A}^2$, либо G p -нильпотентна и q -замкнута для некоторых простых p и q .*

В настоящей заметке мы развиваем эти результаты и доказываем следующую теорему.

Теорема. *Пусть p – наибольший простой делитель порядка группы G и $p > 3$. Если в группе G индекс каждой не p -нильпотентной максимальной подгруппы есть простое число или квадрат простого числа, то фактор-группа $G/O_p(G)$ p -нильпотентна.*

Следствие 1. *Пусть p – наибольший простой делитель порядка группы G . Если в группе G индекс каждой не p -нильпотентной максимальной подгруппы есть простое число или квадрат простого числа, то группа G p -разрешима и $l_p(G) \leq 2$.*

Пример 2. В теореме 1 при $p=3$ фактор-группа $G/O_p(G)$ может быть не 3-нильпотентной. Примером служит симметрическая группа S_4 степени 4.

Следствие 2. *Если каждая максимальная подгруппа группы G либо нильпотентна, либо ее индекс является простым числом или квадратом простого числа, то группа G разрешима.*

1. Обозначения и вспомогательные результаты

p – простое число;

p' – множество всех простых чисел отличных от p ;

p -группа – группа, порядок которой есть степень p ;

$O_p(G)$ – наибольшая нормальная p -подгруппа группы G ;

G_p – силовская p -подгруппа группы G ;

$G_{p'}$ – дополнение к силовской p -подгруппе в группе G , т. е. p' -холлова подгруппа группы G ;

$\Phi(G)$ – подгруппа Фраттини группы G , т. е. пересечение всех максимальных подгрупп неединичной группы G . Если G единична, то $\Phi(1) = 1$;

$F(G)$ – подгруппа Фиттинга группы G , т. е. произведение всех нормальных нильпотентных нормальных подгрупп группы G .

Группу G называют: p -замкнутой, если G_p нормальна в G ; p -нильпотентной, если G_p нормальна в G ; p -разложимой, если G_p и $G_{p'}$ нормальны в G .

Группа называется p -разрешимой, если она обладает нормальным (p, p') -рядом

$$1 = N_0 \subseteq P_0 \subset N_1 \subset P_1 \subset N_2 \subset \dots \subset P_l \subseteq N_l = G, \quad (1)$$

где $P_i/N_i = O_p(G/N_i)$, $N_{i+1}/P_i = O_{p'}(G/P_i)$. Наименьшее натуральное число l такое, что $N_l = G$ называется p -длиной p -разрешимой группы и обозначается через $l_p(G)$.

Стандартные обозначения, закрепленные за некоторыми классами групп: \mathfrak{A} – класс всех абелевых групп; \mathfrak{N} – класс всех нильпотентных групп; \mathfrak{N}_2 – класс всех 2-групп; \mathfrak{N}_2' – класс всех нильпотентных групп нечетного порядка; \mathfrak{A} – класс всех сверхразрешимых групп.

Произведение формаций \mathfrak{F} и \mathfrak{H} состоит из всех групп G , для которых $G^{\mathfrak{H}} \in \mathfrak{F}$, т. е. $\mathfrak{F}\mathfrak{H} = \{G \in \mathfrak{G} \mid G^{\mathfrak{H}} \in \mathfrak{F}\}$. Как обычно, $\mathfrak{F}^2 = \mathfrak{F}\mathfrak{F}$.

Для доказательства теорем нам потребуются следующие леммы.

Лемма 1. Пусть $p \in \pi(G)$, G – группа и P – ее силовская p -подгруппа. Предположим, что подгруппа P ненормальна в G , а H и K – подгруппы в G такие, что $N_G(P) \subseteq K \subseteq H$. Тогда справедливы следующие утверждения:

- 1) если $|H : K| = q$ – простое число, то $p < q$;
- 2) если $|H : K| = q^2$, $q \in \pi(G)$, $p > q$, то $p = 3$, $q = 2$.

Доказательство. Ясно, что $N_G(P) = N_K(P) = N_H(P)$ и P является силовской p -подгруппой в K и в H . По лемме об индексах

$$|H : N_H(P)| = |H : K| |K : N_K(P)|, \quad (2)$$

а по теореме Силова

$$|H : N_H(P)| = 1 + hp, |K : N_K(P)| = 1 + kp, h, k \in \mathbb{N} \cup \{0\}, \quad (3)$$

Пусть $|H : K| = t$. Тогда $1 + hp = t(1 + kp)$, $t = 1 + (h - tk)p$.

1. Если число $t = q$ простое, то p делит $q - 1$, поэтому $p < q$.
2. Если $t = q^2$, $q \in \pi(G)$, то $q^2 - 1 = (h - tk)p$ и p делит $q^2 - 1$. Если $p > q$, то $q = 2$, $p = 3$. Лемма доказана.

Нам понадобятся также следующие обозначения и понятия. Пусть P – p -группа и $d(P)$ – минимальное число образующих P . По [1, лемма 3.25] $p^{d(P)} = |P / \Phi(P)|$. Положим

$$m(P) = \max \{d(U) | U \leq P, U' = 1\}, \quad (4)$$

$$J(P) = \langle U | U \leq P, U' = 1, d(U) = d(P) \rangle, \quad (5)$$

Очевидно, что $J(P)$ – характеристическая подгруппа в P и $J(X) = J(P)$ для каждой подгруппы X из P такой, что $J(P) \subseteq X$.

Лемма 2 [14, теорема 10]. Пусть $p \geq 2$ и P – силовская p -подгруппа группы G . Группа G p -нильпотентна тогда и только тогда, когда подгруппа $N_G(Z(J(P)))$ p -нильпотентна.

Лемма 3 [13]. Пусть G – неразрешимая группа с нильпотентной максимальной подгруппой. Тогда $O^2(G/F(G))$ есть прямое произведение простых групп, чьи силовские 2-подгруппы диэдральные.

Здесь $O^2(X)$ – наименьшая нормальная подгруппа группы X , фактор-группа по которой является 2-группой.

Лемма 4 [12, теорема 2]. Пусть G – не p -нильпотентная группа. Если группа G содержит p -разложимую максимальную подгруппу M , то в группе G нормальна либо силовская p -подгруппа из M , либо p' -холлова подгруппа из M .

Лемма 5 [13]. Пусть G – неразрешимая группа с нильпотентной максимальной подгруппой M . Если $S(G) = 1$, то подгруппа M является силовской 2-подгруппой группы G .

Доказательство. Из леммы 3 следует, что подгруппа M имеет четный порядок, т. е. $M = M_2 \times M_{2'}$, где M_2 – неединичная силовская 2-подгруппа из M , а $M_{2'}$ – $2'$ -холлова подгруппа из M . Так как $S(G) = 1$, то M_2 не нормальна в G , поэтому M_2 является силовской в G . Поскольку группа G не является 2-нильпотентной, то по лемме 4 подгруппа $M_{2'}$ нормальна в G и $M_{2'} = 1$ ввиду того, что $S(G) = 1$. Лемма доказана.

Лемма 6 [2, VI.6.9]. Пусть G – p -разрешимая группа и $l_p(G) > k$. Если $l_p(H) \leq k$ и $l_p(G/K) \leq k$ для любых $H \subset G$ и $K \triangleleft G$, то справедливы следующие утверждения:

- 1) $\Phi(G) = O_p(G) = 1$;
- 2) группа G имеет единственную минимальную нормальную подгруппу $N = F(G) = O_p(G)$;
- 3) $l_p(G) = k + 1$.

3. Доказательство результатов. *Доказательство теоремы.* Предположим, что теорема неверна и пусть G – контрпример минимального порядка. Пусть N – нормальная в G подгруппа и M/N – максимальная подгруппа фактор-группы G/N . Тогда M – максимальная подгруппа группы G и по условию либо M p -нильпотентна, либо $|G:M|$ – простое число или квадрат простого числа. Так как

$$|G:M| = |G/N : M/N|, \quad (6)$$

то подгруппа M/N p -нильпотентна, либо ее индекс есть простое число или квадрат простого числа. Следовательно, для фиксированного простого числа p условия теоремы наследуют все факторгруппы группы G .

Предположим, что $O_p(G) \neq 1$. По индукции факторгруппа

$$(G/O_p(G))/O_p(G/O_p(G)), \quad (7)$$

p -нильпотентна. Так как $O_p(G/O_p(G)) = 1$, то $G/O_p(G)$ p -нильпотентна и теорема справедлива.

Поэтому $O_p(G) = 1$ и $N_G(Z(J(P)))$ – собственная в G подгруппа. Здесь P – силовская p -подгруппа группы G . Пусть H – максимальная в G подгруппа, содержащая $N_G(Z(J(P)))$. По условию либо H p -нильпотентна, либо $|G:H| = q$ или $|G:H| = q^2$, где q – простое число. Если H p -нильпотентна, то подгруппа $N_G(Z(J(P)))$ p -нильпотентна и лемме 2 группа G p -нильпотентна, теорема справедлива.

Пусть H не p -нильпотентна. Тогда $|G:H| = q$ или $|G:H| = q^2$. Поскольку $Z(J(P))$ – характеристическая подгруппа группы P , то $N_G(P) \leq N_G(Z(J(P))) \leq H$ и по лемме 1 $p = 3$, $q = 2$, что противоречит условию теоремы. Теорема доказана.

Доказательство следствия 1. В силу теоремы $p = 3$ и группа G является разрешимой $\{2, 3\}$ -группой. Условия следствия наследуют все фактор-группы. По лемме 6 группа G примитивна, $O_3(G) = \Phi(G) = 1$ и $O_3(G) = F(G) = C_G(O_3(G))$ – является единственной минимальной нормальной в G подгруппой. Кроме того, $G = [F(G)]M$, где M – максимальная в G подгруппа с единичным ядром. Если M 3-нильпотентна, то $l_3(G) = 2$ и следствие справедливо.

Значит, необходимо считать, что $|G:M| = 9$ и M изоморфна подгруппе из $GL(2, 3)$. Так как

$$|GL(2, 3)| = (3^2 - 1)(3^2 - 3) = 2^4 \cdot 3, \quad (8)$$

то $l_3(M) \leq 1$ и $l_3(M) \leq 2$. Следствие доказано.

Доказательство следствия 2. Предположим, что утверждение неверно и пусть группа G контрпример минимального порядка. Так как условия следствия наследуют все фактор-группы, то наибольшая нормальная разрешимая подгруппа $R(G)$ единична.

По теореме Ф. Холла (теорема А) существует nilпотентная максимальная подгруппа T . По лемме 5 подгруппа T совпадает с силовской 2-подгруппой группы G .

Пусть p – наибольший простой делитель порядка группы. Ясно, что $p > 3$. Так как $O_p(G) \leq R(G) = 1$, то по теореме 1 группа G p -нильпотентна, т. е. p' -холлова подгруппа $G_{p'}$ нормальна в G . Так как $T \subseteq G_{p'}$ и T максимальна в G , то $T = G_{p'}$ и G является $\{2, p\}$ -группой. Значит G разрешима. Следствие доказано.

Литература

1. Монахов, В.С. Введение в теорию конечных групп и их классов / В.С. Монахов – Минск : Выш. Школа, 2006. – 208 с.
2. Huppert, B. Endliche Gruppen I. / B. Huppert. – Berlin–Heidelberg–New York : Springer, 1967. – 792 p.
3. Huppert, B. Normalteiler und maximale Untergruppen endlicher Gruppen / B. Huppert // Math. Zeitschr. – 1954. – Vol. 60. – P. 409–434.

4. Каморников, С.Ф. К теореме Ф. Холла / С.Ф. Каморников // Вопросы алгебры. – 1990. – Вып. 5. – С. 45–52.
5. Монахов, В.С. О максимальных и силовских подгруппах конечных разрешимых групп / В.С. Монахов, Е.Е. Грибовская // Математические заметки. – 2001. – Т. 70, № 4. – С. 603–612.
6. Монахов, В.С. О разрешимых нормальных подгруппах конечных групп / В.С. Монахов, М.В. Селькин, Е.Е. Грибовская // Украинский математический журнал. – 2002. – Том 54, № 7. – С. 940–950.
7. Монахов, В.С. О конечных разрешимых группах фиксированного ранга / В.С. Монахов, А.А. Трофимук // Сибирский математический журнал. – 2011. – Т. 52, № 5. – С. 1123–1137.
8. Шмидт, О.Ю. Группы, все подгруппы которых специальные / О.Ю. Шмидт // Математический сборник. – 1924. – 31. – С. 366–372.
9. Монахов, В.С. Подгруппы Шмидта, их существование и некоторые приложения / В.С. Монахов // Алгебра і теорія чисел : Праці Українського математичного конгресу. – 2001. – Київ : Ін-т математики НАН України, 2002. – С. 81–90.
10. Ходанович Д.А. О p -разрешимости конечной группы с ограниченными индексами ненильпотентных максимальных подгрупп / Д.А. Ходанович // Вестник ПГУ, серия С, Фундаментальные науки. – 2005. – № 4. – С. 18–22.
11. Lu, J. Finite groups with non-nilpotent maximal subgroups / J. Lu, L. Pang, X. Zhong // Monatsh. math. – 2013. – Vol. 171. – P. 425–431.
12. Романовский, А.В. Группы с холловыми нормальными делителями / А.В. Романовский // В кн. : Конечные группы. – Минск : Наука и техника, 1966. – С. 98–115.
13. Baumann, B. Endliche nichtauflösbare gruppen mit einer nilpotenten maximal untergruppen / B. Baumann // J. Algebra. – 1976. – Vol. 38. – P. 119–135.
14. Glauberman, G. Subgroups of finite groups / G. Glauberman // Bull. Am. Math. Soc. – 1967. – Vol. 73. – P. 1–12.

УДК 621.391.825

Метод формирования структурных помех для подавления систем радиосвязи с шумоподобными сигналами

А.Н. КУБРАК, П.С. БОРИСОВ

Предлагается метод формирования структурных помех, благодаря которому повышается эффективность воздействия систем радиоэлектронной борьбы на системы радиосвязи с шумоподобными сигналами.

Ключевые слова: шумоподобный сигнал, вероятность ошибки на бит информации, псевдослучайная последовательность, радиоподавление, структурная помеха.

The method of structure barrier forming, which increase the efficient of the jamming systems influence on the wireless systems with noise-like signals is proposed

Keywords: noise-like signal, bit error rate, pseudorandom sequence, jamming, structure barrier.

Введение. Повышение эффективности вооружения и маневренности войск, появление новых форм и методов ведения вооруженной борьбы привели к резкому росту роли систем управления войсками и оружием при ведении боевых действий [1].

Важной частью типичной системы управления войсками и оружием ведущих стран мира являются системы радиосвязи (СРС). Для улучшения показателей функционирования СРС в последние десятилетия начали широко применяться шумоподобные сигналы (ШПС). Одним из способов создания таких сигналов является модуляция несущей частоты псевдослучайной последовательностью (ПСП). Системы радиосвязи, использующие такие сигналы, называют СРС с ШПС [1].

Воздействие на информационные каналы СРС средствами радиоэлектронного подавления (РЭП) может нарушить функционирование систем управления и поэтому является одной из основных задач при дезорганизации управления войск и оружия противника [1]. Однако качество подавления СРС с ШПС современными средствами РЭП остается достаточно низким.

Анализ последних достижений и публикаций. В работах [2], [6]–[8] проведена оценка эффективности воздействия различных типов радиопомех на СРС с ШПС. Анализируя [2], [6], [7], можно сделать вывод, что узкополосная, заградительная и импульсная помехи приводят к нарушению работы указанных СРС только при достаточно высоком значении мощности помехи. Воздействие повторяющей помехи может быть эффективным, если передатчик помех размещен на линии (или рядом с ней), соединяющей радиопередатчик с радиоприемником [8]. Наиболее эффективной помехой для СРС с ШПС считается помеха, коррелирующая с ПСП, используемой в шумоподобном сигнале и синхронизированная с ней по времени [2], [6], [7]. Однако использование такой помехи будет эффективным, если постановщику помех известны места расположения радиопередатчика и радиоприемника, а также функция, расширяющая спектр.

Анализ работы систем радиосвязи CDMA (code division multiple access), использующие ШПС, показывает, что существует влияние взаимных помех на эффективность функционирования этих систем [2], [5], [6]. Однако возможность использования взаимных помех для радиоподавления СРС с ШПС в указанных работах не рассматривается. При этом взаимные помехи представляют собой сигналы однотипных СРС, имеющих различные амплитуды, временные задержки и фазы в точке приема, а также разные функции, расширяющие спектр.

Перекрываясь в точке приема по времени и частоте, эти сигналы создают совокупность взаимных помех [2]. С точки зрения постановки помех, нет необходимости точной синхронизации таких помех с ПСП, используемой в ШПС.

Постановка задачи. В работе [5] приведена методика оценки эффективности радиоподавления СРС, где в качестве показателя эффективности используется коэффициент подавления. Этот показатель определяет минимально необходимое отношение мощности помехи к мощности сигнала на входе приемника, при котором обеспечивается заданный критерий подавления. Для цифровых систем связи в качестве такого критерия выступает вероятность ошибки на бит информации $P_{ош}$ [9]. Максимально допустимая вероятность ошибки на бит информации для цифровых систем передачи речевых сообщений составляет 10^{-2} , поэтому критерием эффективности подавления СРС с ШПС будет [5], [6]

$$P_{ош} > 10^{-2}, \tag{1}$$

В случае, когда ПСП неизвестна постановщику помех, наиболее эффективным видом помехи для СРС с ШПС является гармоническая помеха на центральной частоте расширенного спектра сигнала [2], [6]. С целью сравнения произведен расчет зависимости вероятности ошибки на бит информации для указанной СРС с учетом воздействия гармонической помехи при условии точного совмещения несущих частот полезного и помехового сигналов по выражению [2]:

$$P_{ош} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{N_0}{E_c} + \frac{P_n}{L \cdot P_c} \right)^{-1/2} \right], \tag{2}$$

где $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-t^2) dt$ – дополнительный интеграл ошибок;

$\frac{E_c}{N_0}$ – отношение сигнал/шум;

L – длина ПСП;

P_n – мощность помехи на входе приемника;

P_c – мощность сигнала на входе приемника.

Результаты расчета показателя эффективности СРС с ШПС согласно выражению (2) для $L = 1000$ и $E_c/N_0 = 10$ и 15 дБ приведены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Зависимость вероятности ошибки на бит информации от отношения помеха/сигнал при воздействии на СРС с ШПС гармонической помехи для отношения сигнал/шум 10 дБ (сплошная линия) и 15 дБ (пунктирная линия)

Из графиков на рисунке 1 видно, что для выполнения условия (1) путем формирования гармонической помехи для СРС с ШПС необходимо, чтобы мощность помехи превышала мощность сигнала на входе приемника для заданных начальных условий на 27,5 и 28,5 дБ, что зачастую невозможно достичь на практике.

Таким образом, возникает задача формирования радиопомехи, при воздействии которой на СРС с ШПС условие (1) выполняется при отношении помеха/сигнал на входе приемника меньше, чем при воздействии гармонической помехи.

Основной материал. С целью упрощения дальнейшего анализа ограничимся рассмотрением ШПС с двоичной фазовой манипуляцией (ФМ). При прямоугольной форме импульсов информационной последовательности $b_c(t)$ сигнал СРС с ФМ ШПС можно представить выражением [2]:

$$S_c(t) = A_c \cdot b_c(t) \cdot a_c(t) \cdot \cos(2\pi ft + \phi_c), \quad (3)$$

где A_c – амплитуда сигнала ($A_c = \sqrt{2P_c}$, P_c – мощность сигнала);

$a_c(t)$ – псевдослучайная последовательность;

f – несущая частота;

ϕ_c – значение начальной фазы сигнала.

При проведении анализа функционирования СРС с ШПС примем, что длительность информационного символа τ_b в целое число L раз больше длительности импульса ПСП τ_i , $\tau_b = L\tau_i$.

Допустим, что оптимальный прием ФМ ШПС на фоне аддитивного белого гауссовского шума $n(t)$ обеспечивается при помощи когерентного корреляционного приемника. На рисунке 2 приведена структурная схема такого приемника с вариантом приема полезного сигнала $S_c(t)$ и K сигналов взаимных помех [2].

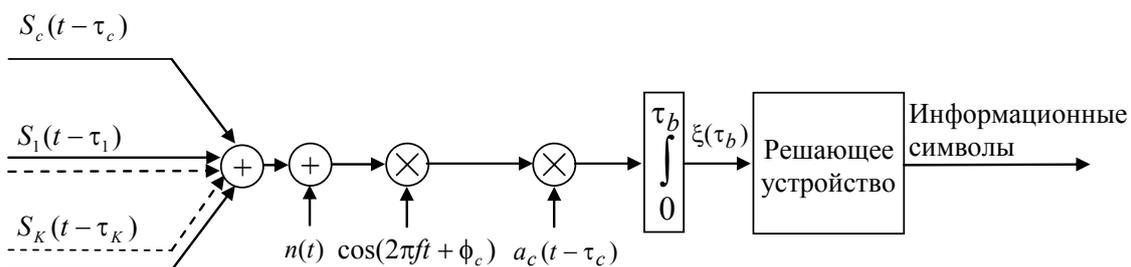


Рисунок 2 – Структурная схема когерентного корреляционного приемника СРС с ШПС

Суммарный сигнал взаимных помех $S_n(t)$, поступающий на вход приемника выглядит так [2]:

$$S_n(t) = \sum_{k=1}^K A_k \cdot b_k(t - \tau_k) \cdot a_k(t - \tau_k) \cdot \cos(2\pi ft + \phi_k) = \sum_{k=1}^K S_k(t - \tau_k), \quad (4)$$

где K – количество источников ШПС, составляющих взаимные помехи;

τ_k и ϕ_k – случайные время задержки и фаза k -го сигнала, по отношению к полезному сигналу $S_c(t)$.

Сигналы других абонентов по отношению к сигналу $S_c(t)$ являются непреднамеренными помехами и представляют собой структурную помеху. Предлагается формировать аналогичный сигнал $S_n(t)$ согласно с выражением (4) с целью создания преднамеренных структурных помех системам радиосвязи с ШПС.

Таким образом, предлагается метод формирования структурных помех для подавления СРС с ШПС, состоящий из следующих шагов:

1. Априорной информацией для формирования структурной помехи является длительность импульса ПСП τ_i и ее длина L . Оценку этих параметров можно осуществлять при помощи алгоритмов, предложенных в [10] и [11].

2. Значение K выбирается как максимальное количество порождающих многочленов для определенной длины ПСП L .

3. Формируется сигнал структурной помехи по выражению (4).

Для анализа эффективности воздействия структурной помехи, сформированной предложенным методом, на СРС с ШПС воспользуемся выражением для расчета вероятности ошибки на бит информации при воздействии взаимных помех, приведенном в [2]. Рассмотрим случай, когда между полезным сигналом $S_c(t)$ и k -й взаимной помехой $S_k(t)$ отсутствует синхронизация как по фазе, так и по времени задержки. Допуская, что мощности сигналов взаимных помех равны между собой $P_1 = P_2 = \dots = P_K$, получим [2]:

$$P_{oui} = \frac{\Lambda(\beta)}{\sqrt{2\pi\beta\sigma}} \exp\left[-\frac{\sigma^2\beta}{2}(\beta-2)\right], \quad (5)$$

где $\sigma = \sqrt{\frac{2E_s}{N_0}}$;

$$\beta = \frac{L \cdot N_0}{L \cdot N_0 + 4 \cdot K \cdot E_n};$$

E_n – энергия помехи на входе приемника;

$\Lambda(\beta) = \prod_{i=1}^K I_0\left(\frac{\beta \cdot A_i \cdot \tau_b}{\sqrt{L}}\right)$ – порождающая функция моментов случайной величины;

I_0 – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

Используя выражение (5), были проведены расчеты по определению вероятности ошибки на бит информации в зависимости от отношения помеха/шум для СРС с ШПС с учетом воздействия структурных помех, сформированных предложенным методом. Начальные условия для расчетов: $K = 20, 30$ и 40 , длина ПСП $L = 1000$, отношение сигнал/шум $E_c/N_0 = 10$ и 15 дБ. Результаты расчетов в виде графиков изображены на рисунке 3.

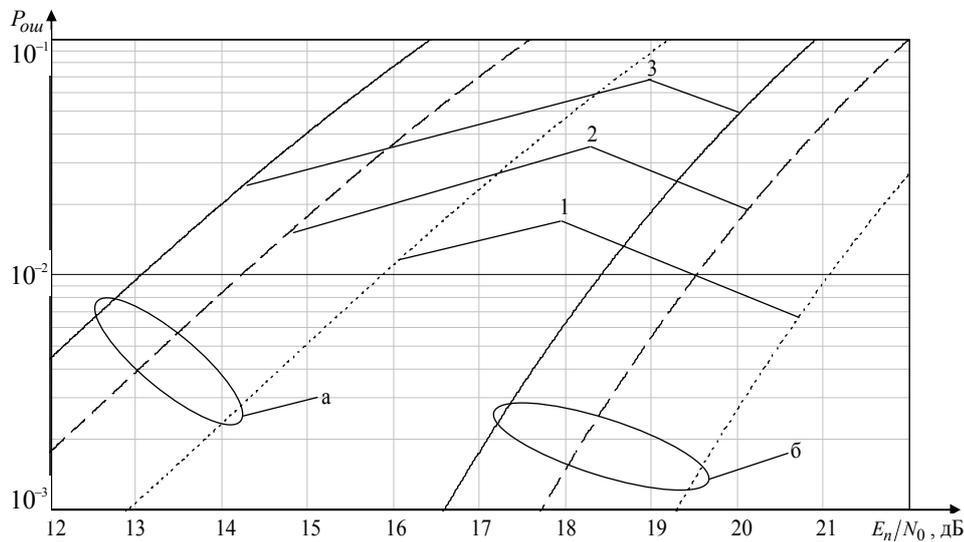


Рисунок 3 – Зависимость вероятности ошибки на бит информации для СРС с ШПС от отношения помеха/шум при учете воздействия взаимных помех для $E_c/N_0 = 10$ дБ (а) и $E_c/N_0 = 15$ дБ (б) при количестве взаимных помех 20 (кривые 1), 30 (кривые 2) та 40 (кривые 3).

Из полученного графика можно сделать вывод, что для достижения установленного критерия эффективности подавления (1) предложенным методом необходимо, чтобы мощность помехи превышала мощность полезного сигнала в точке приема для $K = 20$ на 6 дБ, для $K = 30$ на 4,5 дБ и для $K = 40$ на 3 дБ. Таким образом, увеличение K приводит к уменьшению мощности помехи, необходимой для достижения нужной вероятности ошибки на бит информации.

Заключение. Сравнивая результаты моделирования на рисунке 1 и рисунке 3, можно сделать вывод, что выигрыш по мощности излучения при использовании структурной помехи, сформированной предложенным методом, в сравнении с наиболее эффективной помехой для выше указанных условий составляет 21–25 дБ. С увеличением K , мощность помехи, необходимая для достижения критерия (1) уменьшается.

Для формирования помехи предложенным методом необходимо иметь априорную информацию о длительности импульса псевдослучайной последовательности и ее длине.

Число K можно выбирать как максимальное количество порождающих многочленов для определенного значения степени задающего полинома, используемого для формирования ПСП полезного сигнала.

Предложенный метод позволяет сформировать помеху СРС с ШПС с меньшим значением отношения помеха/сигнал, чем наиболее эффективная неструктурная помеха.

Литература

1. Кириллов, В.А. Средства создания радиоэлектронных помех и основы их боевого применения в сухопутных войсках: учебное пособие / Кириллов В.А., Тезюничев В.Ж. – Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет) – М., 2002. – 64 с.
2. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев [и др.] ; под. ред. В.И. Борисова. – 1-е изд. – М. : Радио и связь, 2003. – 635 с.
3. Ziemer, R.E. Fundamentals of Spread Spectrum Modulation / R.E. Ziemer. – 2nd ed. – Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 2007. – 86 p.
4. Torrieri, D.J. Principles of Secure Communication Systems / D.J. Torrieri. – Norwood, MA : Artech House, 1992. – 600 p.
5. Poisel, R.A. Introduction to Communications Electronic Warfare Systems / R.A. Poisel. – Norwood, MA : Artech House, 2008. – 641 p.
6. Poisel, R.A. Modern Communications Jamming Principles and Techniques, Norwood / R.A. Poisel. – MA : Artech House, 2011. – 870 p.
7. Прокис, Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис. – Пер. с англ. / Под ред. Д.Д. Кловского. – М. : Радио и связь, 2000. – 800 с.
8. Wang, H. Performance of DSSS against Repeater Jamming / H. Wang, Z.J. Wang, J.B. Guo // IEEE Electronics, Circuits and Systems, 2006. – P. 858–861.
9. Варакин, Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л.Е. Варакин. – М. : Радио и связь, 1985. – 384 с.
10. Burel, G. Detection of Spread Spectrum Transmissions using fluctuations of correlation estimators / G. Burel // IEEE Int. Symp. on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. – 2000. – P. 358–363.
11. Zhanqi DONG The Detection, Symbol Period and Chip Width Estimation of DSSS Signals Based on Delay-Multiply, Correlation and Spectrum Analysis / Zhanqi DONG, Hanying HU // IEEE Electronics, Circuits and Systems. – 2007. – P. 140–144.

Житомирский военный институт
им. С.П. Королева Государственного
университета телекоммуникаций

Поступила в редакцию 11.11.2014

УДК 621.396.67

Линейная антенная система коротковолнового диапазона на основе излучателей типа «бабочка»

В.П. Кудин

Предложена широкополосная линейная антенная решетка вертикальной поляризации коротковолнового диапазона из излучателей типа «бабочка». Данный излучатель представляет собой модифицированную плоскую проволочную антенну. Однонаправленность излучения обеспечивается с помощью аперриодического рефлектора. Характерной особенностью предложенной решетки является то, что соседние излучатели гальванически соединены друг с другом. Это приводит к улучшению радиотехнических характеристик и дает несомненные конструктивные и экономические преимущества – отсутствие высокочастотных изоляторов, простоту реализации грозозащиты и уменьшение стоимости. Проведено электродинамическое моделирование линейной антенной системы. Показано, что восьмизлементная решетка обеспечивает сканирование в секторе углов до 45 градусов от нормали к плоскости решетки в диапазоне частот 5–7,8 МГц.

Ключевые слова: фазированная антенная решетка, численные методы, интегральные уравнения, тонкопроволочный излучатель, коротковолновый диапазон.

The broadband linear antenna array of vertical polarization for a short-wave band operation consisting of "butterfly" radiators is offered. The given radiator represents the modified flat wire antenna. The one-sided radiation pattern is provided by means of a periodic reflector. The specific feature of the offered array is that the adjacent radiators are galvanically connected with each other. It provides the improvement of radio engineering characteristics and obvious constructive and economic advantages – absence of high-frequency insulators, lightning guard and cost reduction. Electrodynamics modeling is spent. It is shown, that the eight-element array provides scanning up to 45 degrees from a normal to array plane in the frequency band 5–7.8 MHz.

Keywords: phased array, numerical methods, integral equations, thin wire radiator, short-wave band.

Введение. Антенны коротковолнового диапазона для загоризонтных радиолокаторов традиционно строятся на основе линейных решеток логопериодических антенн. Логопериодические антенны имеют хорошие радиотехнические характеристики, однако представляют собой объемную конструкцию, что влечет серьезные материальные затраты на изготовление, монтаж и эксплуатацию антенны. В данной работе для этих целей предлагается использовать линейную решетку из излучателей типа «бабочка». Конструкция такой решетки является плоскостной и, следовательно, требует меньшее количество опор.

Основная часть. Излучающая часть антенной системы построена на основе излучателей типа «бабочка» (рисунок 1). Данные излучатели представляют собой модифицированные плоские вертикальные вибраторы. Отличие от известных излучателей такого типа [1] состоит в измененной топологии расположения проводов внутри излучателя, что позволило получить более равномерные входные и внешние характеристики в полосе частот и секторе углов сканирования. Излучатели решетки возбуждаются с помощью блоков симметрирования, совмещенных с согласующими устройствами.

Кроме того, края излучателей типа «бабочка» в линейной решетке гальванически соединены друг с другом, т. е. представляют собой так называемые «coupled antenna» [2], что позволяет избавиться от большого количества высокочастотных изоляторов и упростить монтаж и эксплуатацию антенной системы. Также это приводит к очень простому решению в части грозозащиты.

Для обеспечения однонаправленного излучения излучатели располагаются перед проволочным рефлектором (рисунок 2).

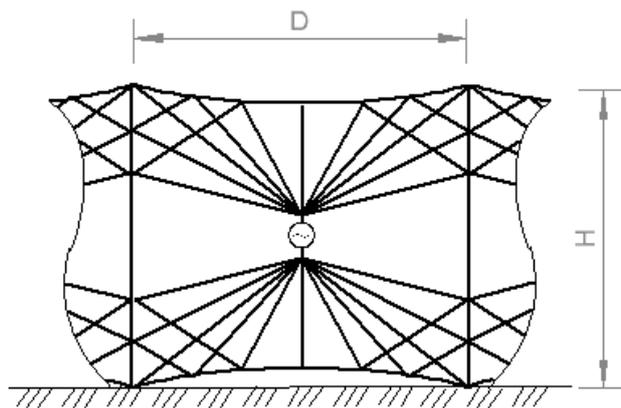


Рисунок 1 – Геометрия излучателя

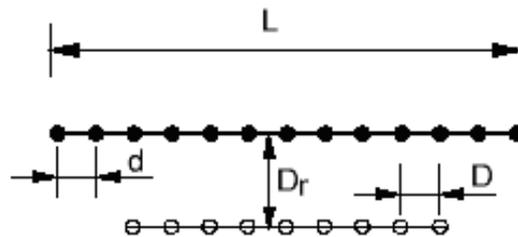


Рисунок 2 – Антенная решетка перед рефлектором

Электродинамическое моделирование антенной системы проводилось методом интегральных уравнений в приближении осевого тока. В качестве базисных и весовых функций использовались кусочно-синусоидальные (метод Галеркина), поле от которых выражается в замкнутом виде. Это позволяет при вычислении элементов обобщенной матрицы взаимных импедансов ограничиться лишь однократными интегралами, что приводит к существенной экономии машинного времени. Подробности алгоритма, реализованного в виде комплекса вычислительных программ для произвольной системы прямолинейных проводников, приведены в [3], [4].

Входы излучателей возбуждались падающими волнами равной амплитуды с линейным набегом фазы, обеспечивающим синфазное сложение полей в заданном азимутальном направлении, отсчитываемым от нормали к плоскости решетки (угол сканирования). Исследовались входные импедансы каждого излучателя в решетке и уровень их согласования (коэффициент стоячей волны), а также диаграммы направленности решетки в вертикальной и горизонтальной плоскостях для различных направлений фазирования.

Расчеты проводились в диапазоне частот 5–7.7 МГц (перекрытие по частоте 1,54:1) и секторе углов сканирования $\pm 50^\circ$. При этом предполагалось, что вся система находится над идеально проводящим экраном. Рассматривалась восьмиэлементная антенная решетка, выполненная (так же, как и рефлектор) из проводников диаметром 6 мм. Шаг решетки $D = 23$ м выбирался из условия обеспечения однолучевого сканирования в секторе углов $\pm 40^\circ$ от нормали к плоскости решетки. Густота проводов рефлектора, его длина и высота определялись исходя из требования получения необходимого уровня подавления излучения в заднем полупространстве. Численно установлено, что приемлемые характеристики получаются при расстоянии между проводами 1,1 м, длине и высоте рефлектора 207 м и 23 м соответственно.

На рисунке 3 представлены частотные зависимости входного импеданса отдельных излучателей решетки. В целом действительная часть входного импеданса лежит в пределах 150–200 Ом, а мнимая – в пределах 50–100 Ом, и, следовательно, возникает необходимость в использовании согласующего устройства. В этом заключается определенный недостаток по сравнению с логопериодической антенной. Также следует отметить невысокую широкополосность рассматриваемой антенны – всего лишь полторакратное перекрытие. Вместе с тем, как уже указывалось, решетка излучателей типа бабочка обладает несомненным конструктивным достоинством – плоскостностью конструкции, в отличие от объемной конструкции решетки логопериодических антенн.

Диаграммы направленности решетки в горизонтальной и вертикальной плоскостях для трех углов сканирования на средней частоте рабочего диапазона представлены на рисунках 4 и 5. Решетка имеет хорошо сформированные диаграммы направленности со стандартным уровнем первого бокового лепестка минус 13 дБ и уровнем заднего излучения не более минус 18 дБ.

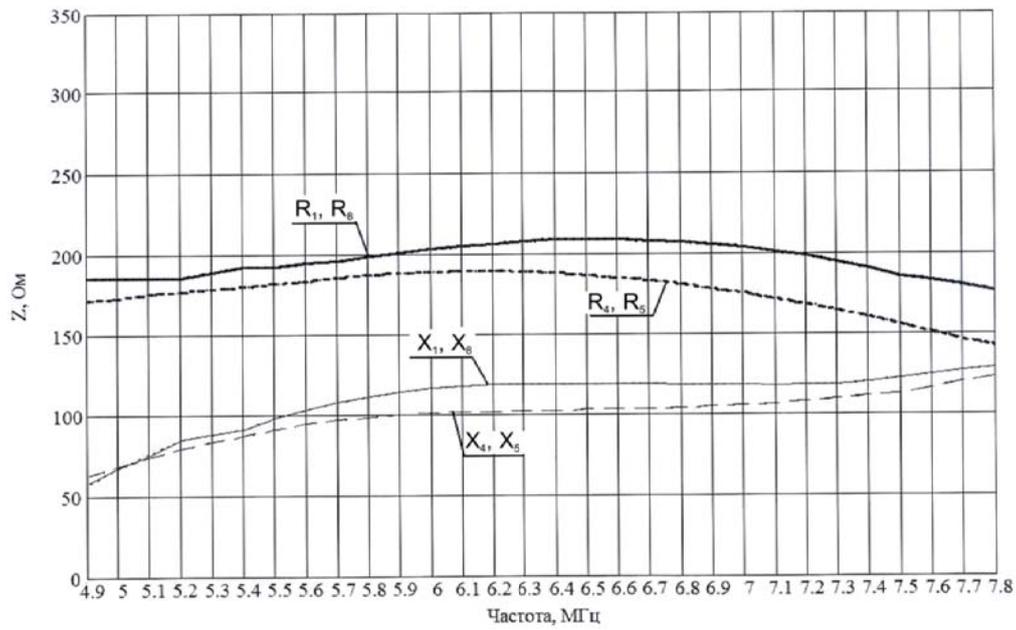


Рисунок 3 – Частотные зависимости входного импеданса отдельных излучателей решетки

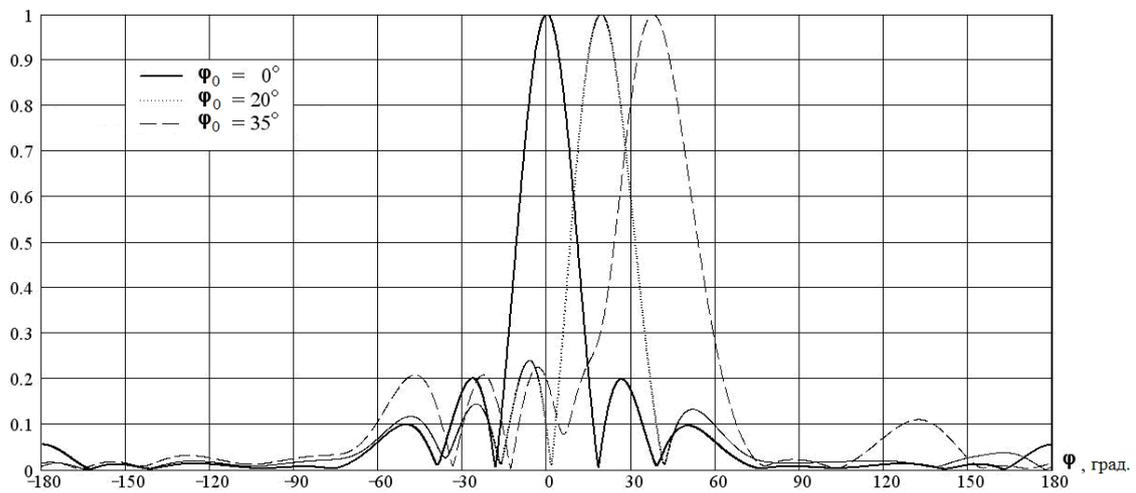


Рисунок 4 – Диаграммы направленности в горизонтальной плоскости на частоте 6,35 МГц

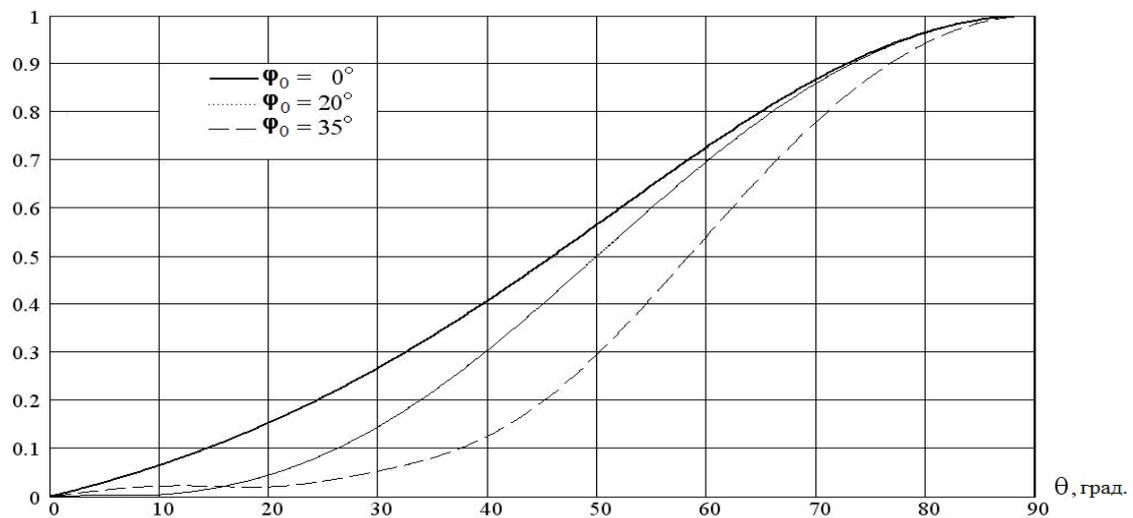


Рисунок 5 – Диаграммы направленности в вертикальной плоскости на частоте 6,35 МГц

Частотные зависимости коэффициента направленного действия решетки при различных углах сканирования представлены на рисунке 6.

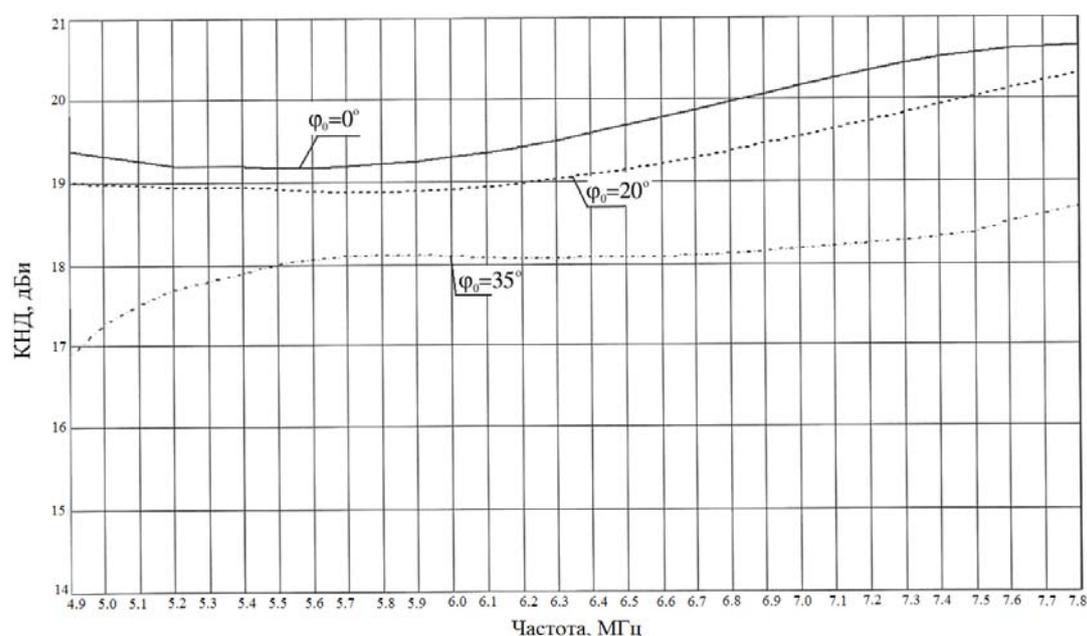


Рисунок 6 – Частотные зависимости коэффициента направленного действия решетки при различных углах сканирования

Заключение. Анализ полученных результатов показывает, что рассматриваемая антенная система имеет следующие характеристики:

- Диапазон рабочих частот – 5,0–7,7 МГц.
- Сектор углов сканирования – $80^\circ (\pm 40^\circ)$.
- Ширина неотклоненного луча в диапазоне рабочих частот – $16,0\text{--}10,5^\circ$.
- Уровень задних лепестков азимутальной диаграммы направленности – не более минус 18 дБ.
- Коэффициент направленного действия – не менее 17,3–18,7 Дби.
- Коэффициент стоячей волны (по ансамблю излучателей) – не более 1,4.

Достоинством антенной системы является «плоскостность» конструкции, требующая небольшого количества опор, а также отсутствие высокочастотных изоляторов, что в целом приводит к хорошим экономическим показателям.

Литература

1. Айзенберг, Г.З. Коротковолновые антенны / Г.З. Айзенберг, С.П. Белоусов, Э.М. Журбенко [и др.]; под ред. Г.З. Айзенберга. – М. : Радио и связь, 1985. – 536 с.
2. Hansen, R.C. Phased array antennas, Second Edition / R.C. Hansen. – New York : John Wiley & Sons, Inc., 2009. – 548 p.
3. Кудин, В.П. Анализ произвольных проволочных структур из прямолинейных проводников. Часть 1 : Вычисление матрицы взаимных импедансов / В.П. Кудин // Антенны. – 2007. – Вып. 9 (124). – С. 6–11.
4. Кудин, В.П. Анализ произвольных проволочных структур из прямолинейных проводников. Часть 2 : Учет потерь в проводниках и произвольного падающего поля / В.П. Кудин // Антенны. – 2007. – Вып. 9 (124). – С. 12–16.

Фазированная антенная решетка кругового обзора над проводящей цилиндрической поверхностью из излучателей вертикальной поляризации

И.А. ФАНЯЕВ, В.П. КУДИН

Найдено общее решение трехмерной электродинамической задачи о фазированной антенной решетке вблизи проводящей цилиндрической поверхности. Проведен расчет электромагнитного поля антенной решеткой кругового обзора из излучателей вертикальной поляризации.

Ключевые слова: фазированная антенная решетка, цилиндрическая поверхность, напряженность электрического поля, численные методы, диаграмма направленности.

A general solution of the electrodynamic problem of a phased array antenna near a conducting cylindrical surface is found. The electromagnetic field of the circular view antenna array from radiators with vertical polarization is calculated.

Keywords: phased antenna array, cylindrical surface, electric field, numerical methods, radiation pattern.

Введение. Одним из перспективных вариантов антенных систем для обзорных радиолокационных станций являются цилиндрические фазированные антенные решетки. Интерес именно к цилиндрическим решеткам объясняется тем, что присущая им симметрия позволяет сканировать по азимуту в пределах 360° без изменения коэффициента направленного действия и формы диаграммы направленности. К сожалению, построение строгих электродинамических моделей решеток цилиндрического типа сопряжено со значительными трудностями.

Фазирование кольцевых и цилиндрических решеток при формировании однолучевых диаграмм направленности может осуществляться, к примеру, с использованием концепции эквивалентного линейного раскрыва [1], кольцевых (азимутальных) гармоник [2], [3]. Метод парциальных диаграмм в различных модификациях применен для формирования однолучевых (многолучевых) диаграмм направленности антенных решеток в [4], [5].

В трехмерной электродинамической постановке задача анализа щелевых излучателей на круговом цилиндре была решена в [6]–[8]. Однако излучатели (щели) в данной постановке находятся в плоскости цилиндра, тем самым упрощается решение задачи. Значительный интерес представляет случай возбуждения цилиндра излучателями, находящимися над проводящей поверхностью. Частный случай такой задачи был рассмотрен в [9], где учитывалась только z -я компонента источников излучения (излучатели ориентировались вдоль оси цилиндра). Решение трехмерной электродинамической задачи для цилиндрических антенных решеток в литературе не встречается.

Общее решение задачи. В работе [10] рассматривалась задача о произвольном внешнем возбуждении круглого идеально проводящего цилиндра бесконечной длины, в котором поле в каждой точке пространства вне цилиндра представлялось в виде суммы падающего и отраженного поля. При этом использовалась функция Грина в цилиндрической системе координат, которая содержит модуль разности квадратов волновых функций, что приводит к трудностям нахождения полей. Однако разложение функции Грина можно привести в виде спектра бегущих волн, распространяющихся в радиальном направлении [10]

$$G(r, \varphi, z; r', \varphi', z') = \frac{1}{8\pi i} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-in(\varphi-\varphi')} \int_{h=-\infty}^{\infty} e^{-ih(z-z')} \begin{cases} H_n^{(2)}(vr') J_n(vr), & r < r' \\ J_n(vr') H_n^{(2)}(vr), & r > r' \end{cases} dh, \quad (1)$$

где $v = -i\sqrt{h^2 - k^2}$.

Решая поставленную задачу тем же путем, что и в [10, с. 119], но с другой формой записи функции Грина, мы можем найти полное поле $E_i^{\text{сумм}}$ во внешней области кругового цилиндра, где i – цилиндрические координаты r, φ, z .

$$E_{znh}^{сумм} = E_{znh}^{nad} + E_{znh}^{omp}, \quad H_{znh}^{сумм} = H_{znh}^{nad} + H_{znh}^{omp},$$

$$E_{znh}^{сумм} = e^{-ihz-in\varphi} \cdot \begin{cases} F_1^{\circ}(h) \left[J_n(vr) - \frac{J_n(va)}{H_n^{(2)}(va)} H_n^{(2)}(vr) \right], & r < r' \\ H_n^{(2)}(vr) \left[F_2^{\circ}(h) - \frac{J_n(va)}{H_n^{(2)}(va)} F_1^{\circ}(h) \right], & r > r' \end{cases}, \quad (2)$$

$$H_{znh}^{сумм} = e^{-ihz-in\varphi} \cdot \begin{cases} F_1^M(h) \left[J_n(vr) - \frac{J_n'(va)}{H_n^{(2)}(va)} H_n^{(2)}(vr) \right], & r < r' \\ H_n^{(2)}(vr) \left[F_2^M(h) - \frac{J_n'(va)}{H_n^{(2)}(va)} F_1^M(h) \right], & r > r' \end{cases}, \quad (3)$$

Аналогичным образом, получаем поперечные составляющие суммарного поля. При этом для электрических волн ($H_z = 0$).

$$E_{rnh}^{э. сумм} = \frac{-ih}{k^2 - h^2} e^{-ihz-in\varphi} \mathbf{v} \cdot \begin{cases} F_1^{\circ}(h) \left[J_n'(vr) - \frac{J_n(va)}{H_n^{(2)}(va)} H_n^{(2)'}(vr) \right], & r < r' \\ H_n^{(2)'}(vr) \left[F_2^{\circ}(h) - \frac{J_n(va)}{H_n^{(2)}(va)} F_1^{\circ}(h) \right], & r > r' \end{cases}, \quad (4)$$

$$H_{rnh}^{э. сумм} = \frac{\omega \varepsilon'_a n}{k^2 - h^2} e^{-ihz-in\varphi} \cdot \begin{cases} F_1^{\circ}(h) \left[J_n(vr) - \frac{J_n(va)}{H_n^{(2)}(va)} H_n^{(2)}(vr) \right], & r < r' \\ H_n^{(2)}(vr) \left[F_2^{\circ}(h) - \frac{J_n(va)}{H_n^{(2)}(va)} F_1^{\circ}(h) \right], & r > r' \end{cases}, \quad (5)$$

$$E_{\varphi nh}^{э. сумм} = \frac{-h}{k^2 - h^2} \frac{n}{r} e^{-ihz-in\varphi} \mathbf{v} \cdot \begin{cases} F_1^{\circ}(h) \left[J_n(vr) - \frac{J_n(va)}{H_n^{(2)}(va)} H_n^{(2)}(vr) \right], & r < r' \\ H_n^{(2)}(vr) \left[F_2^{\circ}(h) - \frac{J_n(va)}{H_n^{(2)}(va)} F_1^{\circ}(h) \right], & r > r' \end{cases}, \quad (6)$$

$$H_{\varphi nh}^{э. сумм} = \frac{-i\omega \varepsilon'_a}{k^2 - h^2} e^{-ihz-in\varphi} \mathbf{v} \cdot \begin{cases} F_1^{\circ}(h) \left[J_n'(vr) - \frac{J_n(va)}{H_n^{(2)}(va)} H_n^{(2)'}(vr) \right], & r < r' \\ H_n^{(2)'}(vr) \left[F_2^{\circ}(h) - \frac{J_n(va)}{H_n^{(2)}(va)} F_1^{\circ}(h) \right], & r > r' \end{cases}, \quad (7)$$

Для магнитных волн ($E_z = 0$).

$$E_{rnh}^{м. сумм} = \frac{-\omega \mu'_a n}{k^2 - h^2} e^{-ihz-in\varphi} \cdot \begin{cases} F_1^M(h) \left[J_n(vr) - \frac{J_n'(va)}{H_n^{(2)}(va)} H_n^{(2)}(vr) \right], & r < r' \\ H_n^{(2)}(vr) \left[F_2^M(h) - \frac{J_n'(va)}{H_n^{(2)}(va)} F_1^M(h) \right], & r > r' \end{cases}, \quad (8)$$

$$H_{rnh}^{м. сумм} = \frac{-ih}{k^2 - h^2} e^{-ihz-in\varphi} \mathbf{v} \cdot \begin{cases} F_1^M(h) \left[J_n'(vr) - \frac{J_n'(va)}{H_n^{(2)}(va)} H_n^{(2)'}(vr) \right], & r < r' \\ H_n^{(2)'}(vr) \left[F_2^M(h) - \frac{J_n'(va)}{H_n^{(2)}(va)} F_1^M(h) \right], & r > r' \end{cases}, \quad (9)$$

$$E_{\varphi h}^{M, \text{сумм}} = \frac{i\omega\mu'_a}{k^2 - h^2} e^{-ihz - in\varphi} v \cdot \begin{cases} F_1^M(h) \left[J'_n(vr) - \frac{J'_n(va)}{H_n^{(2)'}(va)} H_n^{(2)'}(vr) \right], & r < r' \\ H_n^{(2)'}(vr) \left[F_2^M(h) - \frac{J'_n(va)}{H_n^{(2)'}(va)} F_1^M(h) \right], & r > r' \end{cases}, \quad (10)$$

$$H_{\varphi h}^{M, \text{сумм}} = \frac{-h}{k^2 - h^2} \frac{n}{r} e^{-ihz - in\varphi} \cdot \begin{cases} F_1^M(h) \left[J_n(vr) - \frac{J'_n(va)}{H_n^{(2)'}(va)} H_n^{(2)}(vr) \right], & r < r' \\ H_n^{(2)}(vr) \left[F_2^M(h) - \frac{J'_n(va)}{H_n^{(2)'}(va)} F_1^M(h) \right], & r > r' \end{cases}, \quad (11)$$

Полное поле для каждой компоненты определяется суммой составляющих электрических и магнитных волн.

Расчет бесконечной фазированной антенной решетки. Рассмотрим линейную решетку излучателей с периодом d_z , расположенных вдоль оси z . Нумерация излучателей по оси z начинается с нуля и осуществляется индексом m , причем $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Каждый излучатель возбуждается с одинаковой амплитудой и с линейным фазовым сдвигом

$$j_{zm}^{(m)}(r'; \varphi'; z' - md_z) = j_z^{(m)}(r'; \varphi'; z') e^{-im\psi},$$

где ψ – сдвиг фаз между соседними излучателями.

Продольная составляющая напряженности электрического поля имеет вид

$$E_z^{\text{общ}} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} E_{zm}^{\text{сумм}}(r - r'; \varphi - \varphi'; (z - z') - md_z) e^{-im\psi}.$$

В процессе решения из $E_z^{\text{общ}}$ можно выделить выражение $\sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{-imd_z \left(\frac{\psi - h}{d_z} \right)}$, которое с помощью формулы суммирования Пуассона можно привести к виду

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{-imd_z \left(\frac{\psi - h}{d_z} \right)} = \frac{2\pi}{d_z} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(h_m - h),$$

где δ – дельта-функция Дирака; $h_m = \frac{\psi}{d_z} + \frac{2\pi m}{d_z}$.

Полученное выражение за счет свойств дельта-функции Дирака позволяет избавиться от интегрирования по волновой функции h .

Теперь, добавляя к расчету антенной решетки N излучателей, расположенных по оси φ (рисунок 1). Период решетки составляет $d_\varphi = 2\pi b / N$, где $b = a + \Delta$, a – радиус цилиндра, Δ – расстояние от цилиндрической поверхности до излучателя. Нумерация излучателей по оси φ начинается с нуля и осуществляется индексом p , причем $p \in [0; N - 1]$. Учитывая то, что каждый излучатель возбуждается с одинаковой амплитудой и с фазовым сдвигом равным $\frac{2\pi}{N} p$, получим

$$E_{zq}^\Sigma = \sum_{p=0}^{N-1} E_z^{\text{общ}} \left(r - r'; (\varphi - \varphi') + \frac{2\pi}{N} p; z - z' \right) e^{i \frac{2\pi}{N} pq},$$

где $q \in [0; N - 1]$ – номер режима возбуждения.

После несложных преобразований с учетом соотношения

$$\sum_{p=0}^{N-1} e^{-i \frac{2\pi}{N} p(n-q)} = N \delta_{n, q+wN},$$

где $\delta_{n, q+wN}$ – дельта-символ Кронекера, $w \in (-\infty; +\infty)$ – натуральные числа, для продольных составляющих напряженностей электрического и магнитного полей антенной решетки получим

$$E_{zq}^{\Sigma} = -\frac{\pi i}{2} \frac{b}{d_{\varphi} d_z} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_V e^{-ih_m(z-z')-iq_n(\varphi-\varphi')} \cdot \begin{cases} Q_1^3(h_m) \left[J_{q_n}(v_m r) - \frac{J_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} H_{q_n}^{(2)}(v_m r) \right], & r < r' \\ H_{q_n}^{(2)}(v_m r) \left[Q_2^3(h_m) - \frac{J_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} Q_1^3(h_m) \right], & r > r' \end{cases} dv \quad (12)$$

$$H_{zq}^{\Sigma} = -\frac{\pi i}{2} \frac{b}{d_{\varphi} d_z} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_V e^{-ih_m(z-z')-iq_n(\varphi-\varphi')} \cdot \begin{cases} Q_1^M(h_m) \left[J_{q_n}(v_m r) - \frac{J'_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} H_{q_n}^{(2)}(v_m r) \right], & r < r' \\ H_{q_n}^{(2)}(v_m r) \left[Q_2^M(h_m) - \frac{J'_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} Q_1^M(h_m) \right], & r > r' \end{cases} dv \quad (13)$$

где $q_n = q + nN$, $v_m = \sqrt{k^2 - h_m^2}$,

$$Q_s^3(h_m) = \frac{k^2 - h_m^2}{i\omega \varepsilon'_a} j_z^3 R_{q_n}(v_m r') + \left(\frac{h_m}{\omega \varepsilon'_a} j_{\varphi}^3 - j_r^M \right) \frac{in}{r'} R_{q_n}(v_m r') + \left(\frac{h_m}{\omega \varepsilon'_a} j_r^3 + j_{\varphi}^M \right) v_m R'_{q_n}(v_m r'),$$

$$Q_s^M(h_m) = \frac{k^2 - h_m^2}{i\omega \mu'_a} j_z^M R_{q_n}(v_m r') + \left(\frac{h_m}{\omega \mu'_a} j_{\varphi}^M + j_r^3 \right) \frac{in}{r'} R_{q_n}(v_m r') + \left(\frac{h_m}{\omega \mu'_a} j_r^M - j_{\varphi}^3 \right) v_m R'_{q_n}(v_m r'),$$

при $s=1$ $R_{q_n}(v_m r') = H_{q_n}^{(2)}(v_m r')$ и при $s=2$ $R_{q_n}(v_m r') = J_{q_n}(v_m r')$, $j_i^{(s)}$ – электрические и магнитные токи, возбуждаемые на нулевом излучателе (i – координаты r, φ, z).

Зная продольные составляющие поля, с учетом уравнений Максвелла можно определить и поперечные составляющие электромагнитного поля, создаваемого цилиндрической антенной решеткой:

$$E_{r\varphi}^{\Sigma} = \frac{\pi i}{2} \frac{b}{d_{\varphi} d_z} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_V e^{-ih_m(z-z')-iq_n(\varphi-\varphi')} \cdot \left(\frac{ih_m}{v_m} \cdot \begin{cases} Q_1^3(h_m) \left[J'_{q_n}(v_m r) - \frac{J_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} H_{q_n}^{(2)'}(v_m r) \right], & r < r' \\ H_{q_n}^{(2)'}(v_m r) \left[Q_2^3(h_m) - \frac{J_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} Q_1^3(h_m) \right], & r > r' \end{cases} + \right. \\ \left. + \frac{kW}{v_m^2} \frac{n}{r} \cdot \begin{cases} Q_1^M(h_m) \left[J_{q_n}(vr) - \frac{J'_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} H_{q_n}^{(2)}(v_m r) \right], & r < r' \\ H_{q_n}^{(2)}(v_m r) \left[Q_2^M(h_m) - \frac{J'_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} Q_1^M(h_m) \right], & r > r' \end{cases} \right) dv \quad (14)$$

$$H_{r\varphi}^{\Sigma} = -\frac{\pi i}{2} \frac{b}{d_{\varphi} d_z} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_V e^{-ih_m(z-z')-iq_n(\varphi-\varphi')} \cdot \left(\frac{k}{Wv_m^2} \frac{n}{r} \cdot \begin{cases} Q_1^3(h_m) \left[J_{q_n}(v_m r) - \frac{J_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} H_{q_n}^{(2)}(v_m r) \right], & r < r' \\ H_{q_n}^{(2)}(v_m r) \left[Q_2^3(h_m) - \frac{J_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} Q_1^3(h_m) \right], & r > r' \end{cases} + \right. \\ \left. + \frac{-ih_m}{v_m} \cdot \begin{cases} Q_1^M(h_m) \left[J'_{q_n}(v_m r) - \frac{J'_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)'}(v_m a)} H_{q_n}^{(2)'}(v_m r) \right], & r < r' \\ H_{q_n}^{(2)'}(vr) \left[Q_2^M(h_m) - \frac{J'_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)'}(v_m a)} Q_1^M(h_m) \right], & r > r' \end{cases} \right) dv \quad (15)$$

$$E_{\varphi q}^{\Sigma} = -\frac{\pi i}{2} \frac{b}{d_{\varphi} d_z} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int e^{-ih_m(z-z')-iq_n(\varphi-\varphi')} \cdot \left(\frac{-h_m n}{v_m^2 r} \left\{ \begin{array}{l} Q_1^3(h_m) \left[J_{q_n}(v_m r) - \frac{J_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} H_{q_n}^{(2)}(v_m r) \right], r < r' \\ H_{q_n}^{(2)}(v_m r) \left[Q_2^3(h_m) - \frac{J_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} Q_1^3(h_m) \right], r > r' \end{array} \right\} + \right. \tag{16}$$

$$+ \frac{i kW}{v_m} \cdot \left\{ \begin{array}{l} Q_1^M(h_m) \left[J'_{q_n}(v_m r) - \frac{J'_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} H_{q_n}^{(2)'}(v_m r) \right], r < r' \\ H_{q_n}^{(2)'}(v_m r) \left[Q_2^M(h_m) - \frac{J'_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)'}(v_m a)} Q_1^M(h_m) \right], r > r' \end{array} \right\} dv$$

$$H_{\varphi q}^{\Sigma} = \frac{\pi i}{2} \frac{b}{d_{\varphi} d_z} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int e^{-ih_m(z-z')-iq_n(\varphi-\varphi')} \cdot \left(\frac{i k}{W v_m} \left\{ \begin{array}{l} Q_1^3(h_m) \left[J'_{q_n}(v_m r) - \frac{J_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} H_{q_n}^{(2)'}(v_m r) \right], r < r' \\ H_{q_n}^{(2)'}(v_m r) \left[Q_2^3(h_m) - \frac{J_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} Q_1^3(h_m) \right], r > r' \end{array} \right\} + \right. \tag{17}$$

$$+ \frac{h_m n}{v_m^2 r} \left\{ \begin{array}{l} Q_1^M(h_m) \left[J_{q_n}(v_m r) - \frac{J'_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} H_{q_n}^{(2)}(v_m r) \right], r < r' \\ H_{q_n}^{(2)}(v_m r) \left[Q_2^M(h_m) - \frac{J'_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)'}(v_m a)} Q_1^M(h_m) \right], r > r' \end{array} \right\} dv$$

где $W = 120\pi$ (Ом) – волновое сопротивление.

Полученные общие выражения (12)–(17) позволяют вычислять полное электромагнитное поле, возбуждаемое бесконечной фазированной антенной решеткой, расположенной над проводящей цилиндрической поверхностью как между цилиндром и излучателями, так и вдали от всей системы. При этом в решении учитываются все компоненты сторонних электрических и магнитных токов $j_i^{(i)}$ (i – координаты r, φ, z).

Расчет электромагнитного поля антенной решетки кругового обзора из излучателей вертикальной поляризации. Рассмотрим частный случай задачи о внешнем возбуждении идеально проводящего бесконечно длинного круглого цилиндра антенной решеткой из электрических вибраторов полоскового типа (рисунок 1), ориентированных вдоль оси цилиндра (вертикальная поляризация). Будем считать поперечные размеры вибраторов гораздо меньше длины волны и продольных размеров. Поэтому в решении достаточно учитывать только z -ю компоненту токов. На рисунке 1, б представлена модель элементарной ячейки.

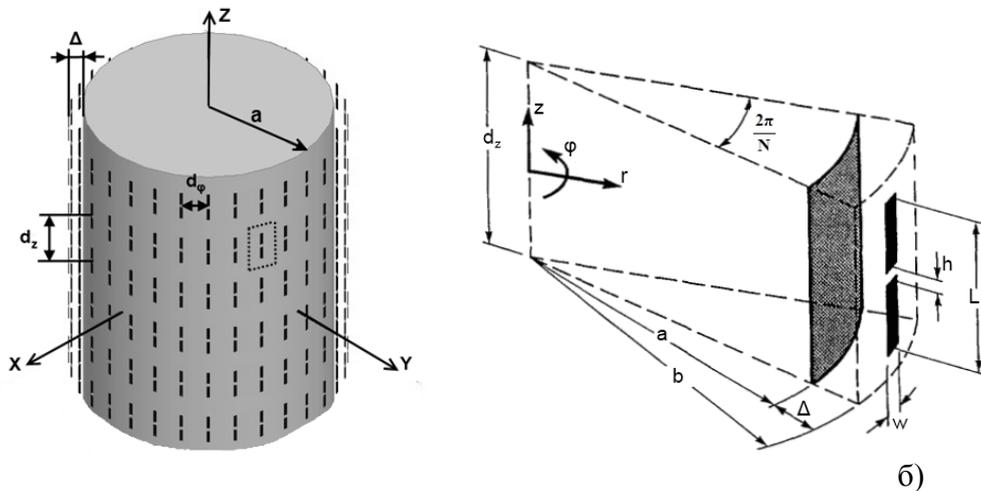


Рисунок 1 – Бесконечная антенная решетка полосковых излучателей вертикальной поляризации над идеально проводящим цилиндром (а), модель излучателя (б)

Продольные составляющие напряженностей электрического и магнитного полей примут вид

$$E_{zq}^{\Sigma} = -\frac{\pi}{2} \frac{b}{d_z d_{\varphi}} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_V \frac{k^2 - h_m^2}{\omega \varepsilon'_a} j_z^{\Sigma} e^{-ih_m(z-z') - iq_n(\varphi-\varphi')} \cdot \begin{cases} J_{q_n}(v_m r') \left[J_{q_n}(v_m r) - \frac{J_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} H_{q_n}^{(2)}(v_m \rho) \right], & r < r' \\ H_{q_n}^{(2)}(v_m r) \left[J_{q_n}(v_m r') - \frac{J_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} H_{q_n}^{(2)}(v_m r') \right], & r > r' \end{cases}, \quad (18)$$

При этом плотность тока будем определять следующим выражением $j_z^{\Sigma}(r', \varphi', z') = J(\varphi', z') \cdot \delta(r' - b)$.

Тогда

$$E_{zq}^{\Sigma} = -\frac{\pi}{2} \frac{kWb}{d_z d_{\varphi}} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\frac{v_m}{k} \right)^2 e^{-ih_m z - iq_n \varphi} \cdot \begin{cases} J_{q_n}(v_m r) \left[J_{q_n}(v_m b) - \frac{J_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} H_{q_n}^{(2)}(v_m b) \right], & r < b \\ H_{q_n}^{(2)}(v_m r) \left[J_{q_n}(v_m b) - \frac{J_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} H_{q_n}^{(2)}(v_m b) \right], & r > b \end{cases} \iint J(\varphi', z') e^{ih_m z' + iq_n \varphi'} dz' d\varphi' \\ H_{zq}^{\Sigma} = 0, \quad (19)$$

В формуле (19) остается только определить вид поверхностной плотности тока $J(\varphi', z')$.

Предположим, что наш вибратор возбуждается напряжением $V_g = -E_g h$ в зазоре, где \vec{E}_g – напряженность стороннего электрического поля. Полагая вне зазора $\vec{E}_g = 0$ и учитывая, что, согласно граничному условию на поверхности вибратора тангенциальная составляющая электрического поля обращается в нуль, получим интегральное уравнение относительно поверхностной плотности электрического тока

$$-\frac{\pi}{2} \frac{kWb}{d_z d_{\varphi}} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\frac{v_m}{k} \right)^2 e^{-ih_m z - iq_n \varphi} \cdot H_{q_n}^{(2)}(v_m b) \left[J_{q_n}(v_m b) - \frac{J_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} H_{q_n}^{(2)}(v_m b) \right] \iint_{\varphi', z'} J(\varphi', z') e^{ih_m z' + iq_n \varphi'} dz' d\varphi' = \begin{cases} 0 \\ \vec{E}_g \end{cases}, \quad (21)$$

Будем решать полученное интегральное уравнение методом Галеркина. Для этого представим $J(\varphi', z')$ в виде $J(\varphi', z') = \sum_{u=1}^Q c_u \psi_u(\varphi', z')$,

где c_u – неизвестные весовые коэффициенты. Используем в качестве базисных функций

$$\psi_u(\varphi', z') = \sin\left(\frac{u\pi}{L} \left[z' + \frac{L}{2} \right]\right), \quad |z'| \leq \frac{L}{2}, \quad |\varphi'| \leq \frac{w}{2b}, \quad u = 1, 2, \dots, N.$$

В итоге получается система уравнений, аналогичная работе [9], в которой непосредственно для рассматриваемого частного случая вертикальных вибраторов построено интегральное уравнение и подробно описывается его решение.

Входящие в уравнения (21) функции Бесселя и Ханкеля рассчитывались с помощью тех или иных разложений [11] в зависимости от значений аргумента и порядка. Чтобы избежать числового переполнения или опустошения (потери значимости) из-за экспоненциального поведения функций Бесселя и Ханкеля, они рассчитывались не по отдельности, а использовалась асимптотика для всего выражения $H_{q_n}^{(2)}(v_m b) \left[J_{q_n}(v_m b) - \frac{J_{q_n}(v_m a)}{H_{q_n}^{(2)}(v_m a)} H_{q_n}^{(2)}(v_m b) \right]$. Кроме того, для

ускорения сходимости бесконечного ряда по индексу n , который имеет сходимость порядка n^{-2} , использовался метод Эвальда [12]. Ряд по индексу m имеет сходимость порядка m^{-3} и в ускорении не нуждается. Входное сопротивление вибратора $Z_g(q, k_{z0})$ рассчитывалось с точностью до пяти значащих цифр, при этом в двойных рядах достаточно удерживать около 400 членов (индексы m и n пробегает значения в интервале от минус 10 до 10).

Согласование входного сопротивления вибратора с линией питания осуществлялось по такой же схеме и принципу, что и в источнике [9].

Диаграмма направленности антенной решетки. Чтобы определить диаграмму направленности цилиндрической антенной решетки, необходимо знать диаграмму направленности одного элемента и амплитудно-фазовое распределение решетки.

Диаграмма направленности одного элемента записывается в виде

$$F_{s,t}^\Sigma(\theta, \varphi) = F(\theta, \varphi - \varphi_s) e^{ikd_z t \cos(\theta)},$$

где $s \in [0, 1, \dots, N-1]$, $t \in (-\infty, +\infty)$.

В общем случае, для создания узконаправленного луча амплитудно-фазовое распределение антенной решетки имеет вид

$$A_{s,t} = a_s e^{-ikb(\varphi_0 - \varphi_s)} a_t e^{-ikd_z t \cos(\theta_0)},$$

где φ_0 , θ_0 – направление фокусировки луча, a_s и a_t – значения амплитуд по осям φ и z соответственно.

Диаграмма направленности антенной решетки равна $F^{общ}(\theta, \varphi) = \sum_{s=0}^{N-1} \sum_{t=-\infty}^{\infty} A_{s,t} F_{s,t}^\Sigma(\theta, \varphi)$.

Сравнение полученных результатов с известными [9] показывает полное совпадение, что свидетельствует о правильности численного алгоритма. Дополнительную проверку метода дает сопоставление с результатами, полученными методом конечных элементов (рисунок 2).

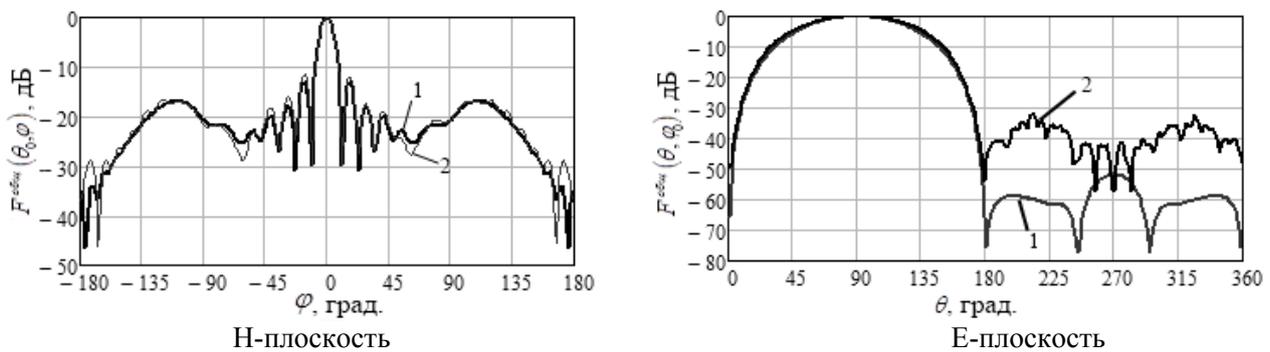


Рисунок 2 – Диаграмма направленности антенной решетки:
1 – расчетная кривая, 2 – метод конечных элементов

Рассчитывалась кольцевая антенная решетка из $N=32$ вертикальных излучателей, при этом возбуждались только 11 из них в секторе углов 120° , с равной амплитудой и требуемой (фазирование в азимутальной плоскости) фазой. Параметры: $d_z=0,7\lambda$, $d_\varphi=0,6\lambda$, $\Delta=\lambda/4$, $w=0,05\lambda$, $L=0,5\lambda$, $h=0,01\lambda$, $Z_l=50$ Ом, $V_{inc}=1$ В.

Анализируя расчетные кривые, видим, что значительные различия в числовых значениях двух методов начинаются с уровня ниже минус 30 дБ. Это объясняется тем, что в предложенной авторами модели не учитываются поперечные токи на полосковом вибраторе, а также сказывается конечность элементарной ячейки при расчете методом конечных элементов.

Заключение. Получены общие выражения для электромагнитного поля, возбуждаемого расположенной над проводящей цилиндрической поверхностью бесконечной фазированной антенной решеткой, состоящей из излучателей в виде произвольных объемных токовых элементов электрического и магнитного типов.

В качестве практического примера рассмотрен частный случай излучателей в виде полосковых вибраторов вертикальной поляризации, для которого получено интегральное уравнение для поверхностных токов и проведено сравнение выходных характеристик с известными результатами. Полученные результаты показывают высокую точность предложенного численного алгоритма.

Литература

1. Вендик, О.Г. Антенны с электронным сканированием / О.Г. Вендик, М.Д. Парнес; под ред. Л.Д. Бахраха. – М. : Сайнс-Пресс, 2001. – 252 с.
2. Шелег, Б. Кольцевая решетка с матричной схемой возбуждения для непрерывного сканирования / Б. Шелег // ТИИЭР. – 1968. – Т. 56. – № 11. – С. 287–298.
3. Воскресенский, Д.И. Выпуклые сканирующие антенны / Д.И. Воскресенский, Л.И. Пономарев, В.С. Филипов. – М. : Сов. радио, 1978. – 304 с.

4. Сазонов, Д.М. Синтез многолучевых кольцевых антенных решеток с полной круговой симметрией / Д.М. Сазонов, Ю.С. Ушаков // Радиотехника и электроника. – 1970. – № 5. – С. 897–904.
5. Мануилов, Б.Д. Алгоритм управления многофункциональными антенными решетками на основе метода парциальных диаграмм / Б.Д. Мануилов, П.Н. Башлы, Ю.Д. Безуглов // Антенны. – 2005. – № 9. – С. 72–77.
6. Munger, A.D. Mutual coupling on a cylindrical array of waveguide elements / A.D. Munger, B.R. Gladman // Transactions on Antennas and Propagation. – 1971. – Vol. 19. – No. 1. – P. 131–134.
7. Gerini, G. Multilayer array antennas with integrated frequency selective surfaces conformal to a circular cylindrical surface / G. Gerini, L. Zapelli // Transactions on Antennas and Propagation. – 2005. – Vol. 53. – № 6. – P. 2020–2030.
8. Мануилов, И.Б. Электродинамический анализ и параметрический синтез многолучевых решеток продольных щелей на круговом цилиндре / И.Б. Мануилов, Б.Д. Мануилов, П.Н. Башлы // Антенны. – 2009. – № 9. – С. 3–11.
9. Herper, J.C. Element pattern of an axial dipole in a cylindrical phased array, Part I : Theory / J.C. Herper, A. Hessel, B. Tomasic // Transactions on Antennas and Propagation. – 1985. – Vol. 33. – No. 3. – P. 259–272.
10. Марков, Г.Т. Возбуждение электромагнитных волн. / Г.Т. Марков, А.Ф. Чаплин. – М. : Радио и связь, 1983. – 296 с.
11. Абрамовиц, М. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и таблицами / М. Абрамовиц, И. Стиган. – М. : «Наука», 1979. – 832 с.
12. Ewald, P. Die Berechnung optischer und elektrostatischer Gitterpotentiale / P. Ewald // Ann. Phys. – 1921. – Vol. 64. – P. 253–287.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 03.11.2014

УДК 539.12

Электромагнитные распады легких векторных мезонов

В.В. АНДРЕЕВ, В.Ю. ГАВРИШ

Представлена методика получения константы радиационного распада мезона с учетом кварковой структуры.

Ключевые слова: лептон, мезон, пуанкаре-инвариантная квантовая механика, волновая функция, кварк.

A technique to obtain constant of radioactive decays of mesons with the quark structure is presented.

Keywords: lepton, meson, Poincare-invariant quantum mechanics, wave functions, quark.

Введение. Радиационные распады векторных мезонов всегда были удобным инструментом для исследования структуры адронов. Существует достаточно большое количество подходов для модельного описания радиационных переходов мезонов. Среди таких подходов наиболее известна КХД на решетке [1], [2]. В нем используется дискретный набор пространственно-временных точек (решетка) для уменьшения количества аналитически неразрешимых функциональных интегралов теории, расчеты которых затем осуществляется на суперкомпьютерах. Хотя это медленный и ресурсоемкий подход, он имеет широкое применение, давая представление о строении адронов, в частности явных сил, действующих между кварками и антикварками в адронах.

В работах [3], [4] представлена техника расчета, основанная на нерелятивистской кварковой модели. В работах [5], [6] используется правила КХД-сумм. Существует ряд работ, основанных на феноменологических подходах [7], [8]. В работах [9], [10] используют релятивистские составные кварковые модели, основанные light-front форме релятивистской гамильтоновой динамики (РГД) (об РГД см. [11]) и квазипотенциальном подходе.

Для сравнения с экспериментом модельных расчетов необходимо получить выражение для ширины распада $V \rightarrow P\gamma$

$$\Gamma = \frac{\alpha}{3} g_{VP\gamma}^2 \left(\frac{M_V^2 - M_P^2}{2M_V} \right)^3, \quad (1)$$

в которое и входит константа радиационного распада $g_{VP\gamma}$. В соотношении (1) α постоянная тонкой структуры, а величины M_V и M_P – массы векторного и псевдоскалярного мезонов соответственно.

Вычисление константы, в отличие от других подходов, проведем в рамках конституентной релятивистской кварковой модели, основанной на точечной форме пуанкаре-инвариантной квантовой механики или релятивистской гамильтоновой динамики. В данной форме РГД операторы 4-х скоростей для системы с взаимодействием и без него совпадают, что приводит к лоренц-инвариантности волновых функций связанных систем.

Межкварковый потенциал взаимодействия, основанный на КХД. Для кварковой модели, основанной на пуанкаре-инвариантной квантовой механики используем потенциал, предложенный в так называемой Моск-модели мезонов [12] с использованием модельной параметризации бегущей константы сильного взаимодействия, модифицированной в [13]

$$\alpha_s(Q^2) = \sum_{k=1}^{n=7} \alpha_k \exp\left[-Q^2/(4\gamma_k^2)\right]. \quad (2)$$

Потенциалы такого типа встречаются с той или иной модификацией и в других моделях [14], [15]. Межкварковый потенциал взаимодействия \hat{V} для модели, основанной на пуанкаре-инвариантной квантовой механики в случае псевдоскалярных и векторных мезонов представляет сумму кулоновской, запирающей и спин-спиновой частей:

$$\begin{aligned}\hat{V}(r) &= \hat{V}_{Coulomb}(r) + \hat{V}_{linear}(r) + \hat{V}_{SS}(r), \\ \hat{V}_{Coulomb}(r) &= -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s(r)}{r} = -\frac{4}{3r} \sum_{k=1}^7 \alpha_k \operatorname{erf}(\tau_k r), \\ \hat{V}_{linear}(r) &= \sigma r \left[\frac{\exp(-b^2 r^2)}{\sqrt{\pi} b r} + \left(1 + \frac{1}{2 b^2 r^2} \right) \operatorname{erf}(b r) \right] + w_0, \\ \hat{V}_{SS}(r) &= -\frac{32 (\mathbf{S}_q \mathbf{S}_Q)}{9 \sqrt{\pi} m_q m_Q} \sum_{k=1}^7 \alpha_k \tau_k^3 \exp(-\tau_k^2 r^2) \delta\end{aligned}\quad (3)$$

где $\mathbf{S}_q, \mathbf{S}_Q$ операторы спинов кварков. Параметр τ_k определяется из соотношения $1/\tau_k^2 = 1/\gamma_k^2 + 1/b^2$, где b так называемый параметр размазки [12].

Параметры межкваркового потенциала. Потенциал модели имеет следующие свободные параметры: параметр натяжения глюонной струны σ , параметр размазки b и параметр w_0 . Также параметрами являются массы кварков m_q и величины α_k, γ_k , характеризующие поведение эффективной константы сильного взаимодействия. Отметим, что значения параметров β, w_0, σ зависят от ароматов кварков.

Параметр линейной части потенциала в большом количестве моделей лежит в пределах $\sigma = 0,18 \div 0,20 \text{ ГэВ}^2$ [12], [16]–[18], поэтому в наших расчетах будем полагать, что

$$\sigma = \bar{\sigma} \pm \Delta\sigma = (0,19 \pm 0,01) \text{ ГэВ}^2. \quad (4)$$

Параметры α_k, γ_k фиксируются исходя из требования, соответствия экспериментальным данным для разницы первых моментов $\Gamma_1^{p,n}(Q^2)$ протонной и нейтронных спиновых структурных функций $g_1^{p,n}(x, Q^2)$ (так называемое КХД-модифицированное правило сумм Бьеркена) [19], [20]

$$\Gamma_1^{p-n}(Q^2) \equiv \Gamma_1^p(Q^2) - \Gamma_1^n(Q^2) = \frac{g_A}{6} C_{NS}(Q^2) + \Delta_{HT}^{p-n}(Q^2). \quad (5)$$

Здесь константа $g_A = 1,2701 \pm 0,0025$ [21] является извекторным аксиальными зарядом, а коэффициенты C_{NS} вычислена в рамках pQCD (в \overline{MS} -схеме) с точностью до четвертого порядка α_s [22]–[25]. В результате коэффициенты α_k, γ_k фиксируются, так что [26]

$$\alpha_{\text{crit}}(Q^2) = \sum_{k=1}^7 \alpha_k = 0,660 \pm 0,007. \quad (6)$$

В работах [27]–[30] получены совпадающие интегральные представления для лептонных констант распадов псевдоскалярных и векторных мезонов f_P, f_V в рамках пуанкаре-ковариантных моделей, основанных на точечной и мгновенных формах РГД:

$$f_P(m_q, m_Q) = \frac{N_c}{\pi \sqrt{2}} \int_0^\infty dk k^2 \psi^P(k) \sqrt{\frac{M_0^2 - (m_q - m_Q)^2}{\omega_{m_q}(k) \omega_{m_Q}(k)}} \frac{(m_q + m_Q)}{M_0^{3/2}}, \quad (7)$$

$$f_V(m_q, m_Q) = \frac{N_c}{\pi\sqrt{2}} \int_0^\infty dk k^2 \psi^V(k) \frac{\sqrt{(\omega_{m_q}(k) + m_q)(\omega_{m_Q}(k) + m_Q)}}{\sqrt{\omega_{m_q}(k) + \omega_{m_Q}(k)} \sqrt{\omega_{m_q}(k) \omega_{m_Q}(k)}} \times \left(1 + \frac{k^2}{3(\omega_{m_q}(k) + m_q)(\omega_{m_Q}(k) + m_Q)} \right), \quad (8)$$

где N_c – число цветов кварков.

Тогда определение остальных параметров потенциала произведем путем решения системы уравнений:

$$M_P(w_0, \varepsilon) = M_P \pm \Delta M_P, \quad (9)$$

$$M_V^{S=1}(w_0, \varepsilon) - M_P^{S=0}(w_0, \varepsilon) = M_V - M_P \pm \delta M_{VP}, \quad (10)$$

$$f_P(m_q, m_Q) = f_{\text{exp}}^P \pm \Delta f_{\text{exp}}^P, \quad (11)$$

$$f_V(m_q, m_Q) = f_{\text{exp}}^V \pm \Delta f_{\text{exp}}^V, \quad (12)$$

где уравнения (9), (10) являются требованием того, чтобы модельные значения масс мезонов соответствовали экспериментальным значениям. Величины $M_{P,V}$ – экспериментальные значения массы псевдоскалярного и векторного мезонов, а $\Delta M_{P,V}$ – экспериментальная ошибка измерения этих масс. Последние два уравнения (11), (12) означают, что значения лептонной константы связи для псевдоскалярных и векторных мезонов, полученные в рамках пуанкаре-ковариантной модели (7)–(8) совпадали в пределах ошибки с экспериментальными значениями f_{exp} .

Таким образом, с учетом вышеизложенной процедуры имеем следующие параметры пуанкаре-ковариантной модели для описания свойств псевдоскалярных и векторных мезонов [26]:

$$\begin{aligned} \sigma &= \bar{\sigma} \pm \Delta\sigma = (0.19 \pm 0.01) \text{ ГэВ}^2, \quad \alpha_{\text{crit.}} = 0.660 \pm 0.007, \\ m_u &= (239.8 \pm 2.3) \text{ МэВ}, \quad m_d = (243.8 \pm 2.3) \text{ МэВ}, \\ m_s &= (466.6 \pm 28.0) \text{ МэВ}, \\ m_c &= (1.366 \pm 0.070) \text{ ГэВ}, \quad m_b = (4.092 \pm 0.180) \text{ ГэВ}. \end{aligned} \quad (13)$$

Остальные параметры потенциала определяются из требования соответствия экспериментальным данным.

Таким образом, основные параметры пуанкаре-ковариантной модели зафиксированы соотношениями (13) и далее рассмотрим расчет характеристик мезонов, не входящих в набор, использованный для ограничения параметров.

Модель электромагнитных распадов мезонов в пуанкаре-инвариантной квантовой механике. Матричный элемент перехода векторного мезона в псевдоскалярный мезон с испусканием виртуального γ^* – кванта может быть параметризован с помощью 4-скоростей V и V' следующим выражением:

$$g_{VP\gamma^*}(t) K^\alpha(\mu) = (2\pi)^3 \frac{\sqrt{4V_0 V'_0}}{\sqrt{M_V M_P}} \langle \bar{Q} | J^\alpha | Q \rangle_V, \quad (14)$$

где введено обозначение $K^\alpha(\mu) = i\varepsilon^{\alpha\nu\rho\sigma} \varepsilon_\nu(\mu) V_\rho V'_\sigma$. Такая параметризация является естественной для точечной формы пуанкаре-инвариантной квантовой механики.

В данной работе будем рассматривать мезоны V и P как релятивистскую составную систему кварка и антикварка в рамках пуанкаре-инвариантной квантовой механики. В таком подходе данный распад обусловлен испусканием кварком γ^* -кванта, входящего в мезон V . Соответствующий данному переходу форм-фактор в обобщенной системе Брейта может быть представлен в виде [31]:

$$\begin{aligned}
g_{VP\gamma^*}(t) = & \frac{1}{4\pi\sqrt{2MM'}} \sum_{\nu_1, \nu_1'} \int d\vec{k} \sqrt{\frac{3+4\nu_1(\mu-\nu_1)}{\omega_{m_q}(k)\omega_{m_{\bar{q}}}(k)}} V_2' \Psi(k) \left[\sqrt{\frac{\omega_{m_{\bar{q}}}(k_2)}{\omega_{m_q}(k_2)}} \Phi(k_2) \times \right. \\
& \times e_q \bar{u}_{\nu_1'}(\vec{k}_2, m_q) B^{-1}(\vec{u}_{\bar{Q}}) \frac{(\Gamma_1^\mu \cdot K_\mu^*)}{(K \cdot K^*)} u_{\nu_1}(\vec{k}, m_q) D_{-\nu_1', \mu-\nu_1}^{1/2}(\vec{n}_{W_2}(\vec{k}, \vec{u}_{\bar{Q}})) + \\
& + \sqrt{\frac{\omega_{m_q}(k_1)}{\omega_{m_{\bar{q}}}(k)\omega_{m_{\bar{q}}}(k_1)\omega_{m_q}(k)}} \Phi(k_1) \times \\
& \left. e_{\bar{Q}} \bar{v}_{\mu-\nu_1}(\vec{k}, m_{\bar{Q}}) \frac{(\Gamma_2^\mu \cdot K_\mu^*)}{(K \cdot K^*)} B(\vec{u}_{\bar{Q}}) v_{-\nu_1}(\vec{k}_1, m_{\bar{Q}}) D_{\nu_1, \nu_1'}^{1/2}(\vec{n}_{W_1}(\vec{k}, \vec{u}_{\bar{Q}})) \right],
\end{aligned} \tag{15}$$

где вершина взаимодействия фотона с кварком определяется в виде

$$\Gamma_{1,2}^\mu = F_1(t)\gamma^\mu + iF_2(t) \frac{\sigma^{\mu\nu}(k_{1,2}-k)^\nu}{2m_{q,Q}}. \tag{16}$$

Входящие форм-факторы кварков нормированы в естественных единицах магнитного μ_q и аномального магнитного момента кварков κ_q :

$$F_1(t=0) + F_2(t=0) = \mu_q, \quad F_2(t=0) = \kappa_q. \tag{17}$$

Входящие в интегральное представление (16) величины определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
\vec{k}_{1,2} = & \vec{k} + \vec{u}_{\bar{Q}}((\varpi+1)\omega_{m_{q,Q}}(k) + \sqrt{\varpi^2-1} \cdot |\vec{k}| \cos\theta), \\
\omega_{m_{q,Q}} = & \varpi\omega_{m_q}(k) - |\vec{k}| \cos\theta \sqrt{\varpi^2-1},
\end{aligned} \tag{18}$$

$$\vec{n}_{W_{2,1}} = - \frac{[\vec{k}, \vec{V}]}{\omega_{m_{q,Q}}(k) + m_{q,Q} - (\vec{k}\vec{V})} \tag{19}$$

$$\varpi = \frac{M_0^2 + M_0'^2 - t}{2M_0M_0'}, \quad M_0 = \omega_{m_q}(k) + \omega_{m_{\bar{q}}}(k), \tag{20}$$

где $t = (P-P')$ квадрат переданного фотону импульса.

Константа радиационного распада $g_{VP\gamma}$ получается предельным переходом $g_{VP\gamma} = g_{VP\gamma^*}(t \rightarrow 0)$. Исходя из экспериментальных данных для легких ρ, K^\pm и K_0 -мезонов (Таблица 1), получим ограничения на аномальные магнитные моменты кварков, представленные в таблице 2.

Таблица 1 – Экспериментальные значения ширины распадов легких мезонов

Мезон	Ширина распада
ρ	68 ± 7 КэВ
K^\pm	50 ± 5 КэВ
K^0	116 ± 10 КэВ

Сравнительный анализ показывает полученные значения в рамках релятивистской кварковой модели, основанной на точечной форме пуанкаре-инвариантной квантовой механики, соотносятся с результатами, полученными из анализа барионных магнитных моментов [32], [33]

Таблица 2 – Магнитные моменты кварков

Кварк	Магнитный момент, μ_N	[32]	[33]
u	2.080 ± 0.082	2.066	2.08 ± 0.07
d	-1.261 ± 0.015	-1.110	-1.31 ± 0.06
s	-0.621 ± 0.011	-0.633	-0.77 ± 0.06

Заключение. В работе в рамках релятивистской кварковой модели, основанной на точечной форме пуанкаре-инвариантной квантовой механики получено интегральное представление для форм-фактора перехода $V \rightarrow P\gamma^*$. Из условия соответствия модельных расчетов ширины распада экспериментальным значениям найдены значения магнитных моментов кварков, которые коррелируют с данными, полученными с помощью экспериментальных значений магнитных моментов барионов.

Литература

1. Jansen, K. Meson masses and decay constants from unquenched lattice QCD / K. Jansen, C. McNeile // *Phys.Rev.* – 2009. – D 80. – P. 1–36.
2. Lin, H.W. Neutral meson decays into two photons from lattice QCD / H.W. Lin, S.D. Cohen // *Proceedings of science* – 2012. – P. 1–8.
3. Morpurgo, G. General parametrization of the V-P meson decays / G. Morpurgo // *Phys.Rev.* – 1990. – D 42. – P. 1–12.
4. Stanley, D. Nonperturbative potential model for light and heavy quark-antiquark systems / D. Stanley, D. Robson // *Phys.Rev.* – 1980. – D 21. – P. 1–17.
5. Audin, C. gV γ coupling constant in light cone QCD / C. Audin, F. Keskin // *Phys.Rev.* – 2011. – D 84. – P. 1–7.
6. Shifman, M. QCD and resonance physics. Theoretical foundations / M.A. Shifman, A.I. Vainshtein // *Nuclear Physics.* – 1979. – B 147 – P. 385–447.
7. Escribano, R. Phenomenological evidence for the energy dependence of the eta eta-prime mixing angle / R. Escribano, J. Frere // *Phys. Lett.* – 1999. – B 459. – P. 288–294.
8. Shore, G. Radiative eta-prime decays, the topological susceptibility and the Witten-Veneziano mass formula / G. Shore // *Nucl.Phys.* – 2000. – B 569. – P. 107–124.
9. Jaus, W. Relativistic constituent quark model of electroweak properties of light mesons / W. Jaus // *Phys. Rev.* – 1991. – Vol. D 44. – P. 2851–2859.
10. Ebert, D. Radiative M1 decays of heavy light mesons in the relativistic quark model / D. Ebert, R. Faustov, V. Galkin // *Phys.Lett.* – 2002. – Vol. B 537. – P. 241–248.
11. Keister, B.D. Relativistic Hamiltonian dynamics in nuclear and particle physics / B.D. Keister, W.N. Polyzou // *Advanced Nuclear Physics.* – 1991. – V. 20 – P. 225–479.
12. Godfrey, S. Mesons in a relativized quark model with chromodynamics / S. Godfrey, N. Isgur // *Phys. Rev.* – 1985. – Vol. D 32. – P. 189–231.
13. Andreev, V.V. QCD coupling constant below 1 GeV in the Poincare-covariant model / V.V. Andreev // *Physics of Particles and Nuclei Letters.* – 2011. – Vol. 8, N 4. – P. 347–355.
14. Jean, H.C. Relativistic quark – anti-quark bound state problem with spin dependent interactions in momentum space / H.C. Jean, D. Robson, A.G. Williams // *Phys. Rev.* – 1994. – Vol. D 50. – P. 5873–5877.
15. Lucha, W. Semirelativistic treatment of bound states / W. Lucha, F.F. Schoberl // *Int. J. Mod. Phys.* – 1999. – Vol. A 14. – P. 2309–2334.
16. Ebert, D. Quark-antiquark potential with retardation and radiative contributions and the heavy quarkonium mass spectra / D. Ebert, R.N. Faustov, V.O. Galkin // *Phys. Rev.* – 2000. – Vol. D 62. – P. 034014.
17. Полулептонные распады псевдоскалярных мезонов в мгновенной форме релятивистской гамильтоновой динамики / Е.В. Баландина, А.Ф. Крутов, В.Е. Троицкий, О.И. Шпро // *ЯФ.* – 2000. – Т. 63, 2. – С. 301–311.
18. Kalashnikova, Y.S. QCD string in light-light and heavy-light mesons / Y.S. Kalashnikova, A.V. Nefediev, Y.A. Simonov // *Phys. Rev.* – 2001. – Vol. D 64. – P. 014037.
19. Bjorken, J. Applications of the Chiral U(6) x (6) Algebra of Current Densities / J. Bjorken // *Phys.Rev.* – 1966. – Vol. 148. – P. 1467–1478.
20. Bjorken, J. Inelastic Scattering of Polarized Leptons from Polarized Nucleons / J. Bjorken // *Phys.Rev.* – 1970. – Vol. D 1. – P. 1376–1379.
21. Leader, E. Can the polarization of the strange quarks in the proton be positive? / E. Leader, D.B. Stamenov // *Phys.Rev.* – 2003. – Vol. D 67. – P. 037503.
22. Larin, S. The Next-to-leading QCD approximation to the Ellis-Jaffe sum rule / S. Larin // *Phys.Lett.* – 1994. – Vol. B334. – P. 192–198.
23. Kataev, A. The Ellis-Jaffe sum rule : The Estimates of the next to next-to-leading order QCD corrections / A. Kataev // *Phys.Rev.* – 1994. – Vol. D 50. – P. 5469–R5472.

24. Larin, S. The Alpha-s**3 approximation of quantum chromodynamics to the Ellis-Jaffe sum rule / S. Larin, T. van Ritbergen, J. Vermaseren // *Phys.Lett.* – 1997. – Vol. B 404. – P. 153–160.
25. Baikov, P. Adler Function, Bjorken Sum Rule, and the Crewther Relation to α_s^4 in a General Gauge Theory / P. Baikov, K. Chetyrkin, J. Kuhn // *Phys.Rev.Lett.* – 2010. – Vol. 104. – P. 132004.
26. Andreev, V.V. Nonperturbative region of effective strong coupling [Electronic resource] / V.V. Andreev. – 2013. – Mode of access : <http://arxiv.org/pdf/hep-ph 1305.4266>. – Date of access : 14.01.2014.
27. Андреев, В.В. Описание лептонных распадов в рамках пуанкаре-ковариантной кварковой модели / В.В. Андреев // *Весті НАН Беларусі, Сер.фіз.-мат. навук.* – 2000. – № 2. – С. 93–98.
28. Андреев, В.В. Комптоновская поляризуемость каонов в релятивистской гамильтоновой динамике / В.В. Андреев, А.Ф. Крутов // *Вестник Самарского Государственного Университета, Естественно-научная серия. Специальный выпуск.* – 2004. – С. 111–127.
29. Крутов, А.Ф. Электрослабые свойства легких мезонов в релятивистской модели составных кварков / А.Ф. Крутов // *ЯФ.* – 1997. – Т. 60, № 8. – С. 1442–1450.
30. Крутов, А.Ф. Построение формфакторов составных систем с помощью обобщенной теоремы Вигнера-Экарта для группы Пуанкаре / А.Ф. Крутов, В.Е. Троицкий // *Теоретическая и математическая физика.* – 2005. – Т. 143, № 2. – С. 258–277.
31. Андреев, В.В. Константа радиационного распада векторного мезона в пуанкаре-инвариантной квантовой механике / В.В. Андреев, В.Ю. Гавриш // *Известия ГГУ им. Ф. Скорины.* – 2013. – № 6 (81). – С. 162–166.
32. Bijker, R. Unquenched quark model for baryons : Magnetic moments, spins and orbital angular momenta / R. Bijker, E. Santopinto // *Phys.Rev.* – 2009. – Vol. C 80. – P. 065210.
33. Dothan, Y. Quark magnetic moments / Y. Dothan // *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications.* – 1982. – Vol. 114, № 1–3. – P. 216–220.

Релятивистское обобщение корнелльского потенциала: непертурбативная часть

К.С. БАБИЧ, В.В. АНДРЕЕВ¹, А.С. КУРИЛИН²

Получена непертурбативная часть ядра интегрального радиального уравнения движения релятивистской кварк-антикварковой системы с корнелльским потенциалом.

Ключевые слова: корнелльский потенциал, кварк, релятивистская гамильтонова динамика, интегральное уравнение, базисные спиноры.

Radial kernel of the integral equation of motion of a relativistic quark-antiquark system based on non-perturbation part of the Cornell potential is calculated.

Keywords: Cornell potential, quark, relativistic Hamiltonian dynamics, integral equation, basis spinors.

Введение. При описании мезона, как системы из кварка и антикварка с конституэнтными массами m_q и m_Q широко используется корнелльский потенциал, который включает кулоновскую и линейную (запирающую) части:

$$\hat{V}(r) = -\frac{4\alpha_s}{3r} + \sigma r + w, \quad r = |\mathbf{r}|, \quad (1)$$

где σ , w – модельные параметры, α_s – константа сильной связи в квантовой хромодинамике (КХД). Такой потенциал удовлетворяет требованию конфинмента кварков и был широко использован при расчетах спектров тяжелых мезонов [1], [2].

Расчет потенциала, как правило, делается в рамках теории возмущений, которая не всегда приемлема, если возникает необходимость учесть непертурбативные эффекты. На практике это приводит к тому, что выражение, полученное с помощью амплитуды рассеяния модифицируется тем или иным способом, поэтому потенциал, основанный на амплитуде рассеяния, всегда будет некоторым эффективным потенциалом. Такая особенность характерна для любой модели [3]–[5], описывающей релятивистские связанные системы, и модели, основанные на использовании релятивистской гамильтоновой динамики (РГД), не являются исключением.

Для описания релятивистских эффектов, а также для систем с легкими кварками (u, d и s) необходимо релятивистское обобщение потенциала (1). Такое обобщение зависит от модели, используемой для описания свойств релятивистских систем.

1. Радиальное уравнение. Радиальное уравнение для двухчастичного связанного состояния в системе центра инерции (с.ц.и.) ($\mathbf{P} = 0$) имеет вид [6]

$$\sum_{\ell, S} \int_0^\infty V_{\ell, S'; \ell, S}^J(k', k) \Phi_{\ell, S'}^{J\mu}(k') k'^2 dk' = \left(M_\psi - \sqrt{\mathbf{k}^2 + m_q^2} - \sqrt{\mathbf{k}^2 + m_Q^2} \right) \Phi_{\ell, S}^{J\mu}(k). \quad (2)$$

В пуанкаре-ковариантной кварковой модели, основанной на РГД, «создание» релятивистской связанной системы начинают с построения двухчастичной системы кварков с импульсами \mathbf{p}_1 , \mathbf{p}_2 и массами m_q и m_Q , которая описывается с использованием унитарных представлений группы Пуанкаре. Затем вводят взаимодействие \hat{V} таким образом, чтобы выполнялось требование пуанкаре-инвариантности и для системы взаимодействующих частиц, реализуемое в виде алгебры Пуанкаре на множестве динамических наблюдаемых системы. Это приводит к тому, что релятивистская гамильтонова динамика, как и обычная нерелятивистская квантовая механика, сохраняет вероятностную интерпретацию, а отличается тем, что генераторы преобразований, из которых строятся операторы наблюдаемых величин полного коммутирующего набора, подчиняются алгебре группы Пуанкаре, а не группе Галилея.

Импульсы кварков $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ могут быть преобразованы к общему импульсу \mathbf{P} и относительному импульсу \mathbf{k} для облегчения разделения в системе центра масс:

$$\mathbf{P} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2, \quad (3)$$

$$\mathbf{k} = \frac{1}{2}(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2) + \frac{\mathbf{P}}{\widetilde{M}_0(\omega_{\widetilde{M}_0}(P) + \widetilde{M}_0)} \left(m_Q^2 - m_q^2 - \widetilde{M}_0 [\omega_{m_Q}(p_2) - \omega_{m_q}(p_1)] \right), \quad (4)$$

где

$$\widetilde{M}_0 = \sqrt{[\omega_{m_Q}(p_2) + \omega_{m_q}(p_1)]^2 - \mathbf{P}^2}.$$

которая представляет инвариантную массу двух невзаимодействующих кварков, а функция $\omega_m(p) = \sqrt{m^2 + \mathbf{p}^2}$.

Оператор массы M для связанной системы Ψ с импульсом \mathbf{Q} , спином J и проекцией спина μ является суммой оператора $M_0 = \omega_{m_q}(k) + \omega_{m_Q}(k)$ и феноменологического запирающего потенциала V . Задача о собственных значениях для массового оператора может быть записана следующим образом [7]:

$$\hat{M} |\Psi_{\mathbf{Q}, J, \mu}\rangle \equiv (M_0 + \hat{V}) |\Psi_{\mathbf{Q}, J, \mu}\rangle = M_\Psi |\Psi_{\mathbf{Q}, J, \mu}\rangle. \quad (5)$$

Здесь M_Ψ представляет массу частицы со спином J .

Волновая функция (ВФ) связанной системы спинорных кварков в РГД удовлетворяет в общем случае трехмерному интегральному уравнению [7]:

$$\begin{aligned} \sum_{\lambda_1, \lambda_2} \int \langle \mathbf{k}, \sigma_1, \sigma_2 \| \hat{V} \| \mathbf{k}', \lambda_1, \lambda_2 \rangle \Phi_{\mathbf{Q}; \lambda_1 \lambda_2}^{J\mu}(\mathbf{k}') d\mathbf{k}' = \\ = \left(M_\Psi - \sqrt{\mathbf{k}^2 + m_q^2} - \sqrt{\mathbf{k}^2 + m_Q^2} \right) \Phi_{\mathbf{Q}; \sigma_1 \sigma_2}^{J\mu}(\mathbf{k}) \end{aligned} \quad (6)$$

с редуцированным матричным элементом:

$$\langle \mathbf{P}, \mathbf{k}, \sigma_1, \sigma_2 \| \hat{V} \| \mathbf{P}', \mathbf{k}', \lambda_1, \lambda_2 \rangle = \delta(\mathbf{P} - \mathbf{P}') \langle \mathbf{k}, \sigma_1, \sigma_2 \| \hat{V} \| \mathbf{k}', \lambda_1, \lambda_2 \rangle. \quad (7)$$

Для получения одномерного радиального уравнения используют разложение Клебша-Гордана группы Пуанкаре. Поскольку для численного расчета ядра удобно использовать спиральные состояния кварков, а для классификации связанных состояний используют, как правило, орбитальный момент L , полный спин S и полный момент количества движения J , вычисление ядра выполним в два этапа. На первом этапе, в системе центра инерции $\mathbf{Q} = 0$, строятся состояния с квантовыми числами J, μ и со спиральностями кварков λ_1, λ_2 , которые формируют базис неприводимого двухчастичного пространства группы Пуанкаре – $|\mathbf{Q} = 0, J, \mu, k, \lambda_1, \lambda_2\rangle$. На втором этапе с помощью коэффициентов Клебша-Гордана группы вращений $C_{\lambda_1 - \lambda_2 \lambda}^{1/2 \ 1/2 \ S}$ и $C_{0 \lambda \lambda}^{L \ S \ J}$ получают базис состояний с квантовыми числами J, μ, L, S :

$$|k, J, \mu, L, S\rangle = \sum_{\lambda_1, \lambda_2} \sqrt{\frac{2L+1}{2J+1}} C_{\lambda_1 - \lambda_2 \lambda}^{1/2 \ 1/2 \ S} C_{0 \lambda \lambda}^{L \ S \ J} |k, J, \mu, \lambda_1, \lambda_2\rangle. \quad (8)$$

Такая схема вычислений была использована для расчета амплитуд однобозонного обмена нуклон-нуклонного рассеяния. Заметим что так как спин кварков равен $1/2$, то полный спин связанной системы будет равен 0 или 1, что соответствует синглетному $S = 0$ и триплетному состоянию $S = 1$ соответственно.

Радиальное уравнение для двухчастичного связанного состояния в системе центра инерции имеет вид

$$\sum_{L, S} \int_0^\infty V_{L, S; L, S}^J(k, k') \Phi_{L, S}^{J\mu}(k') k'^2 dk' = (M_\Psi - M_0) \Phi_{L, S}^{J\mu}(k), \quad (9)$$

где соответствующий оператор $V_{L',S';L,S}^J(k',k) = \langle k', J, \mu, L', S' \| \hat{V} \| k, J, \mu, L, S \rangle$ потенциала системы кварк-антикварк определяется соотношением

$$V_{L',S';L,S}^J(k',k) = \frac{\sqrt{(2L+1)(2L'+1)}}{2J+1} \sum_{\lambda_1, \lambda_2, \lambda'_1, \lambda'_2} C_{\lambda_1 - \lambda_2 \lambda}^{1/2 \ 1/2 \ S} C_{0 \lambda \lambda}^{L \ S \ J} C_{\lambda'_1 - \lambda'_2 \lambda'}^{1/2 \ 1/2 \ S'} C_{0 \lambda' \lambda'}^{L' \ S' \ J'} \langle k', J, \mu, \lambda'_1, \lambda'_2 \| \hat{V} \| k, J, \mu, \lambda_1, \lambda_2 \rangle, \quad (10)$$

а матричный элемент $\langle k', J', \mu', \lambda'_1, \lambda'_2 \| \hat{V} \| k, J, \mu, \lambda_1, \lambda_2 \rangle$ связан с матричным элементом $\langle \mathbf{k}', \lambda'_1, \lambda'_2 \| \hat{V} \| \mathbf{k}, \lambda_1, \lambda_2 \rangle$ посредством разложения Джакоба-Вика

$$\langle k', J', \mu', \lambda'_1, \lambda'_2 \| \hat{V} \| k, J, \mu, \lambda_1, \lambda_2 \rangle = \frac{\sqrt{(2J+1)(2J'+1)}}{4\pi} \int d^2 \hat{\mathbf{k}} d^2 \hat{\mathbf{k}}' D_{\mu' \lambda'}^{J'}(\phi_k, \theta_k, -\phi_k) D_{\mu \lambda}^{*J}(\phi_k, \theta_k, -\phi_k) \langle \mathbf{k}', \lambda'_1, \lambda'_2 \| \hat{V} \| \mathbf{k}, \lambda_1, \lambda_2 \rangle, \quad (11)$$

с $\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$. Функция $D_{\mu \lambda}^J(\phi_k, \theta_k, -\phi_k)$ задает матрицы неприводимого представления группы $SU(2)$ индекса J . Явный вид матрицы D определяется через сферические углы вектора относительного движения $\hat{\mathbf{k}} = \{\sin \theta_k \cos \phi_k, \sin \theta_k \sin \phi_k, \cos \theta_k\}$.

Использование теоремы Вигнера-Экарта приводит к упрощению соотношения (11):

$$\langle k', J', \mu' \lambda'_1, \lambda'_2 \| \hat{V} \| k, J, \mu, \lambda_1, \lambda_2 \rangle = \delta_{J,J'} \delta_{\mu,\mu'} V_{\lambda'_1, \lambda'_2; \lambda_1, \lambda_2}^J(k', k),$$

$$V_{\lambda'_1, \lambda'_2; \lambda_1, \lambda_2}^J(k', k) = \int_{-1}^1 d(\cos \beta) \int_0^{2\pi} d\phi D_{\lambda, \lambda'}^J(\phi, \beta, -\phi) \langle \mathbf{k}', \lambda'_1, \lambda'_2 \| \hat{V} \| \mathbf{k}, \lambda_1, \lambda_2 \rangle, \quad (12)$$

где

$$\cos \beta = (\mathbf{k} \mathbf{k}') / (|\mathbf{k}| |\mathbf{k}'|) = \cos \theta_k \cos \theta_{k'} + \cos(\phi_k - \phi_{k'}) \sin \theta_k \sin \theta_{k'}. \quad (13)$$

Здесь и далее для $\lambda_{1,2}$ будем использовать удвоенное значение спиральностей кварков т. е. $\lambda_{1,2} = \pm 1$.

Цель данной работы – получить непертурбативную часть ядра, которое входит в радиальное уравнение (2), и построить таким образом релятивистское КХД–мотивированное ядро радиального уравнения кваркония для произвольного момента количества движения J , пертурбативную часть которого мы нашли ранее в работе [7].

Характерной особенностью наших вычислений будет использование только импульсного пространства, поскольку в релятивистском случае оно возникает естественным образом.

2. Дальнодействующий потенциал. Получение дальнодействующей (запирающей) составляющей межкваркового потенциала можно провести исходя из анализа лоренц-структуры потенциала и экспериментальных данных по спектру масс мезонов. Анализ приводит к тому, что в общем случае, имеется скалярная и векторная часть запирающего потенциала, а вкладами псевдоскалярной и аксиально-векторной частями пренебрегаем. Так же, как и в работе [8], предположим, что кварки обладают аномальным хромодинамическим моментом κ .

Непертурбативная часть межкваркового потенциала, определяется как сумма векторной ($\sim K_V(q^2)$) и скалярной ($\sim K_S(q^2)$) запирающих частей [9]

$$\langle \mathbf{k}', \lambda_{p_1}, \lambda_{p_2} \| \hat{V}_{conf} \| \mathbf{k}, \lambda_{k_1}, \lambda_{k_2} \rangle = \frac{N_{k,k'}}{4(2\pi)^3}$$

$$\left[K_V(q^2) \bar{u}_{\lambda_{p_1}}(p_1) \left(\gamma_\mu + \frac{i\kappa_q}{2m_q} \sigma_{\mu\nu} (p_1 - k_1)^\nu \right) u_{\lambda_{k_1}}(k_1) \right]$$

$$\begin{aligned} & \bar{v}_{\lambda_{k_2}}(k_2) \left(\gamma^\mu + \frac{i\kappa_Q}{2m_Q} \sigma^{\mu\nu} (k_2 - p_2)_\nu \right) v_{\lambda_{p_2}}(p_2) + \\ & + K_S(q^2) \bar{u}_{\lambda_{p_1}}(p_1) u_{\lambda_{k_1}}(k_1) \bar{v}_{\lambda_{k_2}}(k_2) v_{\lambda_{p_2}}(p_2) \Big], \end{aligned} \quad (14)$$

где

$$K_V(q^2) = \frac{8\pi A_V}{\mathbf{q}^4} + \delta(\mathbf{k}' - \mathbf{k}) B_V(k), \quad K_S(q^2) = -\frac{8\pi A_S}{\mathbf{q}^4} + \delta(\mathbf{k}' - \mathbf{k}) B_S(k). \quad (15)$$

Используя тождество Гордона, векторная часть соотношения (14) может быть записана в виде

$$\begin{aligned} & \bar{u}_{\lambda_{p_1}}(p_1) \left(\gamma_\mu + \frac{i\kappa_q}{2m_q} \sigma_{\mu\nu} (p_1 - k_1)^\nu \right) u_{\lambda_{k_1}}(k_1) \\ & \bar{v}_{\lambda_{k_2}}(k_2) \left(\gamma^\mu + \frac{i\kappa_Q}{2m_Q} \sigma^{\mu\nu} (p_2 - k_2)_\nu \right) v_{\lambda_{p_2}}(p_2) = \\ & = (1 + \kappa_q) (1 - \kappa_Q) \bar{u}_{\lambda_{p_1}}(p_1) \gamma_\mu u_{\lambda_{k_1}}(k_1) \bar{v}_{\lambda_{k_2}}(k_2) \gamma^\mu v_{\lambda_{p_2}}(p_2) + \\ & + \frac{\kappa_q \kappa_Q}{4m_q m_Q} (p_1 + k_1)^\nu (p_2 + k_2)_\nu \bar{u}_{\lambda_{p_1}}(p_1) u_{\lambda_{k_1}}(k_1) \bar{v}_{\lambda_{k_2}}(k_2) v_{\lambda_{p_2}}(p_2) - \\ & - \frac{\kappa_q (1 - \kappa_Q)}{2m_q} \bar{u}_{\lambda_{p_1}}(p_1) u_{\lambda_{k_1}}(k_1) \bar{v}_{\lambda_{k_2}}(k_2) (\hat{p}_1 + \hat{k}_1) v_{\lambda_{p_2}}(p_2) - \\ & - \frac{\kappa_Q (1 + \kappa_q)}{2m_Q} \bar{u}_{\lambda_{p_1}}(p_1) (\hat{p}_2 + \hat{k}_2) u_{\lambda_{k_1}}(k_1) \bar{v}_{\lambda_{k_2}}(k_2) v_{\lambda_{p_2}}(p_2). \end{aligned} \quad (16)$$

Расчет $\langle k', J, \lambda'_1, \lambda'_2 \parallel \hat{V} \parallel k, J, \lambda_1, \lambda_2 \rangle$ (12), посредством которого определяется ядро интегрального уравнения (2), проведем в два этапа. Сначала вычислим спинорную часть потенциала $\langle \mathbf{k}', \lambda'_1, \lambda'_2 \parallel \hat{V} \parallel \mathbf{k}, \lambda_1, \lambda_2 \rangle$, а затем проведем интегрирование по угловым переменным.

Спинорную часть потенциала (14) рассчитаем с помощью метода базисных спиноров [10], [11]. В данном подходе фермионная цепочка с оператором Q , который выражается через комбинацию матриц Дирака, может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} & \bar{u}_{\lambda_p}(p, s_p) Q u_{\lambda_k}(k, s_k) = \sum_{\sigma, \rho = -1}^1 \sum_{A, C = -1}^1 \bar{u}_{\lambda_p}(p, s_p) u_{-\sigma}(b_{-C}) \times \\ & \quad \left\{ \bar{u}_{\sigma}(b_C) Q u_{-\rho}(b_{-A}) \right\} \bar{u}_{\rho}(b_A) u_{\lambda_k}(k, s_k) \\ & = \sum_{\sigma, \rho = -1}^1 \sum_{A, C = -1}^1 \bar{s}_{\lambda_p, \sigma}^{(C, 1)}(p) \Gamma_{\sigma, \rho}^{C, A}[Q] s_{\rho, \lambda_k}^{(A, 1)}(k), \quad (\sigma, \rho, C, A = \pm 1), \end{aligned} \quad (17)$$

где коэффициенты разложения по базисным спинорам $s_{\rho, \lambda_k}^{(A, B)}(k)$ для спиральных состояний определены посредством соотношений ($B = 1$ соответствует фермиону, а $B = -1$ антифермиону):

$$s_{\rho, \lambda_k}^{(A, B)}(k) = f_{\lambda, \rho}^B D_{A \rho/2, -B \lambda_k/2}^{*1/2}(\phi_k, \theta_k, \phi_k) W_{m_k}(-B \rho \lambda_k \times k), \quad (18)$$

$$f_{\lambda, \rho}^B = \delta_{B, 1} \lambda + \delta_{B, -1} \rho \quad (19)$$

с вспомогательной функцией

$$W_{m_k}(\pm k) = \sqrt{\omega_{m_k}(k) \pm k}, \quad k^2 = \omega_{m_k}^2(k) - |\mathbf{k}|^2 = m_k^2. \quad (20)$$

Конструкция $\Gamma(Q)$ для произведения матриц Дирака Q

$$\Gamma_{\sigma, \rho}^{C, A}(Q) \equiv \bar{u}_{\sigma}(b_C) Q u_{-\rho}(b_{-A}) \quad (21)$$

вычисляется через 4-вектора b_A и n_λ ($A, C, \rho, \sigma = \pm 1$) посредством соотношений [10], [11]:

$$\begin{aligned} \gamma^\mu u_\rho(b_A) &= 2 b_A^\mu u_{-\rho}(b_{-A}) - 2 A n_{-A \times \rho}^\mu u_{-\rho}(b_A), \\ \gamma_5 u_\rho(b_A) &= \rho u_\rho(b_A), \quad \bar{u}_\sigma(b_C) u_\rho(b_A) = \delta_{\sigma, -\rho} \delta_{C, -A}. \end{aligned} \quad (22)$$

Векторы b_A и n_λ образуют изотропную тетраду пространства Минковского

$$b_A = 1/2(l_0 + A l_3), n_\lambda = 1/2(\lambda l_1 + i l_2), \quad A, \lambda = \pm 1, \quad (23)$$

где 4-векторы l_A ($A = 0, 1, 2, 3$) определяют ортонормальный базис данного пространства с метрическим тензором g т. е. $(l_A l_B) = g_{AB}$.

Заметим, что коэффициенты разложения строятся таким образом, чтобы закон преобразования двухчастичного состояния соответствовал группе Пуанкаре. Это дает возможность применить теорему Вигнера-Экарта для матричных элементов, определяющих потенциал.

Получим, что релятивистский матричный элемент $V_{\lambda'_1, \lambda'_2; \lambda_1, \lambda_2}^J(k', k)$ представляет сумму вида

$$\begin{aligned} V_{\lambda_{p_1}, \lambda_{p_2}; \lambda_{k_1}, \lambda_{k_2}}^J(k', k) &= V_I^J(k', k) + \frac{\kappa_q \kappa_Q}{4m_q m_Q} V_{II}^J(k', k) - \\ &- \frac{\kappa_q (1 - \kappa_Q)}{2m_q} V_{III}^J(k', k) - \frac{\kappa_Q (1 + \kappa_q)}{2m_Q} V_{IV}^J(k', k) + V_S^J(k', k), \end{aligned} \quad (24)$$

где слагаемые имеют вид:

$$\begin{aligned} V_{\lambda_{k_1}, \lambda_{k_2}, \lambda_{p_1}, \lambda_{p_2}}^I &= 2 \sum_{\sigma, \rho = -1}^1 W_{-\sigma \lambda_{k_1}, \rho \lambda_{k_2}}(k) W_{-\sigma \lambda_{p_1}, \rho \lambda_{p_2}}(k') [\delta_{\lambda_{k_1}, \lambda_{k_2}} \rho \sigma \times \\ &\times G_{-\lambda_{k_1}, \lambda_{k_1}; \lambda_{p_1}, -\lambda_{p_2}}^{J, 1/2, 1/2} [\tilde{R}_L^{(I)}(k, k')] + \delta_{\rho \lambda_{k_1}, -\sigma \lambda_{k_2}} G_{\lambda_{k_1}, -\lambda_{k_2}; \lambda_{p_1}, -\lambda_{p_2}}^{J, 1/2, 1/2} [\tilde{R}_L^{(I)}(k, k')]], \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} V_{\lambda_{k_1}, \lambda_{k_2}, \lambda_{p_1}, \lambda_{p_2}}^{II} &= \sum_{\sigma, \rho = -1}^1 W_{-\sigma \lambda_{k_1}, -\rho \lambda_{k_2}}(k) W_{\sigma \lambda_{p_1}, \rho \lambda_{p_2}}(k') \times \\ &\times [(k'^2 + k^2 + (\omega_{m_1}(k) + \omega_{m_1}(k'))(\omega_{m_2}(k) + \omega_{m_2}(k')))] \times \\ &\times G_{\lambda_{k_1}, -\lambda_{k_2}; \lambda_{p_1}, -\lambda_{p_2}}^{J, 1/2, 1/2} [\tilde{R}^{(II)}(k', k)] + 2k k' G_{\lambda_{k_1}, -\lambda_{k_2}; \lambda_{p_1}, -\lambda_{p_2}}^{J, 1/2, 1/2} [\tilde{Z}^{(II)}(k', k)], \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} V_{\lambda_{k_1}, \lambda_{k_2}, \lambda_{p_1}, \lambda_{p_2}}^{III} &= \frac{1}{3} \sum_{\sigma, \rho = -1}^1 W_{-\sigma \lambda_{k_1}, \rho \lambda_{k_2}}(k) W_{\sigma \lambda_{p_1}, \rho \lambda_{p_2}}(k') [k' \rho \lambda_{k_2} \times \\ &\times (3 G_{\lambda_{k_1}, -\lambda_{k_2}; \lambda_{p_1}, -\lambda_{p_2}}^{J, 1/2, 1/2} [\tilde{Z}^{(III)}(k', k)] - 2 G_{\lambda_{k_1}, -\lambda_{k_2}; \lambda_{p_1}, -\lambda_{p_2}}^{J, 1/2, 3/2} [\tilde{R}^{(III)}(k', k)]) + \\ &+ G_{\lambda_{k_1}, -\lambda_{k_2}; \lambda_{p_1}, -\lambda_{p_2}}^{J, 1/2, 1/2} [\tilde{R}^{(III)}(k', k)] \{ \rho (3\lambda_{k_2} k + 2\lambda_{p_2} k') + 3(\omega_{m_1}(k) + \omega_{m_1}(k')) \}], \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} V_{\lambda_{k_1}, \lambda_{k_2}, \lambda_{p_1}, \lambda_{p_2}}^{IV} &= \frac{1}{3} \sum_{\sigma, \rho = -1}^1 W_{-\sigma \lambda_{k_1}, -\rho \lambda_{k_2}}(k) W_{-\sigma \lambda_{p_1}, \rho \lambda_{p_2}}(k') \times \\ &\times [k' \sigma \lambda_{k_1} (3 G_{\lambda_{k_1}, -\lambda_{k_2}; \lambda_{p_1}, -\lambda_{p_2}}^{J, 1/2, 1/2} [\tilde{Z}^{(IV)}(k', k)] - 2 G_{\lambda_{k_1}, -\lambda_{k_2}; \lambda_{p_1}, -\lambda_{p_2}}^{J, 3/2, 1/2} [\tilde{R}^{(IV)}(k', k)]) + \\ &+ G_{\lambda_{k_1}, -\lambda_{k_2}; \lambda_{p_1}, -\lambda_{p_2}}^{J, 1/2, 1/2} [\tilde{R}^{(IV)}(k', k)] \{ \sigma (3\lambda_{k_1} k + 2\lambda_{p_1} k') - 3(\omega_{m_2}(k) + \omega_{m_2}(k')) \}], \end{aligned} \quad (28)$$

где дополнительная функция \tilde{Z} задается формулой

$$\tilde{Z}_L(k', k) = \frac{1}{2L+1} [(L+1) \tilde{R}_{L+1}(k', k) + L \tilde{R}_{L-1}(k', k)], \quad (29)$$

а функция $G_{\lambda_{k_1}, \lambda_{k_2}; \lambda_{p_1}, \lambda_{p_2}}^{J, s_1, s_2} [\Phi(x)]$ уравнением

$$G_{\lambda_{k_1}, \lambda_{k_2}; \lambda_{p_1}, \lambda_{p_2}}^{J, s_1, s_2} [\Phi(x)] = \sum_{s=|s_1-s_2|}^{s_1+s_2} \sum_{\ell=|J-s|}^{J+s} \frac{(2\ell+1)}{(2J+1)} C_{\lambda_{k_1}/2, -\lambda_{k_2}/2, \lambda}^{s_1, s_2, s} \times \\ \times C_{\lambda_{p_1}/2, -\lambda_{p_2}/2, \lambda}^{s_1, s_2, s} C_{0, \lambda, \lambda}^{\ell, S, J}; C_{0, \lambda', \lambda'}^{\ell, S, J} \Phi_{\ell}(x), \quad (30)$$

Скалярная часть запирающего потенциала имеет вид:

$$V_S^J(k, k') = -G_{\lambda_{k_1}, -\lambda_{k_2}; \lambda_{p_1}, -\lambda_{p_2}}^{J, 1/2, 1/2} [\tilde{R}^{(S)}(k', k)] \sum_{\sigma, \rho=-1}^1 W_{-\sigma\lambda_{k_1}, -\rho\lambda_{k_2}}(k) W_{\sigma\lambda_{p_1}, \rho\lambda_{p_2}}(k'), \quad (31)$$

Функции $\tilde{R}_{\ell}(k', k)$, входящие в уравнения (25)–(29), выражаются однотипно в виде одномерных интегралов от $K_V(q^2)$ либо $K_S(q^2)$ в виде:

$$\tilde{R}_{\ell}(k', k) = \int_{-1}^1 \frac{K_V(q^2) P_{\ell}(x)}{q^4} dx, \quad (32)$$

Заключение. В работе получено ядро непертурбативной части потенциала для релятивистского радиального уравнения системы кварк-антикварк с произвольным полным моментом J , спиновым моментом $S = 0, 1$ и неравными массами.

С учетом расчетов, проведенных в [7] получено релятивистское ядро уравнения кварк-антикварковой системы с учетом аномальных хромодинамических моментов кварков. В дальнейшем авторы планируют определить параметры (векторной ($\sim K_V(q^2)$) и скалярной ($\sim K_S(q^2)$) частей) на основе современных экспериментальных данных.

Знание этой части ядра позволит удовлетворить требованию запираения кварков и далее перейти к процедуре численного решения радиального уравнения с ядром, содержащим пертурбативную и непертурбативную части для получения спектра масс кваркония.

Литература

1. Charmonium : comparison with experiment / E. Eichten, K. Gottfried, T. Kinoshita [et al.] // Phys.Rev. – 1980. – Vol. D 21. – P. 203.
2. Spectrum of Charmed Quark-Antiquark Bound States / E. Eichten, T. Kinoshita, K. Gottfried [et al.] // Phys.Rev.Lett. – 1975. – Vol. 34. – P. 369–372.
3. Savkli, C. Quark-antiquark bound states in the relativistic spectator formalism / C. Savkli, F. Gross // Phys. Rev. – 2001. – Vol. C 63. – P. 035208.
4. Adams, J.A. Solving nonperturbative flow equations / J.A. Adams [et al.] // Mod. Phys. Lett. – 1995. – Vol. A 10. – P. 2367–2380.
5. Gubankova, E. Flow equations for quark-gluon interactions in light-front QCD / E. Gubankova, C.-R. Ji, S.R. Cotanch // Phys. Rev. – 2000. – Vol. D 62. – P. 125012.
6. Keister, B.D. Relativistic Hamiltonian dynamics in nuclear and particle physics / B.D. Keister, W.N. Polyzou // Adv. Nucl. Phys. – 1991. – Vol. 20. – P. 225–479.
7. Бабич, К.С. Релятивистское обобщение корнельского потенциала : пертурбативная часть / К.С. Бабич, В.В. Андреев // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2012. – 6 (75). – С. 23–30.
8. Ebert, D. Semirelativistic quark – anti-quark potential, mass spectra and weak decays into excited states of heavy – light mesons [Electronic resource] / D. Ebert, R.N. Faustov, V.O. Galkin. – 1998. – Mode of access : <http://arxiv.org/pdf/hep-ph/9809285>. – Date of access : 14.01.2008.
9. Galkin, V.O. Meson masses in the relativistic quark model / V.O. Galkin, A.Y. Mishurov, R.N. Faustov // Sov. J. Nucl. Phys. – 1992. – Vol. 55. – P. 1207–1213.
10. Андреев, В.В. Аналитическое вычисление фейнмановских амплитуд / В.В. Андреев // Ядерная физика. – 2003. – Т. 66, № 2. – С. 410–420.
11. Андреев, В.В. Методы вычисления амплитуд в квантовополевых теориях и моделях / В.В. Андреев. – Гомель : УО «Гомельский государственный ун-т им. Ф. Скорины», 2004. – 235 с.

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

²Объединенный институт ядерных исследований, лаборатория ядерных проблем

Микроструктурные критерии разрушения при взаимодействии поверхности металлов и смазочной среды при трении

В.Г. Пинчук, Е.А. КОВАЛЕВ¹, С.В. КОРОТКЕВИЧ²

Исследованы микроструктурные критерии разрушения поверхностных слоев металла (никель) при фрикционном нагружении поверхностей в смазочных средах. Определены физико-химические критерии окисления поверхности и формирования окисных пленок. Установлено влияние окисных пленок на прочностные свойства поверхностных слоев металлов. Рассмотрены механизмы взаимодействия окисных пленок с дислокациями поверхностного слоя. Рассмотрены аспекты внутреннего окисления и водородного охрупчивания за счет транспорта кислорода и водорода по каналам поверхностных дислокаций при механо- и термодеструкции смазки.

Ключевые слова: дислокации, окисные пленки, поверхностно активные вещества, коррозия под напряжением, внутреннее окисление, лепестково-послойный механизм разрушения.

The microstructural fracture criteria of the surface layers of metal (nickel) for frictional loading surfaces in lubricating media are investigated. Physicochemical criteria for surface oxidation and the formation of oxide films are defined. The influence of oxide films on the strength properties of the surface of the metal layers is stated. The mechanisms of interaction of the oxide films with dislocations of the surface layer are considered. Aspects of internal oxidation and hydrogen embrittlement due to the transport of oxygen and hydrogen via surface dislocations during mechanical and thermal degradation of grease are considered.

Keywords: dislocation, oxide films, surfactants, stress corrosion, internal oxidation Flap-stratified failure mechanism.

Контактирование твердых тел при трении сопровождается протеканием физических и физико-химических процессов, взаимосвязанных с напряженно-деформированным состоянием поверхностных слоев твердых тел и структурным составом смазочных сред. Большое влияние на прочностные свойства поверхностных слоев твердых тел оказывает среда фрикционного испытания. Воздействие среды может проявиться по двум направлениям:

1) растворением части поверхностного слоя материала и устранением поверхностных нарушений, что способствует повышению долговечности трущихся поверхностей;

2) адсорбционным облегчением деформации и снижением прочности согласно эффекту П.А. Ребиндера.

Механические и прочностные свойства при фрикционном нагружении металлов определяются размножением, движением и взаимодействием дислокаций между собой и другими дефектами кристаллического строения материала.

Отметим некоторые факторы, влияющие на дислокационную структуру поверхностного слоя металла:

1. Окисление поверхности посредством химического взаимодействия смазочной среды с поверхностью и образование хрупких пленок окислов.

2. Коррозионное взаимодействие среды с поверхностью или отдельными ее участками.

3. Влияние поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Рассмотрим более конкретно влияние этих факторов на микроструктуру поверхностных слоев в плане фрикционного взаимодействия поверхностей металлов и смазочной среды.

При обычном процессе фрикционного нагружения в присутствии смазочных сред, когда в фрикционном контакте протекает множество физико-химических процессов, нельзя исключить химического взаимодействия многокомпонентной смазки и поверхности металла с образованием хрупких пленок в результате ее окисления. Это структурное преобразование поверхности является одним из важных факторов разрушения посредством трещинообразования в приповерхностном слое металла, особенно в интрузиях, созданных активными полосками скольжения и механическим микрорезанием. В этом случае окисные пленки на поверхности интрузий являются эффективными барьерами для движущихся дислокаций, скопления которых, в дальнейшем, формируют трещины по модели Зимера-Стро [1] Согласно этой

модели, к зарождению трещин приводит высокая концентрация растягивающих напряжений на головной дислокации заторможенного скопления линейных дефектов. Величина этих напряжений иногда превышает предел прочности материала. Сформировавшиеся подповерхностные микротрещины соединяются со слабыми местами интрузий, вероятнее всего у их вершин, где коэффициент концентрации напряжений достигает нескольких десятков. Такой вид разрушения наблюдался нами экспериментально в никеле при фрикционном нагружении в результате электронномикроскопических исследований микроструктуры на «просвет» (рисунок 1). Согласно современным положениям, разрушение соединяющего материала между вершиной интрузии и сформировавшейся микротрещиной может быть вязким или хрупким, в зависимости от вида релаксации напряжений у вершин трещин. Это означает, что разрушение будет вязким до тех пор, пока не будут достигнуты критические значения скорости распространения и длины трещины, при которых предел текучести материала станет равным напряжению хрупкого разрушения. В этом случае реализуется критерий перехода вязкого к хрупкому разрушению и окончательное разрушение происходит с большой скоростью.

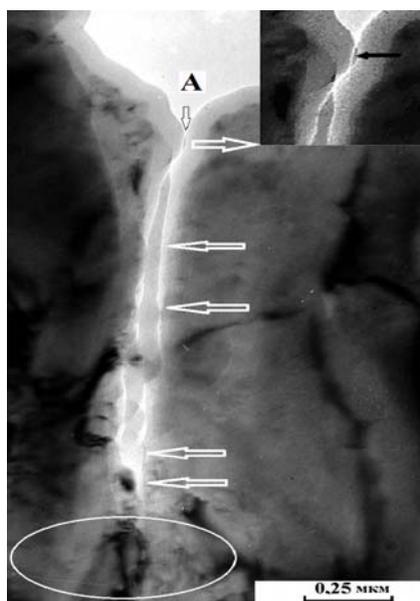


Рисунок 1 – Объединение внутренней трещины с микронадрезом поверхности никеля

Следующим критерием хрупкого разрушения металлов является протяженность зоны пластического деформирования. Если пластическая деформация осуществляется только в тонком поверхностном слое, то пластичные материалы будут разрушаться по условию Гриффитса для хрупких материалов [2]. Согласно основным положениям, нарушения сплошности материала типично хрупкое разрушение наступает после достижения достаточно высокой скорости распространения трещины. Определяющую роль в этом процессе играет связь между пределом текучести и скоростью деформации.

При фрикционном нагружении пластическая деформация поверхностных слоев протекает в условиях скоростного деформирования, при котором достигается высокая скорость распространения трещины и расширяется ассортимент деформационных искажений по степени их устойчивости. Такое положение определяет широкие возможности хрупкого разрушения материала поверхностного слоя даже при относительно малых скоростях фрикционного нагружения. В этом случае, для реализации хрупкого вида разрушения, необходима достаточная степень ограничения пластической деформации у вершины трещины для достижения высокой концентрации упругих напряжений на ее острие. В исследуемом металле (никель) высокая энергия дефекта упаковки, что является достаточным условием ограничения неконсервативного движения дислокаций при пластическом деформировании. Ограниченность перехода линейных дефектов в соседние плоскости скольжения обеспечивает высокую концентрацию упругих напряжений на острие дислокационной микротрещины [3]. Энергия этих напряжений является достаточной для интенсивного роста трещины скола материала, т. е. хрупкого разрушения.

В условиях фрикционного нагружения, действие усталостных нагрузок увеличивают вероятность неконсервативного восхождения дислокаций в соседние плоскости скольжения из за возвратно-поступательного их движения. Цикличность нагрузочных воздействий при трении обуславливается различной высотой и разнообразием геометрических форм неровностей трущихся поверхностей. При циклических нагрузках возможно образование полостей в виде скрытых трещин у вершин интрузий [4]. Такую полость, соединяющуюся затем с вершиной интрузии, можно рассматривать как продолжение интрузии. Развитие усталостной трещины авторы наблюдали экспериментально при трении никеля по молибдену в среде поверхностно-активной смазки ЦИАТИМ-201 (рисунок 1). Этот механизм разрушения наблюдался при фрикционном нагружении никеля в паре трения Ni-Mo. Испытание на трение проводилось в смазке ЦИАТИМ-201 при нагрузке 84 кПа и линейной скорости 0,5 м/с. Электронномикроскопические исследования никеля проводились на микроскопе ЭМВ-100АК методом тонких фольг на «просвет» в Харьковском техническом университете. Рисунок 1 иллюстрирует процесс объединения этих дефектов. В данном случае микротрещина (стрелки) сформировалась в вершине полосы скольжения (овал), заторможенной границей зерна. По мере продвижения и роста микротрещины происходит преобразование в виде развития клинообразного участка разрушения в ее вершине. Как видно из вставки (рисунок 1), поверхностный дефект (интрузия) также формирует клинообразную полость (позиция А) для воссоединения с образованием промежуточного объемного дефекта эллипсоидальной формы (вставка, черная стрелка). Механизм объединения напоминает процесс хрупкого разрушения разделяющего материала между подповерхностной микротрещиной и поверхностным дефектом в виде надреза (интрузии). Оценка максимального растягивающего напряжения у вершины сформированной трещины с учетом ее радиуса закругления по методике [3] показала, что значение этого параметра составляет $\sigma = 10^9$ Па и по порядку величины сравнимо с теоретической прочностью никеля. Это значение растягивающего напряжения можно отнести к механизму, обусловленному большой степенью ограничения пластической деформации у вершины трещины, определяемой высокой энергией дефекта упаковки никеля, тормозящей неконсервативное движение дислокаций. Такое заключение не противоречит условию, что хрупкое разрушение типа скола материала реализуется при фрикционном нагружении никеля, железа. Это лежит в основе экспериментально наблюдаемого локализованного во времени лепестково-послойного характера разрушения поверхностного слоя металла при трении [5].

Дислокационная структура приповерхностных объемов оказывает влияние на прохождение процессов коррозии под напряжением. Окислительные процессы весьма эффективно происходят в местах локализации упругих напряжений. Причиной этого процесса является повышенный химический потенциал напряженных областей, особенно в местах подповерхностных скоплений дислокаций. Важным может оказаться адсорбционный механизм, который ослабляет связи атомов в твердом теле в местах упругих напряжений, обусловленных выходом дислокаций на поверхность. Оба механизма, как коррозия под напряжением, так и адсорбция, тесно связаны, причем коррозионным процессам всегда предшествует адсорбция. Эта взаимосвязь сильно проявляется при усталостных нагрузках [6].

Особый интерес представляет адсорбция поверхностно-активных веществ на поверхности металлов, приводящая к пластифицированию последних (эффект Ребиндера). Это явление можно истолковать с точки зрения дислокационных представлений как интенсификацию зарождения и движения дислокаций с лавинным выходом их на свободную поверхность без образования окисных пленок, действие которых было рассмотрено выше. Рассмотрим иные формы этого явления. Известно, что адсорбция ПАВ на поверхности металла приводит к снижению свободной поверхностной энергии, которое в свою очередь, проявляет склонность поверхностного слоя к диспергированию и охрупчиванию [7]. Одновременно адсорбция полярных молекул сопровождается блокированием дислокаций и затруднением работы поверхностных источников, что в конечном итоге приводит к увеличению предела текучести и склонности к охрупчиванию [2]. Следовательно подвижность дислокаций определяется длительностью процессов адсорбции полярных молекул в местах их выхода на поверхность.

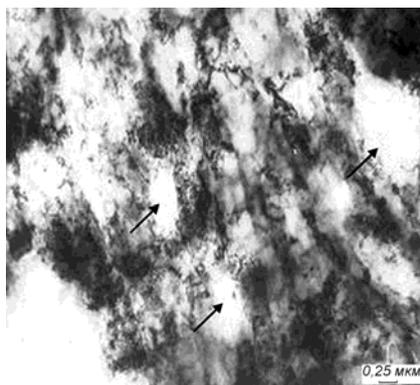


Рисунок 2 – Микроструктура диспергированного слоя никеля (поры и микрополости показаны стрелками) x 54000

Необходимо отметить наблюдаемый механизм разрушения поверхностного слоя при трении, связанный с внутренним окислением и разрыхлением металла (рисунок 2). Возвратно-поступательное движение дислокаций у поверхности вызывает периодическое появление и исчезновение поверхностных микроступенек. Адсорбция ПАВ, кислорода и водорода, образовавшегося при механо- и термодеструкции смазки на ювенильной поверхности свежесформированной микроступеньки, и движение этой поверхности внутрь поверхностного слоя приводит к затягиванию адсорбированных молекул по плоскости скольжения. В результате по активным полосам скольжения в поверхностном слое при трении появляется склонность к охрупчиванию и самопроизвольному диспергированию в силу снижения свободной поверхностной энергии, образования внутренних окисных слоев и появления водородной хрупкости. Эти окисные образования являются стабильными препятствиями для движения дислокаций в поверхностном слое и способствуют формированию плоских скоплений и последующих внутренних трещин. Влияние ПАВ на прочность металлов может объясняться с точки зрения проникновения этих веществ в зону образования зародышевой трещины у плоского скопления дислокаций. Это реализуется за счет транспорта вещества из окружающей среды посредством постоянной диффузии и вдоль линий дислокаций и, особенно, вдоль полых дислокационных ядер. При этом происходит резкое уменьшение сил поверхностного натяжения, что обеспечивает образование и развитие поверхностных и внутренних микротрещин.

Таким образом механические и прочностные характеристики металлов при фрикционном нагружении обуславливаются физико-химическими процессами в фрикционном контакте. Дислокационная структура поверхностных объемов зависит от свойств смазочных сред фрикционного контакта.

Литература

1. Stroh, A.N. The formation of cracks in plastic flow / A.N. Stroh // *proc. Royal Society.* – 1955. – Vol. 232, A. № 1191. – P. 548–560.
2. Вествуд, А.Р. Чувствительных механических свойств к действию окружающей среды / А.Р. Вествуд. – Изд. Мир, 1972. – 176 с.
3. Хирт, Д. Теория дислокаций / Д. Хирт, Н. Лоте. – М. : Атомиздат, 1972. – 569 с.
4. Фуджита, Ф.Е. Разрушение твердых тел / Ф.Е. Фуджита – М. : Metallurgia, 1972. – 456 с.
5. Пинчук, В.Г. Кинетика упрочнения и разрушения поверхности металлов при трении / В.Г. Пинчук, С.В. Короткевич // Lambert Academic Publishing. – 2014. – 180 с.
6. Лихтман, В.И. Влияние поверхностно-активной среды на процессы деформации металлов / В.И. Лихтман, П.А. Ребиндер, Г.В. Карпенко. – Изд. АН СССР, 1954. – 126 с.
7. Гарбер, Р.И. Физика прочности твердых тел / Р.И. Гарбер, Н.А. Гиндин // *Успехи физических наук.* – 1960. – Т. LXX, вып. 1, – С. 57–110.

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

²РУП «Гомельэнерго»

УДК 537.876.23

Параметрическое моделирование оптимальных омега-элементов, обеспечивающих преобразование поляризации СВЧ волны метаповерхностью

Цянь Сонгсонг¹, М.А. Подалов, И.В. Семченко, С.А. Хахомов²

В СВЧ диапазоне от 2,5 до 4 ГГц с помощью параметрического компьютерного моделирования исследованы металлические элементы омега-образной формы. При условии полуволнового резонанса определены параметры оптимальных омега-элементов, которые могут иметь преимущества при создании метаматериалов. Рассмотрены двумерные массивы омега-элементов или метаповерхности, находящиеся в поле наклонно падающей электромагнитной волны с линейной поляризацией. Показана возможность отражения циркулярно поляризованной СВЧ волны от метаповерхности, образованной омега-элементами оптимальной формы, и определена напряженность электрического поля электромагнитной волны. Проведено сравнение с теоретически рассчитанными параметрами омега-элементов при различных моделях распределения токов. Найдено соответствие оптимальных параметров, полученных в результате теоретического расчёта и моделирования.

Ключевые слова: параметрическое моделирование, омега-элемент, циркулярная поляризация, коэффициент эллиптичности, метаматериалы, метаповерхности.

The omega-shaped metal elements have been investigated using parametric computer simulation in the microwave range of 2.5 to 4 GHz. Parameters of optimal omega-elements under the condition of the half-wave resonance have been determined that may have advantages at creating of metamaterials. The two-dimensional arrays of omega-elements, or metasurface located in the obliquely incident electromagnetic wave with linear polarization have been considered. The possibility of reflection of the circularly polarized microwave from metasurface formed of optimal shaped omega-elements has been shown, and the strength of the electric field of electromagnetic wave has been determined. The comparison with the theoretically calculated parameters of omega-elements for different models of the current distribution has been carried out. A match of the optimal parameters derived from theoretical calculations and simulations has been found.

Keywords: parametric modeling, omega-element, circular polarization, axial ratio, metamaterials, metasurface.

Введение. В настоящее время в мире проводятся многочисленные исследования метаматериалов [1]–[8]. Метаматериалы можно характеризовать как искусственные структуры, обладающие экзотическими свойствами, не встречающимися у обычных материалов. Метаматериалы могут быть образованы структурными элементами различной геометрической формы. В качестве элементов могут использоваться право- и левовинтовые металлические спирали, сферические частицы со спиральной проводимостью, разомкнутые кольца с выступающими концами, полосковые элементы в виде буквы S и ее зеркального эквивалента и другие. Планарные элементы в виде разомкнутых колец с выступающими концами получили название омега-элементы, исследование такого рода элементов вызывает в настоящее время рост интереса со стороны исследователей [9]–[11].

Задачей нашей работы является получение оптимальных параметров омега-элементов с помощью средств компьютерного моделирования электродинамических процессов и сравнение полученных результатов с теоретически рассчитанными параметрами.

Объектом нашего исследования являются омега-элементы. Омега-элемент не является киральным в силу своей симметрии, однако обладает магнитоэлектрическими свойствами, что создаёт возможность преобразования поляризации электромагнитной волны. Основными предметами исследования являются коэффициент эллиптичности и напряжённость электрического поля отраженной волны при её взаимодействии с двумерным массивом омега-элементов. Оптимальные параметры омега-элемента были рассчитаны ранее в рамках моделей квазистационарного тока [12], [13] и гармоничного тока [14]. В настоящей работе показано соответствие оптимальных параметров омега-элементов, полученных с помощью параметрического моделирования, с ранее теоретически рассчитанными параметрами омега-элементов.

1. Исследование частотной зависимости напряженности электрического поля отражённой электромагнитной волны для двумерного массива омега-элементов. Формирование циркулярно-поляризованной волны, отражённой от массива, происходит благодаря

излучению связанных между собой дипольного момента \vec{p} и магнитного момента \vec{m} каждого омега-элемента. Эти моменты дают равные по абсолютной величине вклады в отраженную волну [13]. Преимущество использования метаповерхности на основе омега-элементов для получения циркулярно-поляризованной волны заключается в простоте изготовления и масштабирования. Омега-структура является плоской, следовательно, производить её можно, например, методом травления на печатной плате, практически в любом доступном масштабе.

Для подтверждения теоретических расчетов, проведенных в работах [12]–[14], проведено параметрическое моделирование путём использования метода конечных элементов, по следующим основным параметрам омега-частицы: a – длина плеча, l – расстояние между плечами и R – радиус витка (рисунок 1 а). Данная частица исследуется вблизи частоты 3 ГГц. Вектор напряженности электрического поля E падающей волны направлен по оси X (рисунок 1 б). Волновой вектор k направлен под углом 65 градусов относительно оси Z , то есть относительно нормали к плоскости, в которой расположены омега-элементы. Исследуемая модель рассматривается в вакууме, омега-элемент изготовлен из меди.

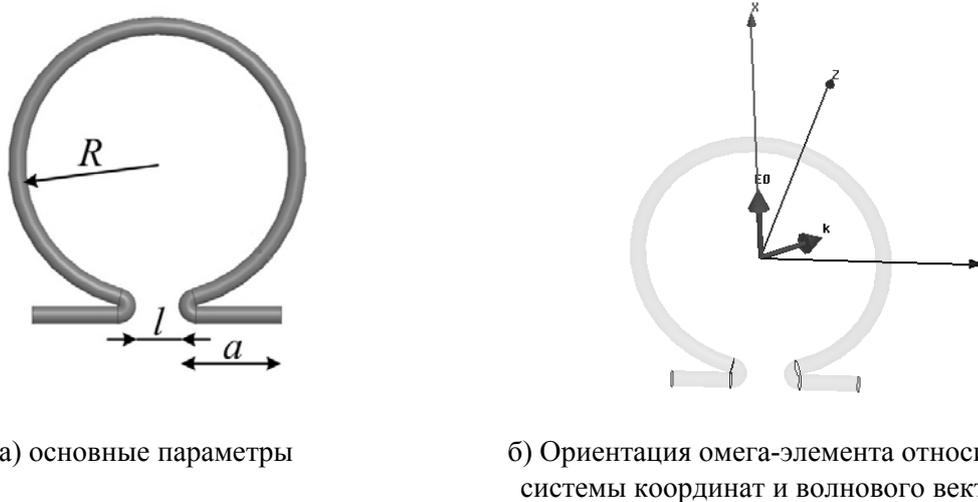


Рисунок 1 – Омега-элемент

Исследуемая омега-структура представляет собой бесконечную плоскую поверхность. Расстояние между центрами витков элементов в двумерном массиве равно двум сантиметрам, то есть элементарная ячейка имеет форму квадрата с длиной стороны 2 см.

Варьируемыми параметрами являются: радиус витка, расстояние между плечами и длина плеча. Диапазон изменений: длина плеча 1–5 мм с шагом 1 мм; радиус витка 4–8 мм с шагом 1 мм; расстояние между плечами 1–5 мм с шагом 1 мм.

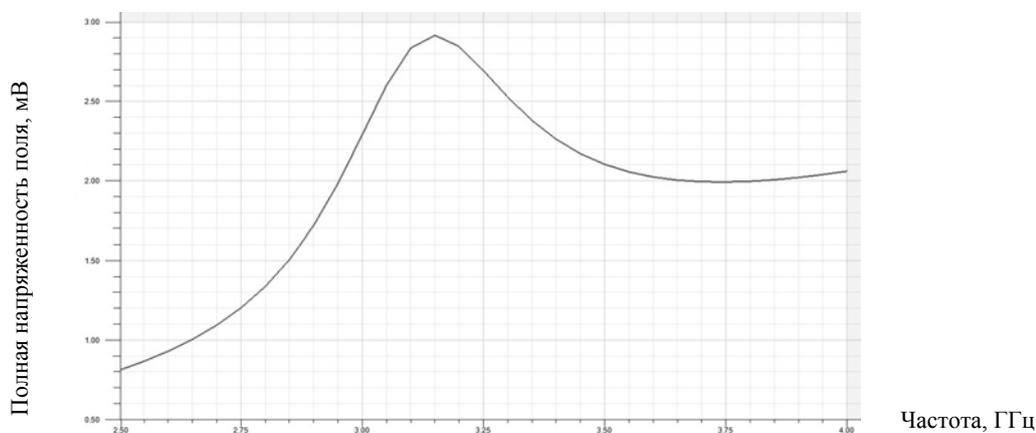


Рисунок 2 – График частотной зависимости полной напряженности электрического поля rE_{total} отражённой электромагнитной волны для бесконечной двумерной решетки, образованной омега-элементами с параметрами $a = 3$ мм, $l = 1$ мм, $R = 7$ мм

На рисунке 2 показан график частотной зависимости полной напряженности электрического поля rE_{total} отражённой электромагнитной волны для метаповерхности, образованной омега-элементами с параметрами $a = 3$ мм, $l = 1$ мм, $R = 7$ мм. Полная напряженность поля электромагнитной волны, индуцируемой омега-элементами, достигает своего максимального значения 2.92 мВ на частоте 3.15 ГГц и после прохождения максимума плавно опускается до значения 2 мВ в диапазоне частот 3.65–3.82 ГГц. Увеличение полной напряженности электрического поля с 0.81 до 2.92 мВ в диапазоне частот 2.5–3.15 является следствием приближения частоты волны к условию главного резонанса $L = \frac{\lambda}{2}$, где L – длина омега-элемента в выпрямленном состоянии.

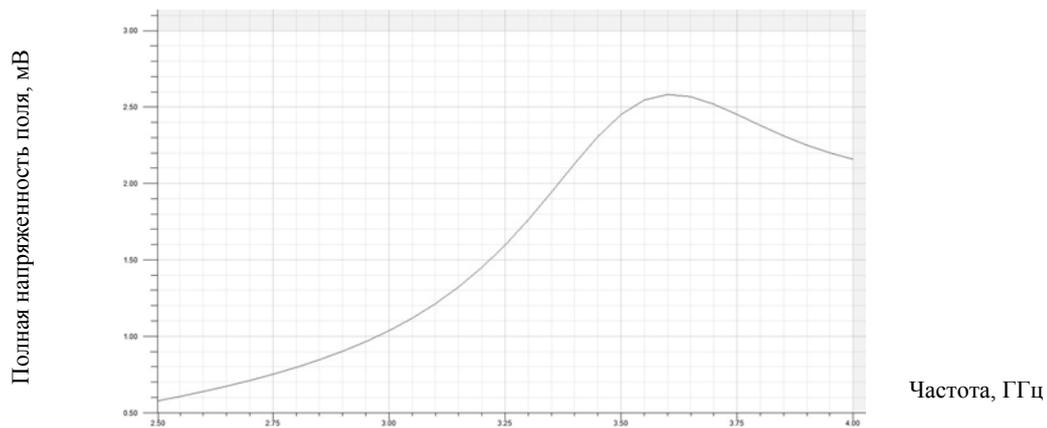


Рисунок 3 – График частотной зависимости полной напряженности электрического поля rE_{total} отражённой электромагнитной волны для бесконечной двумерной решетки, образованной омега-элементами с параметрами $a = 6$ мм, $l = 3$ мм, $R = 6$ мм

На рисунке 3 показан график частотной зависимости полной напряженности электрического поля rE_{total} отражённой электромагнитной волны для метаповерхности, образованной омега-элементами с параметрами $a = 6$ мм, $l = 3$ мм, $R = 6$ мм. Полная напряженность поля электромагнитной волны, индуцируемой омега-элементами, достигает максимума 2.58 мВ на частоте 3.60 ГГц, затем плавно снижается до значения 2.17 мВ на частоте 4 ГГц. В диапазоне частот 2.5–3.6 ГГц наблюдается рост напряженности от 0.58 до 2.58 мВ.

Из сравнения графиков следует, что омега-элементы с параметрами, соответствующими рисунку 2, создают немного более интенсивную отражённую волну. В то же время для омега-элементов, параметры которых соответствуют рисунку 3, резонанс наблюдается в более широкой полосе частот.

2. Моделирование частотной зависимости коэффициента эллиптичности отражённой волны для массива омега-элементов.

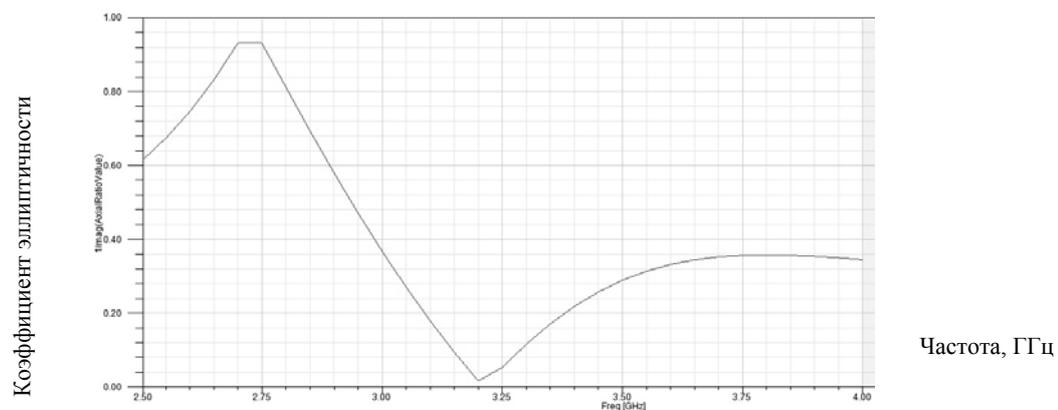


Рисунок 4 – График частотной зависимости коэффициента эллиптичности отраженной волны для бесконечной двумерной решетки, образованной омега-элементами с параметрами $a = 3$ мм, $l = 1$ мм, $R = 7$ мм

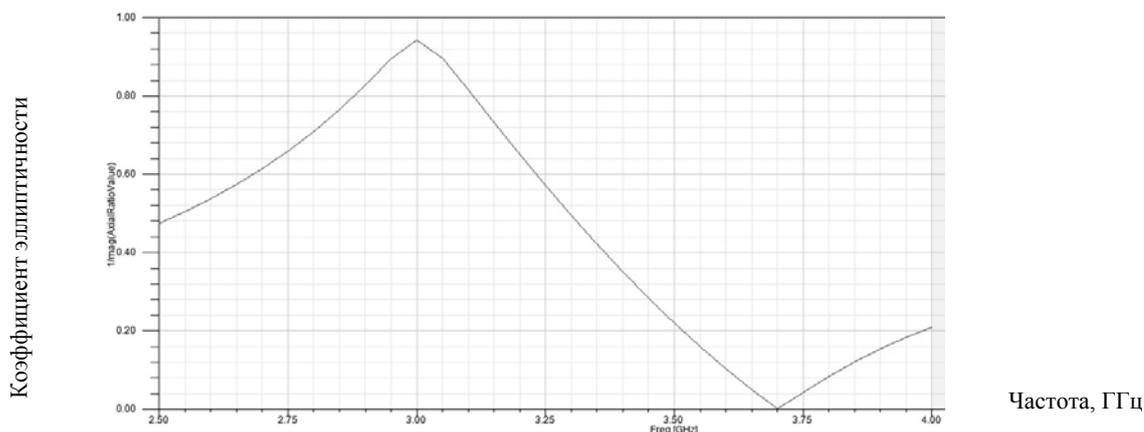


Рисунок 5 – График частотной зависимости коэффициента эллиптичности отраженной волны для бесконечной двумерной решетки, образованной омега-элементами с параметрами $a = 6$ мм, $l = 3$ мм, $R = 6$ мм

На рисунке 4 представлен график частотной зависимости коэффициента эллиптичности отраженной волны для метаповерхности, образованной омега-элементами с параметрами: длина плеча 3 мм, радиус витка 7 мм, расстояние между плечами 1 мм. Коэффициент эллиптичности достигает максимума на частотном интервале 2.7–2.75 ГГц, пик имеет форму «столика», и для этих частот поляризация волны близка к циркулярной. Затем имеется минимум $K = 0.01$ на частоте 3.2 ГГц, то есть для этой частоты отражённая волна имеет линейную поляризацию. На расчетной резонансной частоте 3 ГГц значение $K = 0.36$, то есть волна поляризована эллиптически.

Как следует из рисунка 5, коэффициент эллиптичности близок к максимальному значению $K = 0.94$ на расчетной резонансной частоте 3 ГГц для омега-элементов с параметрами: длина плеча 6 мм, радиус витка 6 мм, расстояние между плечами 3 мм. Следовательно, для этой частоты отражённая волна имеет приблизительно циркулярную поляризацию. На частоте 3,7 ГГц отражённая волна является линейно поляризованной.

Обе частотных зависимости, представленные на рисунках 4 и 5, были получены с помощью параметрического моделирования 75 различных комбинаций омега-элементов.

3. Сравнение результатов параметрического моделирования с теоретически рассчитанными параметрами оптимальных омега-элементов. Ранее нами были получены параметры омега-элемента, рассчитанные в рамках модели квазистационарного тока [12], [13] и гармонического тока в элементе [14]. Сравнение основных параметров, полученных путём расчёта и параметрического моделирования, представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение параметров омега-элемента, полученных с помощью теоретического расчёта и параметрического моделирования методом конечных элементов

	R , mm	$2\pi R$, mm	a , mm	l , mm	$L=2\pi r+2a$, mm	$\lambda=2L$, mm
Модель квазистационарного тока	6.6	41.46	4.26	1	50	100
Модель гармонического тока	5.0	31.41	9.29	1	50	100
Образец 1 ($a=3$, $l=1$, $R=7$)	7.0	43.96	3	1	50	100
Образец 2 ($a=6$, $l=3$, $R=6$)	6.0	37.69	6	3	49.7	99.4

Как видно из таблицы 1, резонансная длина волны для всех омега-элементов практически совпадает с расчетной. Образец 2 имеет радиус витка и длину плеч, более близкие для обеих моделей тока, использованных при теоретических расчётах. Более точный результат может быть получен при уменьшении шага параметрического моделирования.

Заключение. На основании проведенного моделирования подтверждена возможность преобразования падающей линейно поляризованной электромагнитной волны в циркулярно поляризованную, отраженную от метаповерхности, образованной омега-элементами, в области частот, близких к резонансной.

Определена частотная зависимость полной напряжённости электрического поля СВЧ волны, отражённой от двумерной решётки, которая образована омега-элементами. Показано, что эта зависимость имеет резонансный характер и достигает максимума вблизи частоты, удовлетворяющей условию полуволнового резонанса.

Найден коэффициент эллиптичности отражённой волны и показано, что её поляризация может изменяться от циркулярной до линейной в зависимости от частоты вблизи резонанса.

Оптимальные параметры омега-элементов, полученные путём моделирования, близки к значениям, рассчитанным ранее в рамках теоретических моделей.

Авторы выражают благодарность А.П. Балмакову и И.А. Грудько за помощь в построении модели и консультации.

Литература

1. *Advances in Complex Electromagnetic Materials* / A. Priou [at al.] // Kluwer Academic Publishers. – 1997. – Vol. 28. – P. 32–37.
2. Serdyukov, A.N. *Electromagnetics of bi-anisotropic materials : Theory and applications* / A.N. Serdyukov, I.V. Semchenko, S.A. Tretyakov, A. Sihvola. – Amsterdam : Gordon and Breach Science Publishers, 2001. – P. 308–321.
3. Исследование свойств искусственных анизотропных структур с большой киральностью / И.В. Семченко [и др.] // *Кристаллография*. – 2011. – Т. 56, № 3. – С. 398–405.
4. Tretyakov, S.A. *Analytical Modeling in Applied Electromagnetics* / S.A. Tretyakov. – Artech House. – Norwood, MA, 2003. – 260 p.
5. Reply to comment on reflection and transmission by a uniaxial bi-anisotropic slab under normal incidence of plane waves / S.A. Tretyakov, A.H. Sihvola, I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov // *Journal of Physics D : Applied Physics*. – 1999. – Vol. 32, № 20. – P. 2705–2706.
6. *Electromagnetic waves in artificial chiral structures with dielectric and magnetic properties* / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, S.A. Tretyakov, A.H. Sihvola // *Electromagnetics*. – 2001. – Vol. 21, № 5. – P. 401–414.
7. Semchenko, I.V. Transformation of the polarization of electromagnetic waves by helical radiators / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, A.L. Samofalov // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – 2007. – Vol. 52, № 8. – P. 850–855.
8. Исследование свойств слабоотражающих метаматериалов с компенсированной хиральностью / И.В. Семченко [и др.] // *Кристаллография*. – 2014. – Т. 59, № 4. – С. 544.
9. Abaga Abessolo, M.A. Dual-band monopole antenna with omega particles for wireless applications / M.A. Abaga Abessolo, A.El Moussaoui, N. Aknin // *Progress In Electromagnetics Research Letters*. – 2011. – Vol. 24. – P. 27–34.
10. Dincer, F. Dual-band polarization independent metamaterial absorber based on omega resonator octa-starstrip configuration / F. Dincer, M. Karaaslan, E. Unal, C. Sabah // *Progress In Electromagnetics Research*. – 2013. – Vol. 141. – P. 219–231.
11. Karaaslan, M. Chiral metamaterial based multifunctional sensor applications / M. Karaaslan, M. Bakir // *Progress In Electromagnetics Research*. – 2014. – Vol. 149. – P. 55–67.
12. Семченко, И.В. Получение циркулярно-поляризованной отраженной СВЧ волны с помощью плоской периодической структуры на основе омега-элементов / И.В. Семченко, М.А. Подалов // *Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины*. – 2006. – № 6. – С. 40–43.
13. Излучение циркулярно поляризованных волн сверхвысокочастотного диапазона плоской периодической структурой из Ω -элементов / И.В. Семченко, С.А. Хахомов, М.А. Подалов, С.А. Третьяков // *Радиотехника и электроника*. – 2007. – Т. 52, № 9. – С. 1084–1088.
14. Подалов, М.А. Оптимальная форма омега-включений для метаматериалов / М.А. Подалов, И.В. Семченко // *Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины*. – 2009. – № 4. – С. 172–176.

¹Нанкинский университет
науки и технологии, Китай

²Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

УДК 621.37/.39:621.9.048.7

Особенности лазерного раскалывания кристаллического кварца АТ- и ВТ-срезов

Е.Б. ШЕРШНЕВ, Ю.В. НИКИТЮК, С.И. СОКОЛОВ, А.Е. ШЕРШНЕВ

Выполнен расчет термоупругих полей, формируемых в кристаллах кварца АТ- и ВТ- срезов в результате последовательного лазерного нагрева и воздействия хладагента. Полученные результаты могут быть использованы в электронной промышленности для оптимизации процесса лазерной резки кристаллов кварца.

Ключевые слова: трещина, лазерное раскалывание, кварцевая пластина.

Calculation of the thermoelastic fields formed in crystals of quartz AT - and BT - cuts as a result of consecutive laser heating and coolant influence is executed. The received results can be used in electronic industry for optimisation of process laser are sharp quartz crystals.

Keywords: crack, laser splitting, quartz plate.

Введение. Лазерное раскалывание является одним из наиболее эффективных методов высокоточной обработки хрупких неметаллических материалов [1]. В работах [2]–[5] были выполнены исследования основных особенностей применения данного метода для обработки изотропных хрупких неметаллических материалов. В последнее время большое внимание уделяется изучению лазерного раскалывания различных кристаллов (например [6], [7]), в том числе кристаллов кварца [8]–[10]. Актуальность данного направления исследований обусловлена существенными недостатками традиционных способов разделения кристаллов, к которым относятся значительные потери обрабатываемого материала и загрязнение рабочих поверхностей. В работе [10] авторами данной статьи были проведены исследования особенностей процесса лазерного раскалывания кристаллического кварца с учетом анизотропии его свойств. Однако моделирование в [10] было выполнено лишь для стандартных первоначальных ориентаций кристаллических образцов. При этом на практике наиболее широко применяются кристаллы кварца АТ- и ВТ-срезов [11]. В связи с этим в данной работе было выполнено исследование особенностей процесса лазерного раскалывания кристаллического кварца АТ- и ВТ-срезов.

1. Моделирование процесса лазерного раскалывания. Расчет полей термоупругих напряжений, формируемых в кварцевых пластинах при лазерном раскалывании, был выполнен с использованием метода конечных элементов в рамках несвязанной задачи термоупругости в квазистатической постановке [12]–[13].

Расчеты проводились для квадратных пластин с геометрическими размерами $20 \times 20 \times 1,5$ мм и $20 \times 20 \times 0,75$ мм. Моделирование проводилось для случая воздействия лазерного излучения с длиной волны равной 10,6 мкм. Радиус пятна лазерного излучения – $R = 1,5$ мм, мощность излучения – $P = 50$ Вт. Скорость перемещения пластины относительно лазерного пучка и хладагента выбиралась равной $v = 5$ мм/с и $v = 15$ мм/с.

На рисунке 1 приведена схема расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки при перемещении лазерного пучка. Позицией 1 отмечен лазерный пучок, позицией 2 – хладагент, позицией 3 – лазерно-индуцированная трещина, позицией 4 – кварцевая пластина. Горизонтальной стрелкой на рисунке указано направление перемещения обрабатываемого изделия относительно лазерного пучка и хладагента.

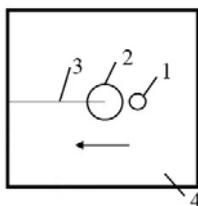


Рисунок 1 – Схема расположения зон воздействия лазерного излучения и хладагента в плоскости обработки кристалла кварца

При расчетах плотность и удельная теплоемкость кристаллического кварца полагались соответственно равными $\rho = 2643 \text{ кг/м}^3$ и $C = 741 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$. В ходе моделирования учитывались различия физических свойств кристаллического кварца в различных кристаллографических направлениях. Коэффициенты теплопроводности и линейного термического расширения кристаллического кварца полагались соответственно равными $\lambda_{\parallel} = 12,3 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, $\alpha_{\parallel} = 9 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ вдоль оси симметрии третьего порядка Z и $\lambda_{\perp} = 6,8 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, $\alpha_{\perp} = 14,8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ – перпендикулярно оси Z [14], [15].

Низкотемпературный кварц принадлежит к тригональной системе, вследствие чего его упругие свойства описываются шестью независимыми компонентами тензора модулей упругости. Для расчетов использовались следующие константы упругой жесткости: $C_{11} = 86,75 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $C_{12} = 5,95 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $C_{13} = 11,91 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $C_{14} = -17,8 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $C_{33} = 107,2 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $C_{44} = 57,8 \cdot 10^9 \text{ Па}$ [16], [17].

Любое расположение кристаллического элемента относительно осей X , Y , Z может быть получено путем ряда последовательных поворотов одной из первоначальных ориентаций этого кристаллического элемента. В случае АТ-среза выполняется поворот на 35° , а в случае ВТ-среза выполняется поворот на 49° [18] (см. рисунок 2).

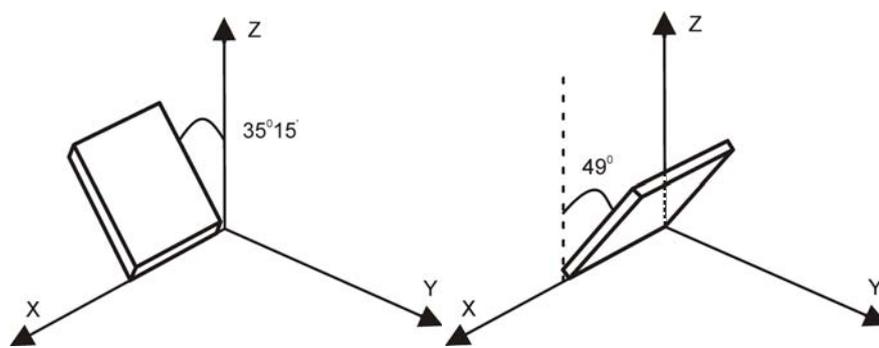


Рисунок 2 – АТ- и ВТ-срезы кристаллического кварца

Матрица $\{C_{ik}\}$ для АТ среза может быть записана в следующем виде

$$\{C_{ik}\} = \begin{pmatrix} 86,74 & -8,25 & 27,15 & -3,66 & 0 & 0 \\ -8,25 & 129,77 & -7,42 & 5,70 & 0 & 0 \\ 27,15 & -7,42 & 102,83 & 9,92 & 0 & 0 \\ -3,66 & 5,70 & 9,92 & 38,61 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 68,78 & 2,57 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,57 & 28,96 \end{pmatrix} \cdot 10^9 \text{ Па}, \quad (1)$$

Соответственно для ВТ среза матрица $\{C_{ik}\}$ имеет вид

$$\{C_{ik}\} = \begin{pmatrix} 86,74 & 27,53 & -8,63 & 0,057 & 0 & 0 \\ 27,53 & 98,24 & -5,67 & -12,80 & 0 & 0 \\ -8,63 & -5,67 & 130,86 & 0,17 & 0 & 0 \\ 0,057 & -12,80 & 0,17 & 40,36 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 29,87 & -6,49 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -6,49 & 67,87 \end{pmatrix} \cdot 10^9 \text{ Па}, \quad (2)$$

Расчет термоупругих полей, формируемых в кварцевой пластине в результате последовательного лазерного нагрева и воздействия хладагента, осуществлялся для четырех различных вариантов: I – анализ АТ-среза при перемещении лазерного пучка в направлении параллельном оси X; II – анализ АТ-среза при перемещении лазерного пучка в направлении перпендикулярном оси X; III – анализ ВТ-среза при перемещении лазерного пучка в направлении параллельном оси X; IV – анализ ВТ-среза при перемещении лазерного пучка в направлении перпендикулярном оси X.

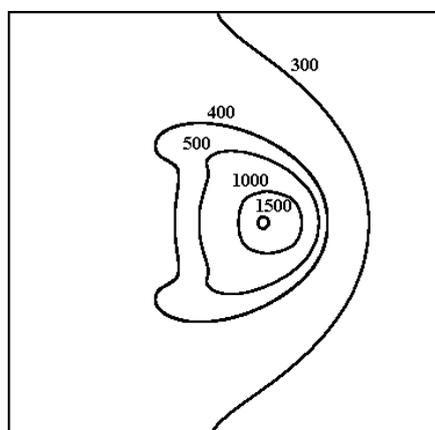
2. Результаты расчетов. Результаты проведенных расчетов приведены в таблицах 1–2 и на рисунках 3–4. В таблице 1 содержатся значения максимальных температур, формируемые в кварцевой пластине для четырех исследуемых вариантов обработки. Расчетные значения максимальных по величине термоупругих напряжений растяжения и сжатия, содержатся в таблице 2. На рисунках 3–4 представлены распределения температурных полей и полей температурных напряжений для пластин толщиной $h=0,75$ мм, обрабатываемых со скоростью $v=5$ мм/с.

Таблица 1 – Расчетные значения максимальных температур в обрабатываемой пластине

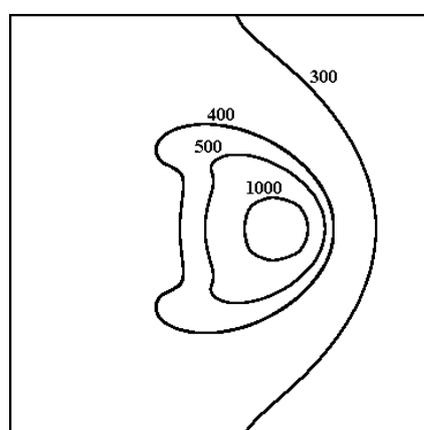
Вариант	Максимальная температура в обрабатываемой пластине T, К			
	$h=0,75$ мм		$h=1,5$ мм	
	$v=5$ мм/с	$v=15$ мм/с	$v=5$ мм/с	$v=15$ мм/с
I	1520	994	1125	842
II	1538	1005	1136	847
III	1502	999	1135	862
IV	1531	1018	1156	871

Таблица 2 – Расчетные максимальных по величине напряжений растяжения и сжатия в зоне обработки

Вариант	Максимальные напряжения в зоне обработки, МПа	$h=0,75$ мм		$h=1,5$ мм	
		$v=5$ мм/с	$v=15$ мм/с	$v=5$ мм/с	$v=15$ мм/с
I	сжатия	650	343	431	281
	растяжения	85	33	45	22
II	сжатия	717	381	483	319
	растяжения	100	40	53	34
III	сжатия	605	322	401	264
	растяжения	77	27	42	19
IV	сжатия	563	316	395	272
	растяжения	74	31	50	30



а)



б)

Рисунок 3 – Распределение температурных полей на поверхности кристаллического кварца: а) вариант I; б) вариант III

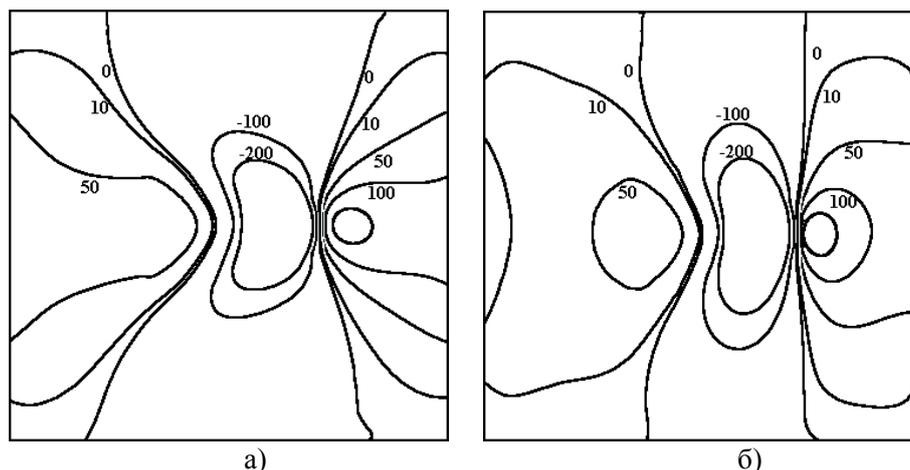


Рисунок 3 – Распределение полей термоупругих напряжений на поверхности кристаллического кварца: а) вариант I; б) вариант III

Анализ данных, приведенных в таблице 1, показывает, что анизотропия свойств кристаллов кварца в случае обработки АТ- и ВТ-срезов не оказывает существенного влияния на максимальные значения температуры в зоне обработки. Значительно более важными факторами оказываются такие параметры, как скорость обработки и геометрические размеры обрабатываемой пластины. Так, различия, обусловленные анизотропией теплофизических свойств приводят к разнице в максимальных значениях температуры, не превышающей 3 %, а различия, обусловленные скоростью обработки и геометрией образца для выбранных расчетных параметров, достигают 45 %. Из анализа значений данных, приведенных в таблице 2, следует, что скорость обработки и геометрические размеры обрабатываемой пластины так же оказывают существенное влияние на значения термоупругих напряжений, формируемых в зоне обработки. Различия, обусловленные этими факторами, приводят к разнице в максимальных значениях растягивающих напряжений порядка 50–80 %. При этом и анизотропия свойств кристаллов кварца оказывает существенное влияние на максимальные значения термоупругих напряжений в зоне обработки. Так, соответствующие различия для максимальных значений растягивающих напряжений превышают 35 %. Данная разница в величинах растягивающих напряжений должна быть учтена при выборе параметров процесса лазерного раскалывания.

Заключение. Полученные результаты показывают необходимость учета анизотропии свойств кристаллов кварца при выборе параметров лазерного раскалывания кварцевых пластин АТ- и ВТ-срезов.

Литература

1. Способ резки неметаллических материалов : пат. 2024441 РФ, МКИ 5 С03В33/02 / В.С. Кондратенко ; заявитель В.С. Кондратенко ; заявл. 04.02.92; опубл. 12.15.94.
2. Шалупаев, С.В. The Analysis of Laser Thermosplitting of Fragile Materials by Using of Special Geometry Beams / С.В. Шалупаев [и др.] // *Ceramics. Polish ceramic bulletin.* – 2001. – Vol. 65. – P. 75.
3. Сысоев, В.К. Увеличение эффективности управляемого лазерного термораскалывания диэлектрических материалов / В.К. Сысоев [и др.] // *Оптический журнал.* – 2004. – Т. 71., № 2. – С. 65.
4. Tsai, C. Laser cutting of thick ceramic substrates by controlled fracture technique / С. Tsai, Н. Chen // *Journal of materials processing technology.* – 2003. – Vol. 136. – P. 166.
5. Шалупаев, С.В. Двухлучевое лазерное термораскалывание хрупких неметаллических материалов / С.В. Шалупаев, Е.Б. Шершнева, Ю.В. Никитюк, А.А. Середа // *Оптический журнал.* – 2005. – Т. 73, № 5. – С. 62–66.
6. Наумов, А.С. Разработка технологии разделения приборных пластин на кристаллы : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.14 / А.С. Наумов ; МГУПИ. – М., 2009. – 19 с.
7. Сердюков, А.Н. Особенности управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кремния / А.Н. Сердюков, С.В. Шалупаев, Ю.В. Никитюк // *Кристаллография.* – 2010. – Т. 55, № 6. – С. 1180–1184.

8. Способ резки хрупких неметаллических материалов : пат. 2224648 РФ, МКИ5 СОЗ В 33/02 В.С. Кондратенко, П.Д. Гидин ; заявитель Кондратенко В.С., Гидин П.Д. ; заявл. 03.09.2002 ; опубл. 27.02.2004.
9. Гиндин, П.Д. Разработка новых технологий и оборудования на основе метода лазерного управляемого термораскалывания для обработки деталей приборостроения, микро- и оптоэлектроники : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.11.14 / П.Д. Гиндин ; МГУПИ. – М., 2009. – 43 с.
10. Сердюков, А.Н., Шершнев, Е.Б., Никитюк, Ю.В., Шолох, В.Ф., Соколов, С.И. Особенности управляемого лазерного термораскалывания кристаллического кварца // Кристаллография. – 2012. – Т. 57, № 6. – С. 906–912.
11. Kestler, W., Jung, W., Bryant, J. О подборе кварцевых резонаторов // Основы схемотехники. – 2001. – № 5. – С. 19.
12. Шабров, Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей / Н.Н. Шабров. – Л. : Машиностроение, 1983. – 212 с.
13. Коваленко, Л.Д. Основы термоупругости / Л.Д. Коваленко. – Киев : Наукова думка, 1970. – 307 с.
14. Блистанов, А.А., Бондаренко, В.С., Чкалова, В.В. Акустические кристаллы / А.А. Блистанов, В.С. Бондаренко, В.В. Чкалова. – М. : Наука, 1982. – 632 с.
15. Корицкий, Ю.В., Пасынков, В.В., Тареев, Б.М. Справочник по электротехническим материалам / Ю.В. Корицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. – Л. : Энергоатомиздат. 1988. – Т. 3. – 728 с.
16. Heyliger, P., Ledbetter, H., Kim, S. / P. Heyliger, H. Ledbetter, S. Kim // J. Acoust. Soc. Am. – 2003. – V. 114, № 2. – P. 644.
17. Смагин, А.Г., Ярославский, М.И. Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы / А.Г. Смагин, М.И. Ярославский. – М. : Энергия, 1970. – 488 с.
18. Глюкман, Л.И. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы : 3-е изд., перераб. и доп / Л.И. Глюкман. – М. : Радио и связь, 1981. – 232 с.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 14.11.2014

Выбор модели деградации функционального параметра изделий электронной техники

Е.Н. ШНЕЙДЕРОВ, С.М. БОРОВИКОВ, И.А. БУРАК

Рассматривается выбор математической модели деградации функционального параметра в виде условного закона его распределения для выборки изделий электронной техники при решении задач прогнозирования надёжности. Удачность выбора закона распределения снижает ошибки прогнозирования надёжности новых однотипных выборок изделий. На примере биполярных транзисторов показано, что использование в качестве модели деградации параметра закона распределения, отличного от нормального, может обеспечить лучшие результаты прогнозирования.

Ключевые слова: изделия электронной техники, функциональный параметр, постепенные отказы, параметрическая надёжность, математическая модель деградации, условный закон распределения параметра, прогнозирование параметрической надёжности.

The choice of the mathematical model of the degradation of a functional parameter in the form of a conditional law of its distribution for the sample of electronic devices in solving prediction reliability is considered. The best one of the distribution of the prediction error decreases the reliability of new samples of similar products. On the example of bipolar transistors it is shown that using as a model the degradation parameter of the distribution of non-normal one may provide better results of parametric reliability prediction.

Keywords: Electronic products, functional parameter, phasing, parametric reliability, mathematical model of degradation, conditional distribution law of a parameter> parametric reliability prediction

Введение. Мировой и отечественный опыт развития и совершенствования технологии изготовления изделий электронной техники (ИЭТ) показывает, что причины возникновения внезапных отказов могут быть в значительной мере устранены и, следовательно, доля внезапных (физических) отказов сведена к минимуму [1, с. 16]. Так, например, по данным российских научно-исследовательских институтов в 1988 г. для не СВЧ биполярных транзисторов (БТ) доля внезапных отказов в общем числе отказов этого вида ИЭТ составляла примерно 30 %, а к 2006 г. она уменьшилась до 20 %. Для диодов и стабилитронов за указанный период доля внезапных отказов снизилась с 35 до 20 %. Приведённые данные подтверждают признанные в настоящее время статистические данные о том, что для полупроводниковых приборов (ППП) доля постепенных отказов явно преобладает над внезапными отказами в общем количестве отказов [2]. Поэтому в научно-технической литературе постепенные отказы обычно называют деградационными отказами. Критериями таких отказов являются уровни изменения электрического функционального параметра, выше или ниже которых ИЭТ согласно технической документации считается несоответствующим требованию надёжности (безотказной работы) [2, с. 178], [3, с. 40], [4].

Постепенные отказы определяют такое понятие, как параметрическая надёжность ИЭТ, которая характеризует способность ИЭТ сохранять уровень функционального параметра $y(t)$ в пределах норм (от a до b), указанных в технической документации или установленных потребителем, в течение заданного времени, иначе наработки t_3 при выбранных режимах и условиях работы. Математическим критерием постепенного отказа в данном случае является нарушение неравенства

$$a \leq y(t) \leq b, \quad (1)$$

a в качестве количественной меры параметрической надёжности может использоваться вероятность выполнения этого условия в течение наработки t_3 , т. е.

$$P_{\Pi}(t_3) = \text{Вер} \{a \leq y(t) \leq b, t \in (0 \dots t_3)\} = P \{a \leq y(t) \leq b, t \in (0 \dots t_3)\}, \quad (2)$$

где запись «Вер» означает вероятность, далее она будет заменяться символом P .

Постепенные отказы в принципе исключить невозможно, потому что они отражают внутренне присущие материалам ИЭТ свойства, связанные со старением. Эти отказы и, следовательно, параметрическую надёжность ИЭТ можно прогнозировать [5], что позволит получать партии (выборки) ИЭТ с нормированным уровнем параметрической надёжности. Этим и вызван растущий интерес к постепенным (деградационным) отказам и, следовательно, параметрической надёжности ИЭТ [1].

Модель деградации параметра ИЭТ. В работах [6], [7] обосновывается, что для получения количественной оценки уровня параметрической надёжности выборки однотипных ИЭТ по функциональному параметру $y(t)$ удобно использовать модель деградации этого параметра в виде его условного закона распределения. Слово «условный» подчёркивает то, что рассматривается закон распределения параметра $y(t)$ для конкретной интересующей наработки t_i . Смысл этих моделей понятен из рисунка 1, на котором величины $w(y/t_i)$ представляют собой плотности распределения параметра $y(t)$ для наработок t_i ($i= 0, 1, 2, \dots, k$), названных временными сечениями.

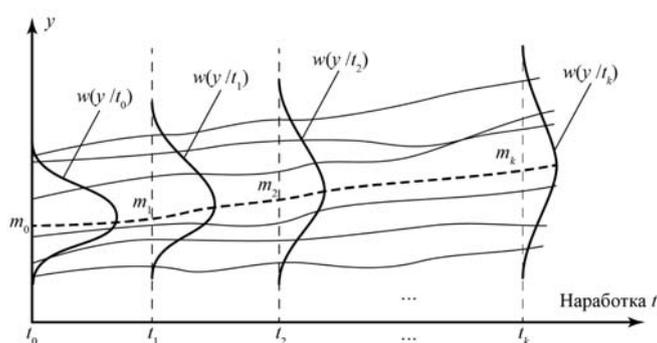


Рисунок 1 – Изменение плотности распределения функционального параметра y при работе ИЭТ:
 m_0, m_1, \dots, m_k – средние значения y во временных сечениях (штриховая линия)
 t_0, t_1, \dots, t_k – временные сечения

Для рассматриваемого типа ИЭТ модель деградации получают один раз с помощью предварительных экспериментальных исследований определённой выборки, взятой из партии изготовленных ИЭТ данного типа. Эту выборку называют обучающей, а сами экспериментальные исследования – обучающим экспериментом. На практике возникает вопрос, какой закон распределения использовать в качестве математической модели описания деградации параметра обучающей выборки ИЭТ, а следовательно для решения задач прогнозирования параметрической надёжности ИЭТ. От удачности выбора закона распределения функционального параметра по результатам обучающего эксперимента будет зависеть достоверность прогнозирования параметрической надёжности новых однотипных выборок ИЭТ. Здесь слово «новые» означает те выборки, экземпляры которых не использовались для получения модели деградации параметра ИЭТ на этапе предварительных исследований (обучающего эксперимента). Получив модель деградации параметра выборки ИЭТ в виде функции $w(y/t)$, можно решать задачу группового прогнозирования параметрической надёжности новых однотипных выборок ИЭТ. Решение задачи сводится к нахождению вероятности того, что для заданной будущей наработки t_3 функциональный параметр $y(t)$ выборки ИЭТ будет отвечать условию (1). Согласно работе [8], эта вероятность $P_n(t_3)$, определяемая выражением (2), может быть найдена как

$$P_n(t_3) = \int_a^b w(y/t_3) dy = F(b/t_3) - F(a/t_3), \quad (3)$$

где $F(a/t_3)$, $F(b/t_3)$ – условная (для наработки t_3) функция распределения функционального параметра $y(t)$, подсчитанная для значений $y = a$ и $y = b$.

Приближённое аналитическое выражение условной плотности распределения $w(y/t)$ для любой интересующей наработки t_3 может быть получено путём математических преобразований начального распределения $w(y/t = 0)$:

$$w(y/t = t_3) = \psi[w(y/t = 0), t_3], \quad (4)$$

где ψ – символ функциональной зависимости.

Физико-химические характеристики деградации функционального параметра $y(t)$, получаемые усреднением по исследуемой обучающей выборке ИЭТ, войдут в виде коэффициентов в правую часть выражения (4).

Согласно данным работы [3, с. 42], при налаженном технологическом процессе изготовления ИЭТ наиболее часто наблюдается нормальное распределение параметров изделий. Причинами возникновения разброса параметров являются различные флуктуации технологического процесса, неоднородность применяемых материалов, различие в контроле из-за погрешности измерительных приборов, способностей операторов и другие факторы. По мнению авторов статьи, из-за отбраковки потенциально ненадёжных экземпляров на этапе выходного контроля и последующей тренировки (электротермотренировки), выполняемой как правило для мощных полупроводниковых приборов, закон распределения функционального параметра ИЭТ может существенно деформироваться и заметно отличаться от нормального. Это обстоятельство важно учесть при выборе модели деградации функционального параметра ИЭТ.

Методика исследований. Экспериментальные исследования проводились на примере биполярных транзисторов (БТ) большой мощности типа КТ872А. В качестве функциональных параметров рассматривались статический коэффициент усиления по току в схеме с общей базой $h_{21Э}$ и напряжение насыщения коллектор-эмиттер $U_{КЭнас}$ при токах базы I_B и коллектора I_K , обеспечивающих режим насыщения транзистора. Для получения деградации параметров $h_{21Э}$ и $U_{КЭнас}$ использовалось физическое моделирование наработки БТ в виде ускоренных испытаний. Для исследований было сформировано две выборки: обучающая объёмом $n = 100$ экземпляров и контрольная объёмом $r = 200$ экземпляров.

Обучающая выборка использовалась для получения моделей деградации параметров $h_{21Э}$ и $U_{КЭнас}$. Контрольная выборка предназначалась для оценки достоверности группового прогнозирования параметрической надёжности БТ. Применительно к ней по основным числовым характеристикам (математическому ожиданию $m(y/t = 0)$ и среднему квадратическому отклонению $\sigma(y/t = 0)$), соответствующим начальному моменту времени ($t = 0$), решалась задача группового прогнозирования параметрической надёжности для временных сечений t_i (3840, 8320, 12 800 и 17 280 ч) в виде получения прогнозного значения вероятностей $P_n(t_i)$, определяемых выражением (3). Эти значения вероятностей обозначим через $[P_n(t_i)]_{пр}$, $i = 1, 2, \dots, k$. После этого в процессе физического моделирования наработки выполнялся контроль значений параметров $h_{21Э}$ и $U_{КЭнас}$ во временных сечениях t_i и определялось экспериментальное (истинное) значение уровня параметрической надёжности выборки ИЭТ для каждого из временных сечений. Эти вероятности обозначим через $[P_n(t_i)]_э$, $i = 1, 2, \dots, k$.

Физическое моделирование деградации параметров $h_{21Э}$ и $U_{КЭнас}$ состояло в проведении для БТ по типовым методикам [9], [10] ускоренных форсированных испытаний, эквивалентных времени 17 280 ч с точки зрения функционирования БТ в нормальных условиях работы. Коэффициент ускорения испытаний K_y составлял 80 единиц.

Для нахождения вероятностей $[P_n(t_i)]_э$, соответствующих временным сечениям t_i , использовалось классическое выражение оценки вероятности события по его частоте [8, с. 27], которое для решения данной задачи приняло вид

$$[P_n(t_i)]_э = \frac{r(a \leq y \leq b)}{r}, \quad \text{при } i = 1, 2, \dots, k, \quad (5)$$

где $r(a \leq y \leq b)$ – количество экземпляров контрольной выборки, для которых функциональный параметр y для наработки t_i имел значение в пределах указанных норм от a до b ; r – общее количество экземпляров в контрольной выборке (объём контрольной выборки).

Сравнивая полученные вероятности $[P_{\text{п}}(t_i)]_{\text{пр}}$ и $[P_{\text{п}}(t_i)]_{\text{э}}$ (таблица 1), делалось заключение о возможности использования построенной модели деградации параметра y для прогнозирования параметрической надёжности новых однотипных выборок ИЭТ для временных сечений в диапазоне наработок $(t_1 \dots t_k)$.

Таблица 1 – Сравнение прогнозного и экспериментального уровней параметрической надёжности

Параметр	Вероятность $P_{\text{п}}(t_i)$ для наработки t_i						
	$t_1, \text{ч}$		$t_2, \text{ч}$...	$t_k, \text{ч}$	
	$[P_{\text{п}}(t_1)]_{\text{пр}}$	$[P_{\text{п}}(t_1)]_{\text{э}}$	$[P_{\text{п}}(t_2)]_{\text{пр}}$	$[P_{\text{п}}(t_2)]_{\text{э}}$...	$[P_{\text{п}}(t_k)]_{\text{пр}}$	$[P_{\text{п}}(t_k)]_{\text{э}}$
...

Среднюю ошибку прогнозирования параметрической надёжности ИЭТ по рассматриваемому функциональному параметру предлагается определять по формуле [7]

$$\Delta_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left(\frac{P_{\text{п}i} - P_{\text{э}i}}{P_{\text{э}i}} \right)^2} \times 100\%, \quad (6)$$

где k – число временных сечений, для которых определялись прогнозные и экспериментальные значения уровня параметрической надёжности; $P_{\text{п}i} = [P_{\text{п}}(t_i)]_{\text{пр}}$ – прогнозные значения уровня параметрической надёжности ИЭТ контрольной выборки, полученное по формуле (3) для i -го временного сечения; $P_{\text{э}i} = [P_{\text{п}}(t_i)]_{\text{э}}$ – экспериментальное значение уровня параметрической надёжности ИЭТ контрольной выборки, подсчитанное по выражению (5) для i -го временного сечения ($i = 1, 2, \dots, k$).

По значению найденной ошибки $\Delta_{\text{ср}}$ принималось решение о пригодности модели деградации функционального параметра для прогнозирования параметрической надёжности ИЭТ.

Результаты исследований. На рисунке 2 показана деградация функциональных параметров $h_{21Э}$ и $U_{\text{КЭнас}}$ экземпляров обучающей выборки в течение времени ускоренных испытаний $t_y = 216$ ч, что соответствует наработке 17 280 ч в нормальных условиях. Для иллюстрации приводятся графики деградации, построенные по экспериментальным точкам для двенадцати экземпляров.

Используя экземпляры обучающей выборки, были построены гистограммы распределения параметров $h_{21Э}$ и $U_{\text{КЭнас}}$ для временных сечений, составляющих в нормальных условиях следующие наработки: 0 (начальный момент времени), 3840, 8320, 12 800 и 17 280 ч. В качестве иллюстрации на рисунке 3 приведены гистограммы распределения параметра $h_{21Э}$ для временных сечений (наработок) 0 и 17 280 ч, где p – относительная частота попадания параметра в заданный интервал, выраженная в процентах.

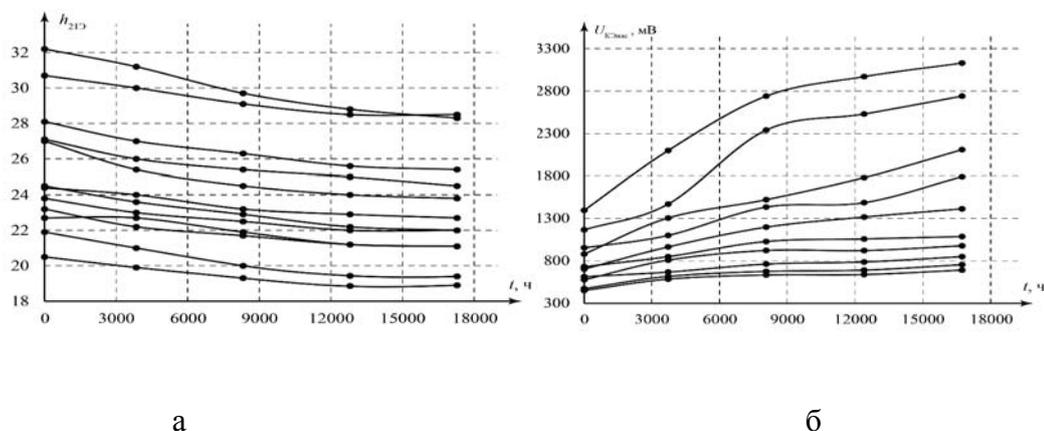


Рисунок 2 – Экспериментальные графики зависимости параметров $h_{21Э}$ (а) и $U_{\text{КЭнас}}$ (б) от наработки, рассчитанной по результатам ускоренных испытаний t_y (в качестве примера приводится информация о двенадцати экземплярах)

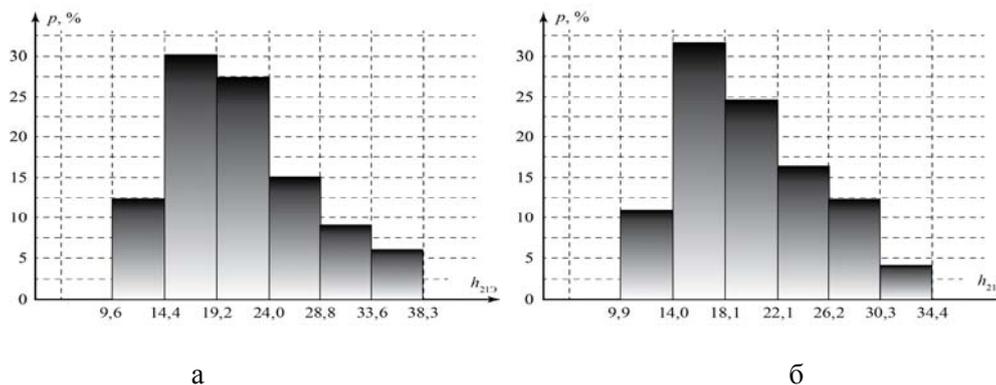


Рисунок 3 – Гистограммы распределения параметра $h_{21Э}$ для наработок $t = 0$ (а) и $t = 17\ 280$ ч (б)

На рисунке 4 показаны гистограммы распределения параметра $U_{КЭнас}$ экземпляров обучающей выборки для наработок 0 и 17 280 ч.

Из вида гистограмм распределения параметров $h_{21Э}$ и $U_{КЭнас}$ (особенно из гистограмм, приведённых на рисунке 4), а также из выполненного статистического анализа был сделан вывод, что распределение этих параметров для рассматриваемых наработок t_i плохо описывается нормальным законом распределения. Поэтому предложено в качестве модели деградации параметров $h_{21Э}$ и $U_{КЭнас}$ выборки ИЭТ рассматривать другие, более удачные по мнению авторов, законы распределения: Вейбулла, Реллея и логарифмически нормальный. При решении практических задач прогнозирования параметрической надёжности выборок ИЭТ предпочтение следует отдавать тому закону распределения (модели деградации), для которого ошибки прогнозирования применительно к контрольной выборке минимальны (не более 3–5 %).

В качестве подтверждения гипотезы о более высокой достоверности прогнозирования с использованием модели деградации параметра, отличной от нормального закона распределения, был апробирован трёхпараметрический закон Вейбулла. Ниже в качестве иллюстрации приводится проверка гипотезы на примере параметра $U_{КЭнас}$. Статистический анализ экспериментальных данных параметра $U_{КЭнас}$ показал, что коэффициент формы этого распределения для всех рассматриваемых наработок t_i примерно равен единице, и для проверки гипотезы фактически было использовано двухпараметрическое экспоненциальное распределение как частный случай распределения Вейбулла – распределение при значении коэффициента формы $b = 1$. Условная плотность распределения параметра y для рассматриваемого временного сечения t в этом случае определялась выражением

$$w(y/t) = \frac{1}{\mu(y/t)} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{\mu(y/t)}[y/t - c(y/t)]\right\}, \text{ при } y/t \geq c(y/t), \quad (7)$$

где $\mu(y/t)$, $c(y/t)$ – характеристики (параметры) закона распределения для временного сечения t ; y/t – значение параметра y , соответствующее временному сечению (наработке) t .

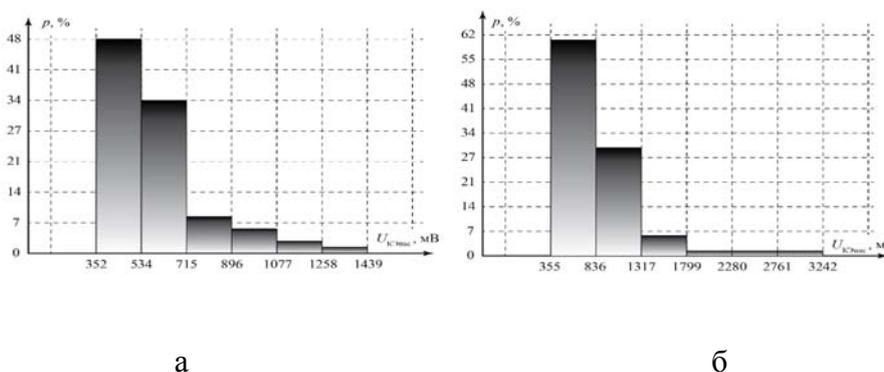


Рисунок 4 – Гистограммы распределения параметра $U_{КЭнас}$ для наработок $t = 0$ (а) и $t = 17\ 280$ ч (б)

Величины $\mu(y/t)$ и $c(y/t)$ в выражении (7) в неявном виде включают физико-химические характеристики деградации функционального параметра y для интересующей наработки t . В соответствии с выражением (4) значения $\mu(y/t)$ и $c(y/t)$ можно определять как функции наработки t и величин $\mu(y/t=0)$ и $c(y/t=0)$, являющихся параметрами двухпараметрического экспоненциального распределения в начальный момент времени ($t=0$). Однако для практических приложений интерес представляет случай определения значений $\mu(y/t)$ и $c(y/t)$ как функций наработки t и основных числовых характеристик параметра y в начальный момент времени, т. е. значений $m(y/t=0)$ и $\sigma(y/t=0)$:

$$\mu(y/t) = \varphi_1[t, m(y/t=0), \sigma(y/t=0)]; \quad (8)$$

$$c(y/t) = \varphi_2[t, m(y/t=0), \sigma(y/t=0)], \quad (9)$$

где φ_1, φ_2 – операторы функциональных зависимостей, подлежащие определению; $m(y/t=0)$, $\sigma(y/t=0)$ – среднее значение и среднее квадратическое отклонение параметра y в начальный момент времени (во временном сечении $t=0$).

Условная плотность распределения (7), полученная с учётом выражений (8) и (9), может рассматриваться в качестве модели деградации функционального параметра y .

В качестве отсутствия постепенного отказа по рассматриваемому параметру УКЭнас выбрано условие:

$$U_{\text{КЭнас}} \leq U_{\text{потр}}, \quad (10)$$

где $U_{\text{потр}}$ – задаваемая потребителем норма на параметр $U_{\text{КЭнас}}$.

Прогноз параметрической надёжности для временного сечения t_i был получен в виде вероятности того, что функциональный параметр $U_{\text{КЭнас}}$ контрольной выборки ИЭТ в течение заданного времени работы (наработки) t_i не выйдет за пределы нормы, определяемой условием (10). В случае использования для функционального параметра $U_{\text{КЭнас}}$ во временных сечениях t_i ($i=1, 2, \dots, k$) гипотезы о двухпараметрическом экспоненциальном распределении эта вероятность определялась по формуле

$$\left[P_n(t_i) \right]_{\text{пр}} = 1 - \exp \left\{ - \frac{U_{\text{потр}} - c(y/t_i)}{\mu(y/t_i)} \right\}, \quad \text{при } U_{\text{потр}} \geq c(y/t_i). \quad (11)$$

Значения средней ошибки прогнозирования $\Delta_{\text{ср}}$, подсчитанной по выражению (6) для разных норм, устанавливаемых на параметр $U_{\text{КЭнас}}$ в диапазоне 0,8...1,8 В, приведены в таблице 2. Ошибка определена для двух гипотез распределения $U_{\text{КЭнас}}$ во временных сечениях t_i : нормальный закон и двухпараметрическое экспоненциальное распределение.

Таблица 2 – Значения средней ошибки прогнозирования $\Delta_{\text{ср}}$ параметра $U_{\text{КЭнас}}$ БТ типа КТ872А, %

Значение $U_{\text{потр}}$, В	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
Нормальный закон	19,38	17,51	13,36	7,14	2,11	2,63	2,40
Двухпараметрическое экспоненциальное распределение	3,27	2,86	2,48	0,81	1,65	2,20	1,64

Вывод. На примере параметров $h_{21Э}$ и $U_{\text{КЭнас}}$ БТ типа КТ872А показано, что распределение параметров ИЭТ для рассматриваемых наработок t_i не всегда хорошо описывается нормальным законом распределения. Предложено в качестве модели деградации параметров выборки ИЭТ рассматривать другие, более удачные, по мнению авторов, законы распределения. На примере параметра $U_{\text{КЭнас}}$ БТ типа КТ872А подтверждена гипотеза о более высокой достоверности прогнозирования в случае использования модели деградации, отличной от нормального закона распределения параметра ИЭТ. Из данных таблицы 2 видно, модель деградации параметра $U_{\text{КЭнас}}$, построенная на основе двухпараметрического экспоненциального распределения, обеспечивает заметно меньшие ошибки прогнозирования уровня параметрической надёжности новых выборок ИЭТ, нежели модель деградации, полученная в предположении нормального закона распределения $U_{\text{КЭнас}}$ во временных сечениях.

Литература

1. Боровиков, С.М. Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадёжных изделий электронной техники / С.М. Боровиков. – М. : Новое знание, 2013. – 343 с.
2. Боровиков, С.М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности / С.М. Боровиков. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.
3. Сыдоров, В.Ф. Физические основы надёжности интегральных схем / В.Ф. Сыдоров [и др.]; под ред. Ю.Г. Миллера. – М. : Советское радио, 1976. – 320 с.
4. Чернышёв, А.А. Основы надёжности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А.А. Чернышёв. – М. : Радио и связь, 1988. – 256 с.
5. European Organization of the Quality Control Glossary. – Bern : EOQC, 1988.
6. Физико-статистические модели деградации функциональных параметров изделий электронной техники / С.М. Боровиков [и др.] // Доклады НАН Беларуси. – 2007. – Т. 51, № 6. – С. 105–109.
7. Прогнозирование надёжности изделий электронной техники на основе математической модели деградации функционального параметра / С.М. Боровиков [и др.] // Доклады БГУИР : электроника, материалы, технологии, информатика. – 2008. – № 6 (36). – С. 32–39.
8. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей : учебник для высш. техн. учеб. заведений / Е.С. Вентцель. – 4-е изд. – М. : Наука, 1969. – 576 с.
9. Quick Logic Reliability Report / pASIC, Vialink and Quick Logic Corp. – Orleans, 1998.
10. Reliability Audit Report 1999. Life Test Data. ON Semiconductor L.L.C., Formerly a Division of Motorola, 1999.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 14.11.2014

Технический редактор: *И.В. Близнец*. Корректоры: *Д.Д. Павловец, Г.Н. Петухова*

Подписано в печать 08.12.2014. Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 27 Уч.-изд. л. 23,5. Тираж 100 экз. Заказ № 686
Цена свободная

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/87 от 18.11.2013.

Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013.

Ул. Советская, 104, 246019, Гомель.