

ИЗВЕСТИЯ

Гомельского государственного университета
имени Ф. Скорины

№ 3 (108)

Естественные науки

2018

Гомельский государственный университет
имени Ф. Скорины

ИЗВЕСТИЯ

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

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Члены редакционной коллегии:

Г.Г. Гончаренко, д-р биол. наук, проф.,
чл.-корр. НАН Беларуси
Ф.В. Кадол, д-р пед. наук, проф.
В.Н. Калмыков, д-р филос. наук, проф.
В.И. Коваль, д-р филол. наук, проф.
Г.Г. Лазько, д-р ист. наук, проф.
И.В. Семченко, д-р физ.-мат. наук, проф.
В.С. Смородин, д-р тех. наук, проф.
Б.В. Сорвилов, 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 546 dated 06.07.2009)

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

Members of editorial board:

G.G. Goncharenko, Sc. D., Professor, Corresponding
Member NASB
F. V. Kadol, Sc. D., Professor
V.N. Kalmykov, Sc. D., Professor
V.I. Koval, Sc. D., Professor
G.G. Lazko, Sc. D., Professor
I.V. Semchenko, Sc. D., Professor
V.S. Smorodin, Sc. D., Professor
B.V. Sorvirov, Sc. D., Professor
V.M. Homich, Sc. D., Professor
O.G. Shlyahova, 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. Kudzin, Sc. D., Professor
A.A. Makhnev (Russia), Sc. D., Professor, Correspond-
ing Member RAS
V.V. Mozharovsky, Sc. D., Professor
A.N. Serdukov, Sc. D., Professor, Corresponding
Member NASB
A.N. Skiba, Sc. D., Professor
Shen Riku (China), Sc. D., Professor
R. Esteban Romero (Spain), Sc. D., Professor

EDITORIAL OFFICE ADDRESS:
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

• 2018, № 3 (108) •

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ:

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

СОДЕРЖАНИЕ

Биология

Абрамова И.В. Сукцессия населения птиц в ходе восстановительной смены черно- ольховых лесов в юго-западной Беларуси.....	5
Балаева-Тихомирова О.М., Кацнельсон Е.И. Особенности обмена веществ <i>Lutpana</i> <i>stagnalis</i> в зависимости от сезона года и местообитания.....	12
Булко Н.И., Митин Н.В., Шабалева М.А., Толкачева Н.В., Козлов А.К. Динамика на- копления ¹³⁷ CS моховым покровом в сосновых и березовых насаждениях дальней и ближней зон аварии на ЧАЭС.....	19
Галиновский Н.Г., Демиденко О.М., Потапов Д.В., Аверин В.С. Оценка влияния обу- стройства нефтяных скважин на сообщества жесткокрылых (<i>Ectognatha</i> , <i>Coleoptera</i>) на примере Судовицкого нефтяного месторождения (Республика Бела- русь).....	24
Дайнеко Н.М., Тимофеев С.Ф., Булохов А.Д., Панасенко Н.Н. Влияние метеорологи- ческих условий на развитие инвазивного вида эхиноцистиса лопастного (<i>Echinocystis</i> <i>lobata</i> (Michx.) Torr. et Gray) в луговых экосистемах р. Сож.....	29
Кабышева А.А., Галиновский Н.Г. Оценка состояния комплексов жесткокрылых прибрежных экосистем рек <i>Ипуть</i> и <i>Сож</i>	35
Калиниченко С.А. Характеристика латерального распределения ¹³⁷ Cs, ⁹⁰ Sr, ²⁴¹ Am в поверхностном слое почвы различных биогеоценозов белорусского сектора зоны отчуждения Чернобыльской АЭС.....	42
Концевая И.И., Дайнеко Н.М., Минина А.В. Влияние микробного препарата <i>Агро-</i> <i>Мик</i> на агрономически полезные группы микроорганизмов почвы в посевах кукурузы ...	49
Концевая И.И. Применение абсцизовой кислоты при депонировании <i>Betula pendula</i> <i>Roth.</i> и <i>B. pubescens Ehrh.</i> в культуре <i>in vitro</i>	54
Лобань Л.А., Смоляр Н.А. Созофиты высшего ранга лесостепной части Чернигов- ской области в пределах Левобережного Приднестровья (Украина).....	60
Мялик А.Н. Хозяйственная оценка флоры Припятского Полесья.....	66
Соколов А.С. Структура землепользования и экологическое состояние физико- географических округов Беларуси.....	73
Хаданович А.В., Пырх О.В. Оценка содержания аскорбиновой кислоты в лекарст- венных растениях, выращенных в культуре.....	77

Храмченкова О.М., Матвеевков М.В. <i>Цитотоксическая активность ацетоновых экстрактов из лишайников в отношении линии кератиноцитов человека HaCAT</i>	81
Чунихин Л.А., Чеховский А.Л., Дроздов Д.Н. <i>Определение годовых эффективных доз облучения населения от радона на территории Гомельской, Могилевской и Витебской областей</i>	87
Шевчик О.В., Соломаха В.А. <i>Особенности произрастания Crataegus Ucrainica (Rosaceae) в долине р. Десна (Мезинский НПП)</i>	92
ИНФОРМАТИКА	
Головатая Е.А., Садов В.С., Демиденко О.М. <i>Оценка эффективности детекторов локальных признаков при обработке видеозендоскопических изображений</i>	97
Клименко А.В., Яцковец М.В., Карась Ю.С. <i>Методика динамического ценообразования на основе использования нейросетевого моделирования</i>	104
Меньшаков П.А., Мурашко И.А. <i>Исследование речевых расстройств при помощи голосовой идентификации на основе нейронных сетей</i>	108
Осипенко Н.Б., Осипенко А.Н., Слепенко Ю.А. <i>Метод синтеза результатов психологических тестирований в задаче принятия стратегических решений на примере профориентации</i>	112
МАТЕМАТИКА	
Богданова Н.С. <i>Гарантированная оценка точности для задачи о рюкзаке с выпуклыми монотонными сепарабельными функциями</i>	117
Бородич Е.Н., Бородич Р.В., Бородич Т.В., Бузланов А.В., Селькин М.В. <i>О пересечении A-допустимых Θ-подгрупп, не содержащих p-нильпотентный радикал</i>	121
Бураковский В.В. <i>Симметричная маркерная кольцевая локальная сеть со случайным выбором дисциплины обслуживания с сокращением</i>	127
Копать Д.Я., Матальцкий М.А. <i>Анализ сети с положительными заявками и сигналами различных типов в переходном режиме</i>	131
Можей Н.П. <i>Нередуцируемые однородные пространства и нормальные связности на них</i> . 137	
Павлив Д.А. <i>Анализ модели Хита, Джарроу и Мортон (HJM)</i>	144
Русаков А.Д., Гальмак А.М., Мережа В.Л. <i>О неассоциативности l-арной операции $\eta s, \sigma, k$</i>	150
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ	
Кудин В.П. <i>Ускорение сходимости характеристик излучателей плоских фазированных антенных решеток бесконечных размеров</i>	155
ФИЗИКА	
Башкиров С.А., Гременок В.Ф., Станчик А.В., Гуртовой В.Г. <i>Микроструктура многослойных пленок Cu-Zn-Sn на гибких подложках</i>	161
КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ	
Саварин А.А., Боровцов И.Д. <i>Обитает ли на востоке Беларуси европейский еж <i>Eri-paseus europaeus</i> L., 1758?</i>	167
Сообщение	170

Francisk Scorina Gomel State University

PROCEEDINGS

of Francisk Scorina Gomel State University

SCIENTIFIC, PRODUCTION AND PRACTICAL JOURNAL

There are 6 times a year
Published since 1999

• 2018, № 3 (108) •

NATURAL SCIENCES:

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

• MATHEMATICS • PHYSICS

CONTENTS

BIOLOGY

I.V. Abramava. <i>Succession of the bird population during the restoration of the black alder forests in southwestern Belarus</i>	5
O.M. Balaeva-Tikhomirova, E.I. Katsnelson. <i>Features of Lymnaea stagnalis metabolism depending on the season and habitat</i>	12
N.I. Bulko, N.V. Mitin, M.A. Shabaleva, N.V. Tolkacheva, A.K. Kozlov. <i>Dynamics of ¹³⁷Cs accumulation by the moss cover in the pine and birch plantations in the far and near zones of the Chernobyl accident</i>	19
N.G. Galinovsky, O.M. Demidenko, D.V. Potapov, V.S. Averin. <i>Assessment of the impact of oil well construction on the coleopteran communities (Ectognatha, Coleoptera) using the example of the Sudovitsk oil field (Republic of Belarus)</i>	24
N.M. Dayneko, S.F. Timofeev, A.D. Bulohov, N.N. Panasenko. <i>Influence of meteorological conditions on the development of invasive species of echinocystis lobata (Echinocystis lobata (Michx.) Torr. et Gray) in the meadow ecosystems of the river Sozh</i>	29
A.A. Kabysheva, N.G. Galinovsky. <i>Assessment of the condition of coleopteran complexes of the coastal ecosystems of the rivers Iput and Sozh</i>	35
S.A. Kalinichenko. <i>Horizontal distribution of ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, and ²⁴¹Am in the top layer of soil in various types of ecosystems in the Belarusian sector of the exclusion zone of the Chernobyl NPP</i>	42
I.I. Kontsevaya, N.M. Daineko, A.V. Minina. <i>Influence of microorganic AgroMic preparation on agronomically useful groups of soil microorganisms in maize crops</i>	49
I.I. Kontsevaya. <i>Use of abscisic acid for depositing Betula pendula Roth. and B. pubescens Ehrh. in vitro</i>	54
L.A. Loban, N.A. Smolar. <i>Sozophytes of the highest rank of the forest-steppe part of the Chernigov region within the Levoberezhny Dnieper area (Ukraine)</i>	60
A.N. Myalik. <i>Economic assessment of the flora of the Pripjat Polissya</i>	66
A.S. Sokolov. <i>Land use structure and ecological state of the physical-geographical districts of Belarus</i>	73
A.V. Khadanovich, O.V. Pyrh. <i>Assessment of the content of ascorbic acid in medicinal plants grown in culture</i>	77
O.M. Khranchankova, M.V. Matveyenkau. <i>Cytotoxic activity of acetone extracts from some lichen species on human keratinocyte growth</i>	81

L.A. Chunikhin, A.L. Chekhovsky, D.N. Drozdov. <i>Determination of annual effective doses of irradiation of the population from radon in the Gomel, Mogilev and Vitebsk regions</i>	87
O.V. Shevchyk, V.A. Solomakha. <i>Features of the growth of Crataegus Ucrainica (Rosaceae) in the valley of the river Desna (Mezyn National Nature Park)</i>	92
INFORMATION TECHNOLOGY	
E.A. Golovataya, V.S. Sadov, O.M. Demidenko. <i>Estimation of the effectiveness of detectors of local characteristics in the processing of video endoscopic images</i>	97
A.V. Klimenko, M.V. Yatskovets, Yu.S. Karas. <i>The method of dynamic pricing based on the use of neural network modeling</i>	104
P.A. Menshakov, I.A. Murashko. <i>Study of speech disorders using voice identification based on neural network</i>	108
N.B. Osipenko, A.N. Osipenko, Yu.A. Slepennok. <i>The method of synthesizing the results of psychological testing in the task of making strategic decisions on the example of career counseling</i>	112
MATHEMATICS	
N.S. Bogdanova. <i>Guaranteed accuracy estimation for the knapsack problem with convex monotone separable functions</i>	117
E.N. Borodich, R.V. Borodich, T.V. Borodich, A.V. Buzlanov, M.V. Selkin. <i>On intersection of the A-admissible maximal subgroups that do not contain p-nilpotent radical</i>	121
V.V. Burakovsky. <i>Symmetric token-passing ring local area network with random choice of service discipline with reduction</i>	127
D.Ya. Copat, M.A. Matalytsky. <i>Analysis of the network with positive applications and signals of various types in a transient mode</i>	131
N.P. Mozhey. <i>Nonreducible homogeneous spaces and normal connections on them</i>	137
D.A. Pavliv. <i>Analysis of the Heath, Jarrow and Morton models (HJM)</i>	144
A.D. Rusakou, A.M. Gal'mak, V.L. Mereja. <i>On the non-associativity of the l-ary operation η_s, σ, k</i>	150
TECHNOLOGY AND COMMUNICATION	
V.P. Kudzin. <i>Acceleration of the convergence of the characteristics of the radiators of flat phased array antennas of infinite dimensions</i>	155
PHYSICS	
S.A. Bashkirov, V.F. Gremenok, A.V. Stanchik, V.G. Hurtavy. <i>Microstructure of Cu-Zn-Sn multi-layer films on flexible substrates</i>	161
ABSTRACTS	
A.A. Savarin, I.D. Borovtsov. <i>Does the West European hedgehog Erinaceus europaeus L., 1758, inhabit in the east of Belarus?</i>	167
Message	170

Биология

УДК 598.2(470.5)+504.74.05:500.054:66/67

Сукцессия населения птиц в ходе восстановительной смены черноольховых лесов в юго-западной Беларуси

И.В. АБРАМОВА

Рассматриваются изменения населения птиц в ходе вторичной сукцессии ольховых лесов в юго-западной Беларуси. Разнообразие видов птиц в течение последовательности (6 стадий, 1–80 лет) увеличилось с 15 до 73 видов, общая численность – от 101,1 до 1069,0 ос./км², общая биомасса – от 6,75 до 58,74 кг/км². В состав орнитокомплексов входят представители шести типов фауны. На всех шести стадиях сукцессии в населении птиц доминируют виды палеарктического и европейско-туркестанского типов фауны.

Ключевые слова: сукцессия, черноольховые леса, орнитокомплекс, доминант, редкие виды птиц, Беларусь.

Changes in the bird population during the secondary succession of alder forests in south-western Belarus are considered. The field work was performed in the years 2000–2017 applying the conventional bird count methods. The study revealed that the bird species diversity in the course of succession (6 stages, 1–80 years old) increased from 15 to 73 species, overall abundance – from 101,1 to 1069,0 birds/km², overall biomass – from 6,75 to 58,74 kg/km². The ornithological variety included six fauna types. In all six stages of succession the bird population was dominated by Palaearctic and European-Turkestan types of fauna.

Keywords: succession; alder forest; ornithological variety; dominant; rare bird species; Belarus.

Введение. Самые значительные изменения в жизни сообщества птиц происходят при смене жизненных форм доминирующих растений: трав, кустарников, деревьев. Наиболее полно изучены вторичные сукцессии лесных экосистем. С появлением свежей вырубki или после пожара происходит пространственное перераспределение дендрофильных видов, которые населяют леса до их сведения, птиц открытых ландшафтов (луговых, полевых, кустарниковых) и опушечных, которые появляются после вырубki леса уже в первый год существования или на разных стадиях сукцессии. Смена населения птиц в лесах обусловлена последовательной сукцессией лесных растительных сообществ, главной причиной которых в настоящее время являются антропогенные факторы (лесохозяйственная деятельность, мелиорация прилегающих к лесам сельскохозяйственных угодий) [1]–[4]. Рубки деревьев на значительных площадях коренным образом изменяют среду обитания птиц. Для дендрофильных птиц такие изменения катастрофичны, и они исчезают с данной территории (рябчик, дятлы, дрозды, синицы). На вырубках встречаются только те птицы, жизнедеятельность которых связана с опушками: лесной конек, обыкновенная овсянка, жулан. Ряд птиц прилетают сюда в поисках корма.

Работ посвященных вторичным сукцессиям орнитофауны мало, но они свидетельствуют о параллельном с сукцессией фитоценозов увеличении разнообразия птиц [1], [4]–[10]. Сукцессии различных сообществ птиц слабо изучены в Беларуси и других регионах. Целью настоящей работы было изучение сукцессии населения птиц в ольховых лесах юго-западной части Белорусского Полесья.

Материал и методы. Сбор материалов для данной работы проводился в 2000–2017 гг. в юго-западной Беларуси в лесхозах: Брестском (Томашовское, Меднянское и Домачевское лесничества), Малоритском (Пожеженское и Малоритское лесничества) и Ивацевичском (Ивацевичское и Бронногорское лесничество). Данная территория расположена в подзонах широколиственно-сосновых и грабово-дубовых темнохвойных лесов [11].

Исследования проводились в пушистоберезово-черноольховых лесах, которые составляют 43,8 % коренных черноольховых лесов Беларуси. Они представлены черноольшаниками: осоковым, болотно-папоротниковым и ивняковым. Этот тип ольшаников занимает ровные, по-

ниженные участки, которые сильно обводнены, но со слабопроточным увлажнением. Здесь ольха образует древостой второго бонитета с примесью березы пушистой (до 30 %), иногда ели и сосны. В подлеске представлены черемуха, рябина, лещина, черная и красная смородина. В травяном покрове осоки, камыши и белокрыльник. Ольха черная имеет как семенное, так и порослевое происхождение. Учетные маршруты (ширина полосы 200 м, длина 1–2 км) включали черноольховые и пушистоберезово-черноольховые таволговые леса, составляющие 56,2 % коренных черноольшаников на низинных болотах. Они объединяют ольсы кочедыжниковый, касатиковый и таволговый. Древостой с преобладанием ольхи черной первого бонитета. Подлесок в черноольшанике крапивном состоит из крушины, черемухи, лещины, малины, ежевики и др. Кондоминантом древостоев в этих типах ольсов является береза пушистая, отмечена ель в основном во втором ярусе, изредка произрастает ясень, иногда дуб.

Исследования выполнялись в пределах разновозрастных участков, представляющих ряд от свежей рубки до лесных насаждений более чем 80-летнего возраста. Средний возраст черной ольхи оценивался согласно рекомендациям А.З. Стрелкова и др. [12].

За период вторичной сукцессии в ольховых лесах выделено шесть стадий развития растительности от свежей вырубki до спелого леса 80-летнего возраста. Описания группировались по возрасту, видовому составу сообществ, спектру жизненных форм растений, и особенностям ярусности фитоценозов, кроме того учитывались средняя высота, средний диаметр, сомкнутость и видовое разнообразие древостоя. Первая стадия длится 1–3 года, представлена травянистой растительностью (болотной или луговой), затем наступает стадия молодых культур из поросли кустарников, ольхи, березы и осины (возраст 4–9 лет), которая сменяется стадией сплошных зарослей кустарниковой поросли и подроста (возраст 10–20 лет). Через 30–35 лет после вырубки начинается стадия смешанного леса, которая в 50–60 лет переходит в стадию приспевающего леса, сменяющегося спелым высокоствольным лесом из ольхи с примесью березы и других пород (возраст 70–80 лет).

При изучении сукцессий (серий) орнитокомплексов закладывались маршруты в экосистемах, находящихся на разных стадиях сукцессионного ряда (на свежих вырубках, в молодых культурах, жердняках, приспевающем и спелом лесах). Первые три стадии сукцессии (до 20 лет) были прослежены на одних и тех же площадках, более поздние – на площадках с однотипными условиями (по увлажнению и литологии), отличающихся возрастом лесобразующей породы – ольхи черной. Общая протяженность пройденных маршрутов составила 260 км. При учётах птиц применяли общепринятые методы [13]–[16]. Учёт птиц проводился не менее 10 раз в каждой растительной ассоциации с 15.05 по 30.06, когда практически все птицы принимают участие в размножении. Учёт проводили в ясную погоду в утреннее (спустя 1 час после восхода) и вечернее (прекращался за 1–2 часа до захода солнца) время, когда птицы наиболее активны, на пробных площадках и трансектах.

Перерасчёт обилия птиц на единицу площади велся отдельно по средним дальностям обнаружения (голосу, визуально) [14]. Доминирующими по обилию считали те виды, доля которых в сообществе птиц преобладает (10 % и более) [13]. Латинские названия птиц приведены по сводке «Clements checklist of birds of the world» [17]. Типизация орнитофауны приведена по К. Фоусу [18].

Результаты и их обсуждение. Р.Ю. Тарлецкая [19] в ходе учетов в 1971–1975 гг. установила, что население ольшаников Белорусского Полесья включало 30 видов воробьинообразных птиц. Максимальная численность птиц отмечалась в ольшаниках крапивных (9,0 пар/га), минимальная – в кочедыжниковых (4,8 пар/га). По данным М.С. Долбика [20], в ольховых лесах 20–30-летнего возраста (28,8 га) на территории Белорусского Полесья в четырех типах леса и соответствующих им ассоциациях отмечалось 18 видов воробьинообразных птиц с населением в среднем 4,0 пар/га, с вариациями от 2 до 6,6 пар/га. Сведения о летней орнитофауне черноольховых лесов в юго-западной Беларуси содержатся в монографии [2]. Показано, что в ольсах в Малоритском лесхозе в 1990–2006 гг. обитало 52 вида птиц, суммарное обилие которых составляло 608,4 ос./км², в Беловежской пуще – соответственно 54 вида и 694,8 ос./км².

В.В. Сахвон [21], [22] установил, что в пойменных черноольховых лесах обитает 99 видов птиц, из которых 90 являются гнездящимися. При этом сообщество гнездящихся воробьинообразных птиц пойменных лесов характеризуется очень высокими значениями общей

плотности гнездования – 13,12–15,89 пар/га в монодоминантных черноольшаниках и 7,46–8,44 пар/га в черноольховых лесах с примесью ели, что значительно выше по сравнению с исследованиями других авторов [23] и нашими данными.

Сукцессия населения птиц протекает параллельно с закономерной сменой растительности и, прежде всего, доминирующих растений. Самые значительные изменения в орнито-комплексах происходят при изменении жизненных форм доминирующих растений (травы, кустарники, деревья).

Таблица 1 – Изменения населения птиц (ос./км²) в ходе вторичной сукцессии черноольховых лесов в юго-западной Беларуси

Вид	Возраст сукцессии, лет					
	1–3	4–9	10–20	30–40	50–60	70–80
Желтая трясогузка <i>Motacilla flava</i>	11,0	10,4	3,2	-	-	-
Лесной конек <i>Anthus trivialis</i>	10,1	12,4	5,4	3,0	16,7	18,0
Луговой конек <i>Anthus pratensis</i>	12,1	8,4	-	-	-	-
Луговой чекан <i>Saxicola rubetra</i>	13,6	16,3	-	-	-	-
Кряква <i>Anas platyrhynchos</i>	2,0	3,5	3,0	3,2	2,0	2,2
Чирок-свистунок <i>Anas crecca</i>	-	2,0	1,5	1,1	0,8	0,7
Чирок-трескунок <i>Spatula querquedula</i> *	-	1,0	0,8	0,5	0,6	0,6
Жулан <i>Lanius collurio</i>	3,4	3,8	5,2	2,0	1,4	0,6
Обыкновенная овсянка <i>Emberiza citrinella</i>	8,8	14,6	10,5	5,2	7,2	8,6
Тростниковая овсянка <i>Emberiza schoeniclus</i>	8,4	14,5	5,4	-	-	-
Камышевка-барсучок <i>Acrocephalus schoenobaenus</i>	5,6	4,2	1,0	-	-	-
Болотная камышевка <i>Acrocephalus palustris</i>	10,0	16,1	14,0	6,0	-	-
Зарянка <i>Erithacus rubecula</i>	-	4,7	8,5	29,0	32,5	36,3
Певчий дрозд <i>Turdus philomelos</i>	-	3,8	6,7	28,6	36,5	38,0
Лесная завирушка <i>Prunella modularis</i>	-	-	-	0,8	1,5	1,8
Речной сверчок <i>Locustella fluviatilis</i>	1,2	3,4	5,6	1,2	-	-
Обыкновенный соловей <i>Luscinia luscinia</i>	-	-	18,8	21,0	21,5	32,0
Варакушка <i>Luscinia svecica</i>	-	2,2	2,5	1,2	-	-
Черный дрозд <i>Turdus merula</i>	-	1,0	22,0	21,2	36,0	38,6
Рябинник <i>Turdus pilaris</i>	-	-	-	2,0	3,0	2,5
Серая славка <i>Sylvia communis</i>	10,5	12,4	3,2	6,5	34,2	35,6
Ястребиная славка <i>Sylvia nisoria</i>	-	1,8	2,0	2,4	2,0	2,4
Черноголовая славка <i>Sylvia atricapilla</i>	-	1,2	5,2	26,8	33,2	35,4
Садовая славка <i>Sylvia borin</i>	-	4,2	5,0	2,0	3,6	3,2
Обыкновенная пищуха <i>Certhia familiaris</i>	-	-	-	3,2	4,5	5,6
Поползень <i>Sitta europaea</i>	-	-	-	4,0	8,2	14,7
Скворец <i>Sturnus vulgaris</i>	-	-	-	10,0	16,4	28,0
Зяблик <i>Fringilla coelebs</i>	-	-	54,4	128,5	160,6	170,4
Обыкновенный дубонос <i>Coccothraustes coccothraustes</i>	-	-	-	7,8	12,6	14,7
Снегирь <i>Pyrrhula pyrrhula</i>	-	-	-	8,6	12,8	16,3
Обыкновенная чечевица <i>Carpodacus erythrinus</i>	2,8	3,5	1,2	-	-	-
Большая синица <i>Parus major</i>	-	-	5,6	22,0	42,5	46,4
Хохлатая синица <i>Lophophanes cristatus</i>	-	-	-	28,0	24,3	26,9
Буроголовая гаичка <i>Poecile montanus</i>	-	-	-	13,2	16,7	18,6
Белая лазоревка <i>Cyanistes cyanus</i> *	-	-	-	-	0,6	0,6
Лазоревка <i>Cyanistes caeruleus</i>	-	-	-	-	1,5	2,4
Черноголовая гаичка <i>Parus palustris</i>	-	-	-	-	18,5	16,6
Длиннохвостая синица <i>Aegithalos caudatus</i>	-	-	-	-	3,2	5,0
Пеночка-весничка <i>Phylloscopus trochilus</i>	-	-	18,3	60,2	70,4	70,2
Пеночка-теньковка <i>Phylloscopus collybita</i>	-	-	2,2	80,5	90,4	98,6
Пеночка-трещотка <i>Phylloscopus sibilatrix</i>	-	-	3,4	50,0	62,5	62,4
Серая мухоловка <i>Muscicapa striata</i>	-	-	-	36,5	38,0	40,5
Мухоловка-белошейка <i>Ficedula albicollis</i> *	-	-	-	-	0,5	1,0
Мухоловка-пеструшка <i>Ficedula hypoleuca</i>	-	-	-	23,0	28,6	30,5
Малая мухоловка <i>Ficedula parva</i>	-	-	-	-	1,8	2,0
Обыкновенная иволга <i>Oriolus oriolus</i>	-	-	-	2,0	6,4	6,6
Обыкновенный ремез <i>Remiz pendulinus</i>	-	-	-	5,8	6,4	7,5
Крапивник <i>Troglodytes troglodytes</i>	-	-	15,0	23,0	33,7	38,6
Зелёная пересмешка <i>Hippolais icterina</i>	-	-	-	-	0,6	1,0
Сойка <i>Garrulus glandarius</i>	-	-	-	0,6	1,4	2,5
Серая ворона <i>Corvus corone</i>	-	-	-	-	0,6	1,2
Сорока <i>Pica pica</i>	-	-	-	0,6	1,2	2,0

Окончание таблицы 1

Ворон <i>Corvus corax</i>	-	-	-	-	0,7	1,0
Клинтух <i>Columba oenas</i>	-	-	-	-	0,5	1,3
Обыкновенная горлица <i>Streptopelia turtur</i>	-	-	-	-	1,0	1,4
Вяхрь <i>Columba palumbus</i>	-	-	-	3,8	4,5	6,2
Черный стриж <i>Apus apus</i>	-	-	-	9,2	10,0	20,5
Седой дятел <i>Picus canus</i>	-	-	-	-	0,3	0,5
Средний дятел <i>Dendrocopos medius*</i>	-	-	-	-	0,8	1,2
Большой дятел <i>Dendrocopos major</i>	-	-	-	2,7	6,0	8,0
Зелёный дятел <i>Picus viridis*</i>	-	-	-	-	0,3	0,4
Малый дятел <i>Dendrocopos minor</i>	-	-	-	-	2,6	2,8
Белоспинный дятел <i>Dendrocopos leucotos*</i>	-	-	-	-	0,5	1,0
Желна <i>Dryocopus martius</i>	-	-	-	-	2,8	3,2
Вертишейка <i>Jynx torquilla</i>	-	-	-	-	4,0	4,2
Вальдшнеп <i>Scolopax rusticola</i>	-	-	-	-	1,2	2,0
Черныш <i>Tringa ochropus</i>	-	2,0	1,2	5,0	4,8	5,3
Рябчик <i>Bonasa bonasia</i>	-	-	-	-	5,8	5,5
Обыкновенная кукушка <i>Cuculus canorus</i>	-	-	-	3,0	4,8	5,6
Коростель <i>Crex crex*</i>	1,2	0,5	0,4	-	-	-
Серый журавль <i>Grus grus*</i>	0,4	1,2	1,5	2,0	1,2	1,3
Черный аист <i>Ciconia nigra*</i>	-	-	-	-	0,6	0,8
Обыкновенный канюк <i>Buteo buteo</i>	-	-	-	-	1,5	2,3
Тетеревятник <i>Accipiter gentilis</i>	-	-	-	-	1,2	1,5
Перепелятник <i>Accipiter nisus</i>	-	-	-	-	1,2	1,4
Малый подорожник <i>Clanga pomarina *</i>	-	-	-	-	0,3	0,3
Чеглок <i>Falco subbuteo *</i>	-	-	-	-	0,2	0,3
Черный коршун <i>Milvus migrans</i>	-	-	-	0,3	0,4	0,8
Орлан-белохвост <i>Haliaeetus albicilla</i>	-	-	-	0,4	0,5	0,6
Филин <i>Bubo bubo*</i>	-	-	-	-	0,3	0,5
Ушастая сова <i>Asio otus</i>	-	-	-	-	0,2	0,5
Болотная сова <i>Asio flammeus</i>	-	0,5	0,4	0,3	0,5	0,3
Серая неясыть <i>Strix aluco</i>	-	-	-	0,5	0,7	1,0
Количество видов	15	26	31	48	73	73
Суммарное обилие, ос./км ²	101,1 ± 0,3	149,6 ± 0,6	233,1 ± 0,7	698,4 ± 0,8	957,0 ± 1,4	1069,0 ± 1,5
Суммарная биомасса, кг/км ²	6,75 ± 0,8	15,52 ± 0,6	19,57 ± 0,3	36,33 ± 0,4	49,15 ± 0,5	58,74 ± 0,3

Примечание: * – виды, включенные в Красную книгу Республики Беларусь [24].

В первый же год на местах сплошных рубок резко изменяются микроклимат, видовой состав травянистой растительности и беспозвоночных животных. На месте свежей вырубki появляются птицы опушек и открытых пространств: лесной и луговой конек, луговой чекан и желтая трясогузка, которые являются доминирующими видами (таблица 2). Некоторые птицы (лесной конек, дрозды и др.) используют вырубki в качестве кормовых стаций. Всего было учтено 15 видов. Суммарное обилие составляет $101,1 \pm 0,3$ ос./км², на долю доминирующих видов приходится 56,8 % населения птиц и 33,3 % видового состава. Доминантами по обилию являются луговой чекан, луговой и лесной коньки, серая славка и желтая трясогузка (таблица 2). Суммарная биомасса равна 6,75 кг/км². По биомассе доминируют кряква и серый журавль, на долю которых приходится свыше 70 % суммарного показателя.

На стадии молодых культур (4–9 лет) появляются птицы кустарниковых зарослей: серая и садовая славки, обыкновенный жулан. Количество видов возрастает до 26, суммарное обилие увеличивается в 1,5 раза и составляет $149,6 \pm 0,7$ ос./км². Доминируют луговой чекан (10,9 %) и болотная камышевка (10,8 %). Доминирующие виды составляют 21,7 % численности птиц и 7,7 % видового состава. Суммарная биомасса увеличивается в 2,3 раза, на долю доминирующих по биомассе видов (кряква и серый журавль) приходится 71,2 %.

В молодых культурах 10–20 лет зарегистрирован 31 вид птиц, суммарное обилие продолжает расти ($233,1 \pm 0,7$ ос./км²). Начиная с этой стадии по численности доминирует зяблик (23,3 % суммарного обилия). По биомассе доминируют кряква, серый журавль и черный дрозд (таблица 2).

К 30–40 годам на месте вырубki развивается черноольховый лес, в котором доминируют черная ольха с примесью березы и других пород. Орнитоценоз приобретает характерный облик для данного типа леса. В состав орнитокомплекса входит 48 видов, по мере развития древесной

растительности по ходу сукцессии в его составе начинают господствовать дендрофильные виды, по численности доминируют зяблик (18,4 %) и пеночка-теньковка (11,5 %). Начиная с третьей стадии сукцессии, по доле в суммарной биомассе доминирует только один вид (серый журавль).

Дальнейшее увеличение основных суммарных показателей (количество видов, обилие, биомасса) отмечено в высокоствольном лесу (50–60 лет). Орнитоценоз на этой стадии обогащается новыми видами, возрастают обилие населения птиц ($957,0 \pm 1,4$ ос./км²) и суммарная биомасса ($49,15 \pm 0,5$ кг/км²). По обилию доминирует зяблик (17,5 %).

На стадии спелого леса (70–80 лет) эти показатели несколько выше (таблица 1, 2). Суммарное обилие составляет $1069,0 \pm 1,5$ ос./км², биомасса $58,74 \pm 0,3$ кг/км². По обилию доминирует зяблик 15,4 %, а по биомассе – серый журавль – 12,3 % (таблица 2). В спелом ольховом лесу птицы заселяют все ярусы. Есть птицы, которые гнездятся и добывают корм на земле, на поваленных деревьях или валежнике, на кустарниках и подлеске, многие гнездятся в дуплах и кронах деревьев, в последних добывают корм.

Таблица 2 – Динамика доминирования видов птиц в ольховых лесах летом в процессе сукцессии, %

Вид	Возраст сукцессии					
	1–3	4–9	10–20	30–40	50–60	70–80
Доля от суммарного обилия, %						
Желтая трясогузка	10,9	-	-	-	-	-
Лесной конек	10,0	-	-	-	-	-
Луговой конек	12,0	-	-	-	-	-
Серая славка	10,4	-	-	-	-	-
Луговой чекан	13,5	10,9	-	-	-	-
Болотная камышевка	-	10,8	-	-	-	-
Зяблик	-	-	23,3	18,4	16,8	15,9
Пеночка-теньковка	-	-	-	11,5	-	-
Доля от суммарной биомассы, %						
Кряква	37,9	28,9	19,6	-	-	-
Серый журавль	32,4	42,3	42,0	30,1	13,4	12,1
Черный дрозд	-	-	11,0	-	-	-

Оценка сходства видового состава сообщества птиц на разных стадиях вторичной сукцессии (с использованием коэффициента Жаккара) показала, что наибольшее сходство отмечено между сообществами, формирующимися на двух последних стадиях сукцессии (1,0), а также между сообществами возраста 4–9 и 10–20 лет (таблица 3).

Таблица 3 – Сходство видового разнообразия орнитоценозов в ходе вторичной сукцессии черно-ольховых лесов

Возраст сукцессии, лет	Возраст сукцессии, лет				
	4–9	10–20	30–40	50–60	70–80
1–3	0,58	0,39	0,15	0,07	0,07
4–9		0,72	0,35	0,19	0,19
10–20			0,49	0,28	0,28
30–40				0,52	0,52
50–60					1,0

Рассмотрим фаунистическую структуру орнитокомплексов на разных стадиях сукцессии. Как показали наши исследования, на первых трех стадиях сукцессии орнитоценоз включает представителей четырех типов фаун: европейского, европейско-туркестанского, голарктического и палеарктического (таблица 4). На стадии свежей вырубki (1–3 года) и молодого леса и кустарников (4–9 лет) по количеству видов и численности преобладают виды орнитокомплексов палеарктического (35,6–39,3 % суммарного обилия) и европейского типов фауны (33,0–36,5 %), по биомассе доминируют виды палеарктического типа фауны (в сумме они составляют 44,4–54,6 %), на долю единственного представителя голарктического типа фауны (кряква) приходится около 1/3 суммарной биомассы (таблица 4). На четырех последующих стадиях сукцессии доминируют виды палеарктического типа фауны (54,8–58,3 % общего количества видов, 47,7–53,3 % суммарного обилия и 55,0–64,5 % суммарной биомассы), на второе место по численности выходят виды, относящиеся к европейско-туркестанскому типу (31,5–32,0 %). Участие в суммар-

ной биомассе птиц голарктического комплекса по мере развития сукцессии снижается (на третьей стадии биомасса этой группы птиц составляет 23,1 %, на двух последних – около 11 %). Сибирский и афро-евразийский типы фауны представлены двумя видами каждый, их участие в совокупных показателях населения птиц (суммарное обилие, суммарная биомасса) незначительно.

Таблица 4 – Фаунистическая структура орнитокомплексов на разных стадиях сукцессии ольховых лесов (доля, %)

Тип фауны	Возраст сукцессии (лет)					
	1–3	4–9	10–20	30–40	50–60	70–80
Европейский	<u>36,5</u> 10,7	<u>33,0</u> 6,6	<u>12,4</u> 4,4	<u>19,8</u> 9,2	<u>16,8</u> 8,5	<u>15,8</u> 7,5
Европейско-туркестанский	<u>25,9</u> 6,9	<u>23,7</u> 4,2	<u>32,0</u> 8,0	<u>31,5</u> 19,0	<u>32,0</u> 19,4	<u>31,8</u> 20,4
Голарктический	<u>2,0</u> 37,9	<u>4,0</u> 34,6	<u>2,1</u> 23,1	<u>0,7</u> 12,6	<u>0,6</u> 10,8	<u>0,7</u> 10,9
Палеарктический	<u>35,6</u> 44,4	<u>39,3</u> 54,6	<u>53,3</u> 64,5	<u>47,7</u> 58,1	<u>49,2</u> 55,0	<u>50,4</u> 55,6
Сибирский	-	-	-	-	<u>0,7</u> 4,5	<u>0,6</u> 3,6
Афро-евразийский	-	-	-	<u>0,3</u> 1,1	<u>0,7</u> 1,6	<u>0,7</u> 2,0

Примечание: в числителе – доля в населении птиц, в знаменателе – доля в суммарной биомассе

На финальной стадии сукцессии отмечены 12 видов, включенных в Красную книгу Республики Беларусь [24], которые имеют и Международную природоохранную значимость: черный аист, малый подорлик, чеглок, зеленый дятел, белоспинный дятел, мухоловка-белошейка и белая лазоревка и др., включая два вида приложения Красной книги.

Заключение. Исследования сукцессии орнитокомплексов черноольховых лесов в юго-западной Беларуси и анализ литературных данных показал, что смена населения птиц в лесах обуславливается последовательной сукцессией лесных биоценозов. В процессе вторичной сукцессии ольховых лесов выделено 6 стадий развития растительности от свежей вырубki до леса 80-летнего возраста. Параллельно с закономерной сменой растительности протекает и сукцессия орнитокомплексов. Свежую вырубку заселяют птицы открытых пространств и опушек леса: лесной и луговой конек, луговой чекан, желтая трясогузка и др. (всего 15 видов). Суммарное обилие на этой стадии равно 101,1 ос./км², суммарная биомасса – 6,75 кг/км². На стадии молодых культур выявлено 26 видов птиц, суммарное обилие которых составляет 149,6 ос./км², биомасса – 15,52 кг/км². На стадии леса 10–20 лет количество видов возрастает до 31, суммарное обилие достигает 233,1 ос./км², биомасса – 19,57 кг/км². На последующих стадиях эти показатели прогрессивно увеличиваются, достигая максимальных значений на стадии спелого леса. На этой стадии отмечено 73 вида птиц, суммарное обилие которых составляет 1069 ос./км², биомасса – 58,74 кг/км².

На стадиях свежей вырубki молодых культур и кустарников преобладают птицы палеарктического (35,6–39,3 % суммарного обилия) и европейского типов фауны (33,0–36,5 %). На четырех последующих стадиях сукцессии доминируют виды палеарктического типа фауны (54,8–58,3 % общего количества видов, 47,7–53,3 % суммарного обилия и 55,0–64,5 % суммарной биомассы), на второе место по численности выходят виды, относящиеся к европейско-туркестанскому типу (31,5–32,0 %). В спелых черноольховых лесах обитают 12 видов птиц, включенных в Красную книгу Республики Беларусь [24], которые имеют международную природоохранную значимость, что определяет роль данных фитоценозов в сохранении биологического разнообразия региона.

Литература

1. Иноземцев, А.А. Птицы и лес / А.А. Иноземцев. – М. : Агропромиздат, 1987. – 302 с.
2. Абрамова, И.В. Структура и динамика населения птиц экосистем юго-запада Беларуси / И.В. Абрамова. – Брест : БрГУ, 2007. – 208 с.
3. Тарлецкая, Р.Ю. Влияние осушительной мелиорации на численность лесных воробьиных птиц / Р.Ю. Тарлецкая // Биологические основы освоения, реконструкции и охраны животного мира Белоруссии : тез. IV зоол. конф. Белорусской ССР. – Минск, 1976. – С. 133–135.

4. Данилов, Н.Н. Изменения в орнитофауне зарастающих вырубок на Среднем Урале / Н.Н. Данилов // Зоол. журнал, 1958. – Т. 37. – Вып. 12. – С. 1898–1903.
5. Новиков, Г.А. Экология зверей и птиц лесостепных дубрав / Г.А. Новиков. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1959. – 350 с.
6. Богуйский, З. Вторичная сукцессия сообществ птиц, гнездящихся в сухих сосновых лесах в Польше / З. Богуйский, Я. Беднорз // XVIII Междунар. орнитол. конгресс: тез. докл. – М. : Наука, 1982. – С. 134–135.
7. Преображенская, Е.С. Смены птичьего населения в ходе зарастания различных типов вырубок Приветлужья / Е.С. Преображенская, Б.И. Борисов // Влияние антропогенной трансформации ландшафта на население наземн. позвоночных животных : тез. Всес. совещ. – М., 1987. – Ч. 2. – С. 157–158.
8. Głowaciński, Z. Some ecological parameters of avian communities in the succession series of a cultivated pine forest / Z. Głowaciński // Bull. Acad. Pol. sci., ser. sci. biol. – 1979. – Vol. 27, № 3. – P. 169–177. – № 2. – 1975. – P. 231–263.
9. Głowaciński, Z. Stability in bird communities during the secondary succession of a forest ecosystem / Z. Głowaciński // Ecol. Pol. – Vol. 29, № 1, 1981. – P. 73–95.
10. Абрамова, И.В. Сукцессия населения птиц в ходе восстановительной смены еловых лесов в юго-западной части Беларуси / И.В. Абрамова // Журн. Белорус. гос. ун-та. География. Геология, 2017. – № 2. – С. 31–39.
11. Юркевич, И.Д. Растительность Белоруссии и её картографирование, охрана и использование / И.Д. Юркевич, Д.С. Голод, В.С. Адерихо. – Минск : Наука и техника, 1979. – 248 с.
12. Стрелков, А.З. Возрастная структура ольсов Беловежской пуши / А.З. Стрелков, В.Н. Толкач, В.П. Остапук // Заповедники Беларуси, 1993. – Вып. 16. – Минск : Ураджай. – С. 3–8.
13. Кузякин, А.П. Зоогеография СССР / А.П. Кузякин // Учен. зап. Моск. обл. пед. ин-та им. Н.К. Крупской. – М., 1962. – Т. 109. – С. 3–182.
14. Равкин, Ю.С. К методике учёта птиц лесных ландшафтов / Ю.С. Равкин // Природа очагов клещевого энцефалита на Алтае. – Новосибирск, 1967. – С. 66–75.
15. Бибби, К. Методы полевых экспедиционных исследований. Исследования и учёт птиц / К. Бибби, М. Джонс, С. Мардсен. – М. : Союз охраны птиц России, 2000. – 186 с.
16. Järvinen, O. Finnish line transect censuses / O. Järvinen, R. Väisänen // Ornis fenn. – 1976. – Vol. 53, № 4. – P. 115–118.
17. The eBird/Clements checklist of birds of the world: v2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.birds.cornell.edu/clementschecklist/august-2017/>. – Дата доступа : 15.05.2018.
18. Voous, K.H. Die Vogelwelt Europas / K.H. Voous. – Hamburg, Berlin, 1962. – 284 s.
19. Тарлецкая, Р.Ю. Численность воробьиных птиц в лесах Белорусского Полесья / Р.Ю. Тарлецкая // Биологические основы освоения, реконструкции и охраны животного мира Белоруссии : тез. IV зоол. конф. Белорусской ССР. – Минск, 1976. – С. 135–137.
20. Долбик, М.С. Ландшафтная структура орнитофауны Белоруссии / М.С. Долбик. – Минск : Наука и техника, 1974. – 312 с.
21. Сахвон, В.В. Экологическая характеристика сообществ птиц пойменных лесов Беларуси : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.02.08 / В.В. Сахвон ; НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам. – Минск, 2011. – 25 с.
22. Сахвон, В.В. Характеристика орнитофауны пойменных лесов Беларуси / В.В. Сахвон // Экология, эволюция и систематика животных : мат. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Рязань : НП «Голос губернии», 2009. – С. 268–269.
23. Равкин, Е.С. Пространственное разнообразие летнего населения птиц Восточно-Европейских и Западно-Сибирских равнин / Е.С. Равкин, И.И. Бышнев, С.К. Качанов [и др.] // Достижения и проблемы орнитологии Северной Евразии на рубеже веков : тр. межд. конф. «Актуальные проблемы изучения и охраны птиц Восточной Европы и Северной Азии». – Казань, 2001. – С. 212–236.
24. Красная книга Республики Беларусь. Животные : редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды диких животных / гл. редкол. : И.М. Качановский (предс.), М.Е. Никифоров, В.И. Парфенов [и др.]. – 4 изд. – Минск : Беларус. Энцыкл. імя П. Броўкі, 2015. – 320 с.

УДК 594.38:577.1(476.5)

Особенности обмена веществ *Lymnaea stagnalis* в зависимости от сезона года и местообитания

О.М. БАЛАЕВА-ТИХОМИРОВА, Е.И. КАЦНЕЛЬСОН

Lymnaea stagnalis по комплексу критериев относят к перспективным объектам используемым в биоиндикации при оценке состояния водных экосистем. Изучение структурно-функциональных характеристик повсеместно распространенного вида легочных пресноводных моллюсков в зависимости от сезонных и антропогенных факторов среды обитания позволит расширить и дополнить имеющиеся данные о возможности их использования в биомониторинге в качестве тест-систем.

Ключевые слова: легочные моллюски, *Lymnaea stagnalis*, азотный обмен, углеводный обмен, антиоксидантная система, сезон года, местообитание.

Lymnaea stagnalis is classified by a set of criteria as perspective objects used in bioindication when assessing the state of aquatic ecosystems. The study of the structural and functional characteristics of the ubiquitous type of pulmonary freshwater mollusks depending on the seasonal and anthropogenic factors of the habitat will expand and supplement the available data on the possibility of using them in biomonitoring as test systems.

Keywords: pulmonary mollusks, *Lymnaea stagnalis*, nitrogen metabolism, carbohydrate metabolism, antioxidant system, season of the year, habitat.

Антропогенная нагрузка оказывает неблагоприятное воздействие на процесс функционирования водных экосистем. Пресноводные моллюски являются важнейшей составляющей большинства водных биоценозов и применяются для биоиндикации загрязнения окружающей среды. Большая численность и широкая распространенность в различных географических районах, легкость сбора и идентификации, короткий жизненный цикл, высокая чувствительность к загрязнению позволяют использовать легочных пресноводных моллюсков в практике пассивного и активного биомониторинга [1], [2].

Lymnaea stagnalis широко распространенный вид легочных пресноводных моллюсков, который эффективно используется в качестве тест-организмов для оценки биоразнообразия водной фауны Беларуси и биоэкологических исследований путем изучения структурно-физиологических показателей моллюсков как компонента биоиндикации водоемов. Актуальность данного исследования заключается в установлении закономерностей изменений азотного, углеводного обменов и активности антиоксидантной системы в тканях *Lymnaea stagnalis* в зависимости от факторов окружающей среды и степени антропогенной нагрузки, связанной с местообитанием данного вида как критерием для оценки условий и экологической характеристики природных водоёмов [3], [4].

Цель – изучить влияние сезонных и антропогенных факторов среды обитания на метаболизм *Lymnaea stagnalis*.

Материал и методы. Опыты поставлены на особях *Lymnaea stagnalis* (прудовик обыкновенный). Моллюски собирались весной (апрель-май), летом (июль) и осенью (сентябрь-октябрь) из водоемов шести районов Витебской области (таблица 1). В каждой исследовательской подгруппе содержалось по 9 моллюсков.

Таблица 1 – Места отбора моллюсков

Район сбора моллюсков	Место сбора	Название водоема
Витебский р-н	г. Витебск	р. Витьба
Дубровенский р-н	д. Ляды	оз. Вордовье
Бешенковичский р-н	д. Сокорово	оз. Малое
Ушачский р-н	д. Дубровка	оз. Дубровское
Шумилинский р-н	а/г Башни	оз. Будовесть
Сенненский р-н	г. Сенно	оз. Сенненское

Определение показателей гемолимфы проводили стандартными биохимическими реакциями с использованием наборов реагентов НТПК «Анализ Х» (общий белок, мочевиная кислота), «Мочевина-01-Витал» (мочевина) [5]. Уровень глюкозы в гемолимфе выявляли глюкозооксидазным методом наборами фирмы Диакон Диасис [5]. **Определение концентрации белка** (мг/г ткани) **проводили по методу Лоури** [6]. Содержание ДНК и РНК (мг/г ткани) устанавливали по методу Blober и Potter [7]. Гликоген определяли методом Krisman [8]. Для количественного установления продуктов перекисного окисления липидов использовали тест с 2-тиобарбитуровой кислотой [9]. Активность каталазы (1.11.1.6) выявляли по реакции с молибдатом аммония [10]. Определение количества восстановленного глутатиона проводили по реакции взаимодействия GSH с ДТНБК (5,5'-дитио-бис-2-нитробензойной кислотой) с образованием окрашенного в желтый цвет аниона 2-нитро-5-тиобензоата [11].

Математическую обработку полученных результатов проводили методами параметрической и непараметрической статистики с использованием пакета статистических программ Microsoft Excel 2010, STATISTICA 12.5.

Результаты исследования. Содержание общего белка в гемолимфе легочных пресноводных моллюсков зависит от сезона года. Установлено, что наибольшее содержание данного показателя фиксируется в весенний период, наименьшее значения – в летний период сбора моллюсков (таблица 2).

Таблица 2 – Содержание общего белка (мг/мл) в гемолимфе *Lymnaea stagnalis* ($M \pm m$)

Район сбора	Сезон года		
	Весна (n = 9)	Лето (n = 9)	Осень (n = 9)
Витебский р-н	14,03 ± 0,22 ¹	11,35 ± 0,16	15,87 ± 0,25 ¹
Дубровенский р-н	13,14 ± 0,33 ¹	10,05 ± 0,18	14,14 ± 0,17 ¹
Бешенковичский р-н	13,58 ± 0,12 ¹	10,72 ± 0,27	14,62 ± 0,22 ¹
Ушачский р-н	13,59 ± 0,11 ¹	9,95 ± 0,65	14,35 ± 0,19 ¹
Шумилинский р-н	14,48 ± 0,28 ¹	11,80 ± 0,30	14,93 ± 0,24 ¹
Сенненский р-н	14,54 ± 0,17 ¹	10,24 ± 0,15	15,16 ± 0,21 ¹

Примечание – ¹p < 0,05 по сравнению с летним периодом сбора моллюсков.

Содержание общего белка в гемолимфе *Lymnaea stagnalis* имеет общую закономерность во всех исследованных районах: концентрация белка снижается в летний период времени и повышается весной и осенью, что связано с активацией обмена веществ, в благоприятный для жизнедеятельности, менее стрессовый летний период времени.

Концентрация мочевины в гемолимфе связана со временем сбора *Lymnaea stagnalis*. Установлено, что наибольшее содержание данного показателя фиксируется в летний период, наименьшее значения – в весенний период сбора моллюсков (таблица 3). Мочевина, основной продукт распада белков, синтезируемый печенью из аммиака.

Таблица 3 – Содержание мочевины (ммоль/л) в гемолимфе *Lymnaea stagnalis* ($M \pm m$)

Район сбора	Сезон года		
	Весна (n = 9)	Лето (n = 9)	Осень (n = 9)
Витебский р-н	5,93 ± 0,17 ¹	7,14 ± 0,11	6,05 ± 0,03 ¹
Дубровенский р-н	6,37 ± 0,12 ¹	8,22 ± 0,12	6,55 ± 0,05 ¹
Бешенковичский р-н	6,33 ± 0,07 ¹	8,04 ± 0,19	6,98 ± 0,06 ¹
Ушачский р-н	6,15 ± 0,14 ¹	7,42 ± 0,13	6,45 ± 0,11 ¹
Шумилинский р-н	6,87 ± 0,16 ¹	7,86 ± 0,11	6,65 ± 0,18 ¹
Сенненский р-н	6,95 ± 0,16 ¹	8,94 ± 0,13	6,78 ± 0,04 ¹

Примечание – ¹p < 0,05 по сравнению с летним периодом сбора моллюсков.

Концентрация мочевины в гемолимфе моллюсков также зависит от рациона питания. *Lymnaea stagnalis* питаются преимущественно осадочным детритом, который представляет собой мелкие органические частицы, состоящие из остатков, разложившихся животных, растений вместе с содержащимися в них бактериями, осевшие на дно водоема или взвешенные в толще воды. При увеличении в составе детрита белкового компонента содержание мочевины возрастает, при увеличении растительного компонента – уровень мочевины снижается. Содержание органического детрита изменяется по сезонам года. В весенний и осенние периоды преобладает растительный компонент, в летнее время в биогенных остатках преобладает животный компонент, поэтому уровень мочевины в гемолимфе легочных моллюсков в летом выше, чем весной и осенью.

Содержание мочевой кислоты в гемолимфе имеет сезонный характер изменений. Установлено, что наибольшее содержание данного показателя фиксируется в весенний период, наименьшее значения – в осенний период сбора моллюсков (таблица 4). Уровень мочевой кислоты говорит о состоянии здоровья исследуемого организма. Сдвиги содержания данного продукта обмена в крови как в сторону повышения, так и в сторону понижения, зависят от двух процессов: образования кислоты в печени и времени выведения ее, которое могут изменяться вследствие различных неблагоприятных внешних воздействий факторов окружающей среды.

Таблица 4 – Содержание мочевой кислоты (мкмоль/л) в гемолимфе прудовика обыкновенного ($M \pm m$)

Район сбора	Сезон года		
	Весна (n = 9)	Лето (n = 9)	Осень (n = 9)
Витебский р-н	74,47 ± 1,48 ^{1,2}	45,56 ± 2,33	25,46 ± 0,64 ¹
Дубровенский р-н	77,61 ± 1,02 ^{1,2}	54,58 ± 1,74	35,31 ± 0,49 ¹
Бешенковичский р-н	69,60 ± 1,37 ^{1,2}	45,26 ± 0,57	26,23 ± 0,78 ¹
Ушачский р-н	72,58 ± 1,30 ^{1,2}	48,04 ± 2,02	28,75 ± 0,57 ¹
Шумилинский р-н	74,82 ± 1,34 ^{1,2}	50,12 ± 1,60	30,36 ± 0,76 ¹
Сенненский р-н	77,85 ± 1,16 ^{1,2}	55,38 ± 1,46	36,25 ± 0,38 ¹

Примечание – ¹p < 0,05 по сравнению с летним периодом сбора моллюсков; ²p < 0,05 по сравнению с осенним периодом сбора моллюсков.

По сравнению с летним периодом сбора у прудовика обыкновенного повышено содержание мочевой кислоты в весенний период в 1,5 раза у особей из всех исследуемых районов. По сравнению с летним периодом сбора в моллюсках понижено содержание мочевой кислоты в осенний период в 1,8 раза Витебский район, 1,6 раза Дубровенский и Сенненский районы, 1,7 раза Бешенковичский, Ушачский, Шумилинский районы. При сравнении с осенним периодом содержание мочевой кислоты в гемолимфе прудовика обыкновенного в весенний период статистически значимые отличия получены в Витебском, и Бешенковичском районах в 2,8 раза, Дубровенском и Сенненском районах в 2,2 раза, Ушачском и Шумилинском – в 2,5 раза. Обнаружено выраженное увеличение концентрации мочевой кислоты в гемолимфе по сравнению с осенним периодом сбора к весеннему. Положительное действие гиперурикемии, высокий уровень пуринового продукта обмена в крови, благоприятно влияет на организм.

Установлено, что содержание РНК в гепатопанкреасе прудовика обыкновенного зависит от сезона года, наибольшее содержание данного показателя отмечается в весенний период, наименьшее значения – в осенний период сбора моллюсков (таблица 5). Содержание РНК весной оказалось наиболее низким у прудовиков, собранных в Сенненском районе.

Таблица 5 – Содержание РНК (мг/г) в гепатопанкреасе *Lymnaea stagnalis* ($M \pm m$)

Район сбора моллюсков	Сезон года		
	Весна (n = 9)	Лето (n = 9)	Осень (n = 9)
Витебский р-н	9,07 ± 0,42 ^{1,2}	7,06 ± 0,16	5,74 ± 0,24 ¹
Дубровенский р-н	10,33 ± 0,36 ²	8,46 ± 0,27	6,77 ± 0,25 ¹
Бешенковичский р-н	8,83 ± 0,34 ²	7,82 ± 0,26	6,53 ± 0,48 ¹
Ушачский р-н	10,17 ± 0,30 ²	9,18 ± 0,30	7,28 ± 0,44 ¹
Шумилинский р-н	9,05 ± 0,41 ¹	6,73 ± 0,23	7,46 ± 0,28 ¹
Сенненский р-н	8,04 ± 0,21 ^{1,2}	7,37 ± 0,18	5,89 ± 0,34 ¹

Примечание – ¹p < 0,05 по сравнению с летним периодом сбора моллюсков; ²p < 0,05 по сравнению с осенним периодом сбора моллюсков.

Из таблицы 5 видно, что по сравнению с летним периодом сбора в моллюсках повышено содержание РНК в весенний период в 1,3 раза в Витебском, Дубровенском и Шумилинском районах. Аналогичные изменения зафиксированы при сравнении летнего периода сбора моллюсков с осенним. По сравнению с осенним периодом содержание РНК прудовика обыкновенного в весенний период статистически значимые отличия получены в 1,6 раза Витебском, Дубровенском районах и в 1,4 раза в Ушачском, Сенненском районах. Высокое содержание РНК весной может свидетельствовать об усиленном биосинтезе белков в клетках тканей гепатопанкреаса после выхода из гипобиоза.

Содержание ДНК в тканях гепатопанкреаса имело противоположную динамику по сравнению с сезонной динамикой РНК. Самое низкое содержание ДНК в тканях гепатопанкреаса *Lymnaea stagnalis* было отмечено в весенний период (таблица 6).

Таблица 6 – Содержание ДНК (мг/г) в гепатопанкреасе *Lymnaea stagnalis* ($M \pm m$)

Район сбора моллюсков	Сезон года		
	Весна (n = 9)	Лето (n = 9)	Осень (n = 9)
Витебский р-н	1,74 ± 0,04 ^{1,2}	2,09 ± 0,04	2,49 ± 0,03 ¹
Дубровенский р-н	1,13 ± 0,03 ^{1,2}	1,21 ± 0,02	1,43 ± 0,03 ¹
Бешенковичский р-н	1,63 ± 0,05 ^{1,2}	1,79 ± 0,03	1,97 ± 0,05 ¹
Ушачский р-н	1,40 ± 0,07 ^{1,2}	1,85 ± 0,05	1,93 ± 0,03 ¹
Шумилинский р-н	1,96 ± 0,04 ^{1,2}	2,02 ± 0,05	2,44 ± 0,08 ¹
Сенненский р-н	1,54 ± 0,03 ^{1,2}	1,72 ± 0,04	2,07 ± 0,06 ¹

Примечание – ¹p < 0,05 по сравнению с летним периодом сбора моллюсков; ²p < 0,05 по сравнению с осенним периодом сбора моллюсков.

В последующие сезоны происходило постепенное увеличение содержания ДНК в клетках гепатопанкреаса моллюсков. Такая динамика связана с утратой небольшого количества клеток в процессе зимнего гипобиоза. В этом случае весеннее повышение содержания РНК в клетках гепатопанкреаса может являться приспособительной реакцией для поддержания синтеза белков в рамках белкового гомеостаза организма моллюсков.

Наибольшее содержание общего белка в гемолимфе установлено в осенний период, наименьшее – в летний период сбора моллюсков (таблица 7).

Таблица 7 – Содержание общего белка (мг/г) в гепатопанкреасе *Lymnaea stagnalis* ($M \pm m$)

Район сбора моллюсков	Сезон года		
	Весна (n = 9)	Лето (n = 9)	Осень (n = 9)
Витебский р-н	271 ± 7,6 ^{1,2}	186 ± 8,8	323 ± 21,7 ¹
Дубровенский р-н	196 ± 4,7 ^{1,2}	120 ± 8,7	228 ± 7,8 ¹
Бешенковичский р-н	191 ± 5,6 ^{1,2}	150 ± 9,7	235 ± 10,9 ¹
Ушачский р-н	184 ± 3,2 ^{1,2}	131 ± 4,8	169 ± 9,2 ¹
Шумилинский р-н	164 ± 6,0 ^{1,2}	100 ± 9,3	203 ± 4,3 ¹
Сенненский р-н	203 ± 6,7 ^{1,2}	160 ± 5,7	263 ± 6,5 ¹

Примечание – ¹p < 0,05 по сравнению с летним периодом сбора моллюсков; ²p < 0,05 по сравнению с осенним периодом сбора моллюсков.

По сравнению с летним периодом сбора в гепатопанкреасе моллюсков повышено содержание общего белка в весенний период в 1,5 раза Витебском, Дубровенском, Ушачском, Шумилинском районах. По сравнению с летним периодом сбора у моллюсков повышено содержание общего белка в осенний период в 1,7 раза Витебский район, 1,9 раза Дубровенский район, 1,6 раза Бешенковичский и Сенненский район, 2,03 раза Шумилинский район.

Содержание глюкозы в гемолимфе прудовика обыкновенного зависит от сезона сбора *Lymnaea stagnalis*. Установлено, что наибольшее содержание данного показателя отмечается в весенний период, наименьшее значения – в осенний период сбора моллюсков (таблица 8).

Таблица 8 – Содержание глюкозы (ммоль/л) в гемолимфе *Lymnaea stagnalis* ($M \pm m$)

Район сбора моллюсков	Сезон года		
	Весна (n=9)	Лето (n = 9)	Осень (n = 9)
Витебский р-н	0,93 ± 0,006 ^{1,2}	0,60 ± 0,035	0,41 ± 0,037 ¹
Дубровенский р-н	0,82 ± 0,012 ^{1,2}	0,51 ± 0,042	0,36 ± 0,026 ¹
Бешенковичский р-н	0,76 ± 0,088 ^{1,2}	0,53 ± 0,027	0,34 ± 0,025 ¹
Ушачский р-н	0,70 ± 0,056 ^{1,2}	0,55 ± 0,047	0,37 ± 0,012 ¹
Шумилинский р-н	1,05 ± 0,044 ^{1,2}	0,80 ± 0,034	0,54 ± 0,045 ¹
Сенненский р-н	0,88 ± 0,093 ^{1,2}	0,64 ± 0,034	0,40 ± 0,056 ¹

Примечание – ¹p < 0,05 по сравнению с летним периодом сбора моллюсков; ²p < 0,05 по сравнению с осенним периодом сбора моллюсков.

По сравнению с летним периодом сбора в моллюсках повышено содержание глюкозы в весенний период в 1,6 раза в Витебском и Дубровенском районах, в 1,3 раза в Бешенковичском, Ушачском, Шумилинском и Сенненском районах. По сравнению с летним периодом сбора в моллюсках понижено содержание глюкозы в осенний период в среднем в 1,5 раза во всех исследуемых районах. При сравнении с осенним периодом содержание глюкозы у прудовика обыкновенного в весенний период статистически значимые отличия получены в 2,3 раза в Витебском, Дубровенском, Бешенковичском, Сенненском районах и в 1,9 раза в Ушачском и Шумилинском районах (таблица 8).

Концентрация гликогена в гепатопанкреасе *Lymnaea stagnalis* имела противоположную динамику по сравнению с сезонной динамикой глюкозы. Установлено, что наибольшее содержание данного показателя отмечается в осенний период, наименьшее значение – в весенний период сбора моллюсков (таблица 9) и имеет обратную динамику по сравнению с содержанием глюкозы в гемолимфе.

Таблица 9 – Содержание гликогена (мг/г) в гепатопанкреасе *Lymnaea stagnalis* ($M \pm m$)

Район сбора моллюсков	Сезон года		
	Весна (n = 9)	Лето (n = 9)	Осень (n=9)
Витебский р-н	23,11 $\pm$ 0,174 ²	26,21 $\pm$ 0,182	27,42 $\pm$ 0,612
Дубровенский р-н	24,66 $\pm$ 0,287 ²	26,98 $\pm$ 0,169	28,15 $\pm$ 0,481
Бешенковичский р-н	24,81 $\pm$ 0,214 ²	27,13 $\pm$ 0,218	29,72 $\pm$ 0,512
Ушачский р-н	24,46 $\pm$ 0,186 ²	27,09 $\pm$ 0,281	28,27 $\pm$ 0,544
Шумилинский р-н	21,35 $\pm$ 0,344 ²	24,32 $\pm$ 0,261	27,01 $\pm$ 0,358
Сенненский р-н	23,74 $\pm$ 0,342 ²	26,15 $\pm$ 0,138	27,22 $\pm$ 0,282

Примечание – ¹p < 0,05 по сравнению с летним периодом сбора моллюсков; ²p < 0,05 по сравнению с осенним периодом сбора моллюсков.

Статистически значимых отличий в содержании гликогена в гепатопанкреасе *Lymnaea stagnalis* не обнаружено при сравнении содержания гликогена в летний сезон сбора с весенним и осенним сезонами. По сравнению с осенним периодом содержание гликогена у прудовика обыкновенного в весенний период повышено в 1,2 раза во всех исследуемых районах (таблица 9).

ТБК-ПВ является показателем по содержанию которого судят о степени развития окислительного стресса. Отмечено, самые низкие показатели зафиксированы в летнее время, что связано с наиболее оптимальными условиями для жизнедеятельности моллюсков (таблица 10).

Таблица 10 – Содержание ТБК-ПВ (мкмоль/г) в гепатопанкреасе *Lymnaea stagnalis* ($M \pm m$)

Район сбора моллюсков	Сезон года		
	Весна (n = 9)	Лето (n = 9)	Осень (n = 9)
Витебский р-н	9,32 $\pm$ 0,47 ^{1,2}	3,56 $\pm$ 0,24	5,18 $\pm$ 0,26 ¹
Дубровенский р-н	5,34 $\pm$ 0,21 ¹	2,67 $\pm$ 0,18	4,22 $\pm$ 0,34 ¹
Бешенковичский р-н	5,77 $\pm$ 0,36 ¹	3,36 $\pm$ 0,45	5,74 $\pm$ 0,23 ¹
Ушачский р-н	7,42 $\pm$ 0,35 ^{1,2}	3,83 $\pm$ 0,50	5,37 $\pm$ 0,41 ¹
Шумилинский р-н	9,21 $\pm$ 0,55 ^{1,2}	3,42 $\pm$ 0,26	5,30 $\pm$ 0,38 ¹
Сенненский р-н	5,86 $\pm$ 0,28 ¹	2,87 $\pm$ 0,27	4,32 $\pm$ 0,26 ¹

Примечание – ¹p < 0,05 по сравнению с летним периодом сбора моллюсков; ²p < 0,05 по сравнению с осенним периодом сбора моллюсков.

По сравнению с летним периодом сбора в моллюсках повышено содержание ТБК-ПВ в весенний период в 2,6 раза Витебский и Шумилинский районы, 2 раза Дубровенский и Ушачский, Сенненский районы, 1,72 раз Бешенковичский район. По сравнению с летним периодом сбора в моллюсках повышено содержание ТБК-ПВ в осенний период в среднем 1,5 во всех исследованных районах. По сравнению с осенним периодом содержание ТБК-ПВ *Lymnaea stagnalis* с весенним периодом статистически значимые отличия получены в Витебском районе в 1,80 раза, Шумилинском районе 1,55 раза, в Ушачском 1,38 раза.

По сравнению с летним периодом сбора в моллюсках повышена активность каталазы в весенний период в 2,4 раза во всех исследуемых районах (таблица 11). По сравнению с летним периодом сбора в моллюсках повышена активность каталазы в осенний период в 1,7 районах исследования. Выявлено, что активность каталазы выше весной, что связано с уси-

лением неблагоприятного воздействия факторов внешней среды обитания и возрастанием окислительного стресса. Динамика изменений активности каталазы уменьшается в последовательности весна > осень > лето, что свидетельствует о повышении активности антиоксидантной системы в весеннее время года из-за необходимости в утилизации большего количества пероксид водорода, образующегося при активации окислительных процессов.

Таблица 11 – Активность каталазы (мкмоль/мин/г) в гепатопанкреасе *Lymnaea stagnalis* ($M \pm m$)

Район сбора моллюсков	Сезон года		
	Весна (n = 9)	Лето (n = 9)	Осень (n = 9)
Витебский р-н	88,4 ± 2,3 ^{1,2}	41,4 ± 1,3	56,6 ± 2,6 ¹
Дубровенский р-н	70,2 ± 1,6 ^{1,2}	29,6 ± 1,7	50,6 ± 2,5 ¹
Бешенковичский р-н	72,5 ± 3,9 ^{1,2}	30,7 ± 2,3	52,4 ± 2,4 ¹
Ушачский р-н	80,8 ± 4,4 ^{1,2}	33,2 ± 1,8	54,6 ± 2,5 ¹
Шумилинский р-н	74,7 ± 4,1 ^{1,2}	31,1 ± 1,5	52,5 ± 3,0 ¹
Сенненский р-н	70,4 ± 1,8 ^{1,2}	29,4 ± 1,4	50,7 ± 2,3 ¹

Примечание – ¹p < 0,05 по сравнению с летним периодом сбора моллюсков; ²p < 0,05 по сравнению с осенним периодом сбора моллюсков.

В летний период сбора у моллюсков содержание восстановленного глутатиона в 1,3 раза меньше, чем весной и осенью. Самое большое значение зафиксировано в Ушачском и Бешенковичском районах, это в 1,3 раз больше, чем в Шумилинском районе весной (таблица 12).

Таблица 12 – Содержание восстановленного глутатиона (мкмоль/г) в гепатопанкреасе *Lymnaea stagnalis* ($M \pm m$)

Район сбора моллюсков	Сезон года		
	Весна (n = 9)	Лето (n = 9)	Осень (n = 9)
Витебский р-н	11,64 ± 0,13 ^{1,2}	8,04 ± 0,05	9,12 ± 0,08 ¹
Дубровенский р-н	10,12 ± 0,16 ^{1,2}	7,56 ± 0,17	9,26 ± 0,06 ¹
Бешенковичский р-н	10,06 ± 0,06 ^{1,2}	7,47 ± 0,19	9,09 ± 0,05 ¹
Ушачский р-н	11,23 ± 0,03 ^{1,2}	8,16 ± 0,23	9,36 ± 0,06 ¹
Шумилинский р-н	10,32 ± 0,23 ^{1,2}	8,34 ± 0,16	9,18 ± 0,05 ¹
Сенненский р-н	10,48 ± 0,08 ^{1,2}	7,32 ± 0,07	8,78 ± 0,13 ¹

Примечание – ¹p < 0,05 по сравнению с летним периодом сбора моллюсков; ²p < 0,05 по сравнению с осенним периодом сбора моллюсков.

Установлено, содержание восстановленного глутатиона в летнее время имеет самые низкие показатели, т. к. в это время степень неблагоприятного воздействия факторов окружающей среды минимальна. Показатели в весеннее и осеннее время превышают в 1,5 раза значения в летнее время сбора. Однако весной вследствие низкой температуры и недостатка пищи, моллюски испытывают стресс и значение показателей выше, чем в осеннее время сбора.

Закключение. Содержание общего белка в гемолимфе прудовика обыкновенного снижено в летний период времени и повышено весной и осенью. Содержание мочевины имеет обратную закономерность: летом ее содержание в гемолимфе повышается, а весной и осенью снижается. Мочевая кислота в гемолимфе прудовика обыкновенного закономерно повышается от осени к весне. Данные изменения связаны с изменением состава кормовой базы, физической и физиологической активности организмов и внешнего воздействия факторов окружающей среды. Увеличение концентрации мочевой кислоты в гемолимфе может свидетельствовать об активации процессов катаболизма нуклеиновых кислот и нуклеотидов, обусловленных воздействием неблагоприятных условий внешней среды в весенний сезон. Содержание РНК в тканях гепатопанкреаса прудовика обыкновенного закономерно снижается от весны к осени. Содержание ДНК в тканях гепатопанкреаса закономерно повышается от весны к осени. Содержание общего белка в тканях гепатопанкреаса прудовика обыкновенного уменьшается по сезонам в последовательности осень > весна > лето.

У *Lymnaea stagnalis* гепатопанкреас является источником глюкозы гемолимфы. При воздействии сезонных и антропогенных факторов окружающей среды в организме моллюсков интенсивнее протекают обменные процессы, о чем свидетельствует сокращение резервов гликогена. Отмечена следующая динамика: концентрация глюкозы в гемолимфе уменьшается в последовательности весна > лето > осень, а гликогена в обратной последовательности осень > лето > весна. Воздействие неблагоприятных факторов в весенний сезон года стимулирует усиление мобилизации углеводов гепатопанкреаса, мышц и других органов моллюска, что может свидетельствовать о повышении защитно-компенсаторных способностей организма моллюсков в ответ на отравление.

Уровни ТБК-ПВ в гепатопанкреасе моллюсков изменяются однотипно во всех исследуемых водоемах: самые низкие значения летом, весенние значения превышают летний уровень примерно в 2 раза, а осенние – в среднем в 1,5 раза. При исследовании активности каталазы в гепатопанкреасе моллюсков выявлена аналогичная сезонная динамика: весной активность фермента превышает летний уровень в среднем в 2,5 раза, а осенью – в 1,75 раза. Содержание восстановленного глутатиона в гепатопанкреасе моллюсков изменялось аналогично, но с меньшими различиями в сезонной динамике: весной уровень показателя превышал летний уровень в среднем в 1,5 раза, а осенью – в 1,25 раза.

Таким образом, сезонные и антропогенные изменения показателей углеводного, азотного обменов и антиоксидантной активности могут служить мониторинговыми параметрами экологического благополучия водных сред обитания легочных пресноводных моллюсков, поскольку они коррелируют с фундаментальными показателями клеточного состава тканей гидробионтов – содержанием нуклеиновых кислот.

Литература

1. Шевцова, С.Н. Влияние сульфата меди на рост, выживаемость и уровень экспрессии металлотioneинов у пресноводного моллюска *Lymnaea stagnalis* / С.Н. Шевцова, А.С. Бабенко, С.Е. Дромашко // Труды БГУ. – 2011. – Т. 6, ч. 1. – С. 152–162.
2. Биохимия филогенеза и онтогенеза: учеб. пособие / А.А. Чиркин, Е.О. Данченко, С.Б. Бокуть. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2012. – 288 с.
3. Стадниченко, А.П. Влияние трематодной инвазии на содержание гемоцианина в гемолимфе прудовика (*Gastropoda : Pulmonata : Lymnaeidae*) / А.П. Стадниченко [и др.] // Паразитология. – 1999. – Т. 33, № 2. – С. 125–128.
4. Дромашко, С.Е. Биотестирование – составной элемент оценки состояния окружающей среды: учебно-методическое пособие / С.Е. Дромашко, С.Н. Шевцова. – Минск : ИПНК, 2012. – 82 с.
5. Чиркин, А.А. Липидный обмен / А.А. Чиркин [и др.] // Медицинская литература. – М., 2003. – 122 с.
6. Lowry, O.H Protein measurement with Folin phenol reagent / O.H Lowry // J. Biol. Chem. – 1951. – Vol. 193, № 1. – P. 265–275.
7. Blober, G. Distribution of radioactivity between the acid-soluble pool and pools of RNA in the nuclear, nonsedimentable and ribosome fractions of rat liver after a single injection of labeled orotic acid / G. Blober, V.R. Potter // Biochem. Biophys. Acta. – 1968. – Vol. 166. – P. 48–54.
8. Krisman, C.R. A method for the colometric estimation of glycogen with iodine / C.R. Krisman // Analit. biochem. – 1962. – Vol. 4. – P. 17–23.
9. Uchiyama, M. Determination of malonaldehyde precursor in tissues by thiobarbituric acid test / M. Uchiyama, M. Mihara // Analit. biochem. – 1987. – Vol. 86. – P. 271–278.
10. Королюк, М.А. Метод определения активности каталазы / М.А. Королюк // Лабораторное дело. – 1988. – № 1. – С. 16–19.
11. Beutler, E. Red cell metabolism a manual of biochemical methods / E. Beutler. – Orlando : Grune & Stratton, 1990. – P.131–134.

УДК 630*551.521

Динамика накопления ^{137}Cs моховым покровом в сосновых и березовых насаждениях дальней и ближней зон аварии на ЧАЭС

Н.И. Булко¹, Н.В. Митин², М.А. ШАБАЛЕВА³, Н.В. ТОЛКАЧЕВА¹, А.К. КОЗЛОВ¹

Исследованы особенности поступления ^{137}Cs в моховый покров загрязненных радионуклидами лесов в дальней и ближней зонах за длительный послеаварийный период. Показаны статистически достоверные различия в накоплении ^{137}Cs моховым ярусом фитоценоза на почвах различной увлажненности и в различные периоды. Отмечено, что динамика поступления радионуклида в моховый покров с течением времени изменяется по синусоиде. Виды мхов различаются по характеру и величине накопления ^{137}Cs . Вследствие этого общее загрязнение мохового покрова зависит от долевого участия в его составе тех или иных видов мхов.

Ключевые слова: моховый покров, насаждения, ЧАЭС, почва, загрязнение.

The features of ^{137}Cs accumulation of bilberry in pine and birch forest stands on soils of various geneses are studied. The presence of species-specific radionuclide accumulation in the same growing conditions was established. By 2015, for 18 years since the beginning of observations, the pollution of the bilberry has decreased significantly. It is shown that differences in water availability of soils cause differences in ^{137}Cs TF in bilberry phytomass up to 2 orders of magnitude.

Keywords: phytomass, soil, plantations, bilberry, radionuclides.

Введение. Моховый ярус древесных насаждений, как правило, только в самых оптимальных для него условиях может доминировать в напочвенном покрове насаждений. Касается это, прежде всего, сосняков мшистых, ельников зеленомошников, сосняков на верховых торфах. В целом же, на объектах дальней и ближней зоны, где проводились исследования, мхи произрастают куртинно, либо их проективное покрытие не превышает 60 %. Преобладающими видами являются мох Шребера, дикранум, кукушкин лен, зеленые и сфагновые мхи.

Содержание ^{137}Cs в моховом покрове с момента аварии снизилось к настоящему времени весьма значительно. Если в 1987–1988 гг. оно в дальней зоне сосняков и березняков мшистых во мхе Шребера составляло $1\text{--}3 \cdot 10^5\text{--}10^6$ Бк/кг, то уже в 1990 г. не превышало $1 \cdot 10^6$ Бк/кг [1], а к настоящему времени снизилось еще на 1–2 порядка [2]. В контексте связи накопления ^{137}Cs черникой с наличием мохового покрова информация о тесной связи содержания ^{137}Cs в моховом покрове и влажности почвы в настоящее время приводится в работе О.М. Храмченковой и В.А. Собченко [3].

Объекты и методика исследований. Объектом исследований являлся моховый покров на 23 стационарных объектах в дальней и ближней зонах аварии на ЧАЭС в период с 1991 по 2014 гг.

Пробы мха отбирались на объектах в местах отбора образцов компонентов ППК для определения поверхностного загрязнения ^{137}Cs на пробных площадях стационаров и объектов. Отбор мха производился планшетной рамкой 20×20 см из 3-х–6-ти точек на каждой ПП.

Пробы высушивались, измельчались и готовились к измерениям. Измерения велись на бета-гамма-радиометре «МКС-АТ1315», сцинтилляционном гамма-спектрометре «Прогресс-320», гамма-спектрометре «КАМАК» со сцинтилляционным детектором NaI(Tl), 63×63 мм.

Используемая методика позволяла производить измерения активности ^{137}Cs в пробах с относительной погрешностью соответственно: до 20 %, 7–11 %, 10–25 % при нижнем пределе измерения – 3,7–4,0 Бк/кг.

Измерения производились в следующих геометриях: сосуд Маринелли 0,5 л; сосуд цилиндрический «плошка» высотой 50 мм и диаметром 140 мм; сосуд цилиндрический «дента» высотой 32 мм и диаметром 70 мм; сосуды специальной геометрии для измерения содержания ^{137}Cs на «МКС-АТ1315».

Результаты измерений обрабатывались по специальным алгоритмам разработчиков этих приборов в IBM-совместимом программном обеспечении. Статистическая обработка полученных данных осуществлена с помощью программ Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение. В целом динамика загрязнения мохового яруса сосновых и березовых насаждений на наших объектах в дальней и ближней зонах показана в таблице 1. В ней приводятся обобщенные изменения содержания и коэффициентов перехода ^{137}Cs в растения мохового яруса по объектам в целом (независимо от количества пробных площадей) и по годам исследований. Однако, при статистической обработке материалов исследований учитывалась загрязненность мха на всех пробных площадях на автоморфных почвах в дальней зоне аварии на ЧАЭС за период наблюдений с 1991 по 2014 гг. На каждом из объектов с течением времени шло довольно интенсивное снижение содержания радионуклида в моховом ярусе практически на всех объектах. Так, на стационаре «Петуховка» на автоморфных почвах в 2014 г., по сравнению с 1991 г., содержание ^{137}Cs во мхе стало ниже в 68 раз, а КП уменьшился в 17,6 раза. В тоже время в дальней зоне на стационарах на гидроморфных почвах в силу малой повторяемости наблюдений существенного снижения содержания ^{137}Cs во мхе не отмечено.

В ближней зоне на объектах удельная активность мхов, при сравнении с аналогичными объектами в дальней зоне, существенно (на порядок) выше. Однако с течением времени, загрязненность мха в ближней зоне в сосняках мшистом, черничном, осоковом также снижается (соответственно в 2,74; 3,62; 2,2 раза).

По накоплению ^{137}Cs моховой ярус на автоморфных и гидроморфных почвах достоверно различаются (таблица 2).

Таблица 1 – Динамика загрязненности мохового яруса насаждений сосновой и березовой формаций

Объект 1	Год 2	Главная порода 3	Почва 4	$A_{уд}$, Бк/кг 5	КП, м ² /кг 6
Дальняя зона					
Петуховка	1991	С	автоморфная	345633	96,2
	1993			60617	58,1
	1995			19863	9,2
	1997			24424	21,09
	2004			12925	17,9
	2006			10502	12,76
	2014			5067	5,47
Петуховка-4	1997	С	автоморфная	22024	25,4
	2004			11820	7,8
Восток	1995	С	автоморфная	40817	57,27
	1997			9680,5	13,2
	2004			6817	8,05
Лески	1995	С	автоморфная	22995	19,1
	1998			13025	11,3
Лески-2	1998	С	автоморфная	52643	45,2
	2003			36593	30,13
Подкамень	1995	С	автоморфная	39563	37,58
	1998			21507	20,85
Шубино	1995	С	автоморфная	23337	35,1
	1998			13327	22,78
Бартоломеевка	1997	С	автоморфная	19895	19,57
Побужье	1998	С	автоморфная	23020	23,7
Высокий Бор	1998	С	автоморфная	29980	31,27
	1999			36508	49,8
Лески-5	2004	С	автоморфная	12354	18,02
	2006			17947	30,78
Добруш	2006	С	автоморфная	10731	16,76
Лунинец	2008	С	автоморфная	5580	42,2
Богутичи	2006	С	автоморфная	4285	20,5
Морозовка-1	2004	С	гидроморфная	33060	75,67
Морозовка-2	2004	Б	гидроморфная	44697	80,78
	2005			39972	97,72
Головчицы	1997	С	гидроморфная	30980	57,0
Кочище	2008	С	гидроморфная	8928	58,26
Валавск-2	2006	С	гидроморфная осуш.	11500	102,3
Ветка	2006	С	полугидроморфная	10660	10,45

Окончание таблицы 1

Ближняя зона					
Желибор	1997	С	автоморфная		
Синцы	1997	Б	автоморфная		
Трансекта «Крюки»	2005	С, ПП1	ксероморфная		
	2012				
	2005	С, ПП2	автоморфная		
	2012				
	2005	С, ПП3	полугидроморфная		
	2012				
	1997	С, ПП4	гидроморфная		
	2000				
	2005				
	2012				

Таблица 2 – Статистические различия в накоплении ^{137}Cs моховым ярусом на различных категориях почв

Зона	Категория почвы	Средний КП, м ² /кг	Количество измерений, шт.	t-критерий	Достоверность различий (p)
В целом	автоморфная	27,06	115	-8,315	0,000
	гидроморфная	75,15	25		
Ближняя	автоморфная	31,59	10	-1,38	0,194
	гидроморфная	51,81	4		
Дальняя	автоморфная	26,63	105	-8,48	0,000
	гидроморфная	79,59	21		

Достоверность снижения накопления ^{137}Cs в моховом ярусе в насаждениях на автоморфных почвах с течением времени подтверждается статистически (таблица 3).

В процессе проведения исследований на объектах при отборе образцов ППК (почвенно-подстилочный комплекс) отбирался обобщенный образец мха. По видовому составу в дальней зоне в сосновых насаждениях в отобранных образцах, как правило, преобладал мох Шребера и дикранум, на полугидроморфных почвах – мох Шребера, дикранум, кукушкин лен, на гидроморфных почвах – сфагновые мхи.

Таблица 3 – Статистические различия в накоплении ^{137}Cs моховым ярусом на различных категориях почв

Зона	Годы отбора образцов	Средний КП, м ² /кг	Количество измерений, шт.	t-критерий	Достоверность различий (p)
Дальняя	1991-1993	77,13	6	4,037	0,0002
	1995-1997	24,87	36		
	1995-1999	30,92	21	2,623	0,011
	2003-2004	17,82	18		
	2006-2008	24,25	20	1,736	0,0973
	2014	5,46	3		

Видовая специфика в потреблении ^{137}Cs мхами в различных условиях произрастания в сосновых и березовых насаждениях прослеживается достаточно четко по уровням их загрязнения в 2014 г. (таблица 4).

Таблица 4 – Накопление ^{137}Cs отдельными видами мхов

Категория почв	Объект, ПП	A _{уд.} , Бк/кг/КП, м ² /кг			
		мох Шребера (<i>Pleurozium schreberi</i> (Mitt.))	зеленые мхи (Bryidae)	кукушкин лен (<i>Polytrichum strictum</i> Brid.)	сфагновые мхи (Sphagnaceae)
Гидроморфные	Бесядь, 3	21892/76,4	–	–	18887/65,9
	Морозовка-1,3	30161/93,3	–	–	33604/83,7
	Морозовка-2,3	28473/88,0	57712/178,4	39758/122,9	33428/103,3
	Морозовка-3,2	41260/139	44919/151,3	–	37107/125,0
Автоморфные	Кузьмич-3,1	2615/2,9	–	–	–
	Петуховка-1	5250/5,7	9106/9,8	–	–
	Петуховка-6,1	4155/3,0	6609/4,7	–	–

Наиболее высокий уровень загрязнения отмечается у зеленых мхов, более низкий – у мха Шребера. Промежуточное положение занимают сфагновые мхи. У последних прослеживаются различия от вида почвы, на которой они произрастают: так накопление ^{137}Cs мхом сфагновым в насаждениях на мощных переходных торфах (Морозовка-1, Морозовка-2) выше в 1,8 раза, чем на мощных верховых торфах (Бесядь-3) и в 1,1 раз ниже, чем на мощных низинных торфах (Морозовка-3).

Такие же особенности и в накоплении ^{137}Cs мхом Шребера. На объектах Морозовка-1, Морозовка-2 накопление радионуклида в 1,4 раза выше, чем на Бесяди-3, и в 1,4 ниже, чем на Морозовке-3.

Существенны различия в накоплении видами мха (зеленый и Шребера) на автоморфных и гидроморфных почвах. Содержание ^{137}Cs в зеленых мхах на автоморфных почвах ниже, чем на гидроморфных в 6,5, а во мхе Шребера – в 7,6 раза. При этом КП ^{137}Cs ниже в 13–40 раз.

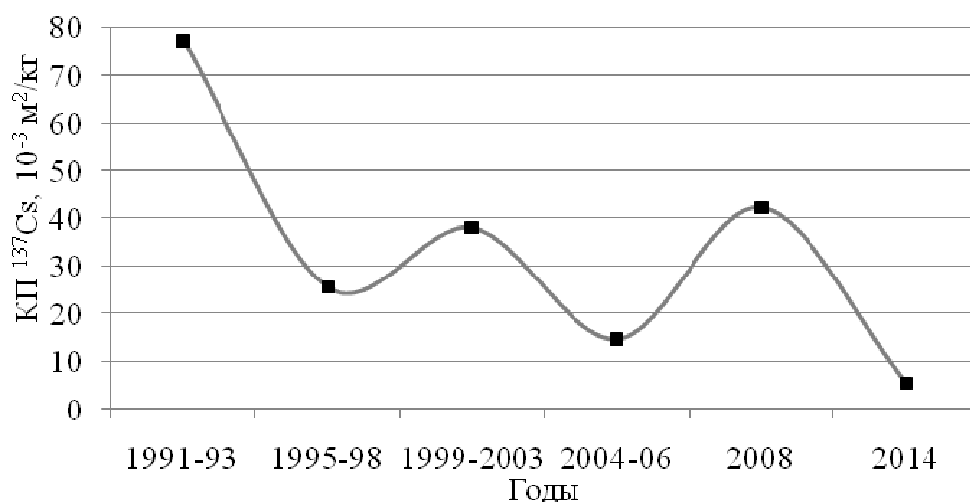


Рисунок 1 – Динамика накопления ^{137}Cs в моховом ярусе сосновых и березовых насаждений на автоморфных почвах в дальней зоне аварии на ЧАЭС

В тоже время, анализ накопления ^{137}Cs моховым ярусом на автоморфных почвах по КП (рисунок 1) показал, что при общем тренде снижение загрязненности мохового покрова с течением времени сохраняется синусоидальный характер накопления в нем радионуклида. Аналогичный характер его накопления в компонентах фитомассы основного древесного яруса [4]. Складывается впечатление, что на процессы миграции ^{137}Cs по восходящей ветви биологического круговорота в насаждениях сосновой и березовой формации на автоморфных почвах существенное влияние оказывает внешний фактор, возможно комплекс метеоусловий, складывающийся за определенный период времени.

Заключение. Выявлены следующие особенности поступления ^{137}Cs в моховый покров:

- с 1991 по 2014 гг. шло интенсивное снижение загрязненности мохового покрова на отдельных объектах в насаждениях на автоморфных почвах – КП ^{137}Cs уменьшился в 17,6 раза. В целом накопление ^{137}Cs в моховом покрове на автоморфных почвах существенно ниже, чем на гидроморфных почвах;
- отмечается видоспецифичность накопления ^{137}Cs мхами. Наиболее высокий уровень загрязнения у зеленых мхов;
- в моховом покрове насаждений в дальней зоне накопление ^{137}Cs на порядок ниже, чем в насаждениях ближней зоны;
- по накоплению ^{137}Cs и КП ^{137}Cs моховый покров насаждений на автоморфных почвах достоверно отличается от мохового покрова на гидроморфных почвах;
- установлены достоверные различия в КП ^{137}Cs и уровне загрязнения им мохового покрова по годовым периодам. При этом сохраняется синусоидальный характер накопления ^{137}Cs моховым покровом в насаждениях на автоморфных почвах в период наблюдений 1991–2014 гг.

Литература

1. Радиоактивное загрязнение растительности Беларуси / В.И. Парфенов ; под общ. ред. В.И. Парфенова, Б.И. Якушева. – Мн. : Навука і тэхніка, 1995. – 549 с.
2. Булко, Н.И. Особенности длительной миграции чернобыльского ^{137}Cs в автоморфных и гидроморфных почвах сосновых фитоценозов в дальней зоне аварии на ЧАЭС / Н.И. Булко [и др.] // Проблемы лесоведения и лесоводства : сб. науч. тр. Института леса НАН Беларуси. – Вып. 75. – Гомель : Институт леса НАН Беларуси, 2015. – С. 391–404.
3. Храмченкова, О.Н. Влияние мохового покрова на содержание ^{137}Cs в ягодах черники (*Vaccinium myrtillus* L.) / О.Н. Храмченкова, В.А. Собченко // Радиация и Чернобыль : Ближайшие и отдаленные последствия. – Т. 4 ; под общ. ред. Е.Ф. Конопля. – Гомель : РНИУП «Институт радиологии», 2007. – С. 28–33.
4. Булко, Н.И. Динамика длительных процессов поступления ^{137}Cs в компоненты фитомассы сосны обыкновенной из автоморфных почв в дальней зоне аварии на ЧАЭС / Н.И. Булко [и др.] // Проблемы лесоведения и лесоводства : сб. науч. тр. Института леса НАН Беларуси. – Вып. 76. – Гомель : Институт леса НАН Беларуси, 2016. – С. 371–379.

¹ГНУ «Институт леса НАН Беларуси»

²Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

³Гомельский государственный
медицинский университет

Поступила в редакцию 25.04.2018

Оценка влияния обустройства нефтяных скважин на сообщества жесткокрылых (Ectognatha, Coleoptera) на примере Судовицкого нефтяного месторождения (Республика Беларусь)

Н.Г. Галиновский, О.М. Демиденко, Д.В. Потапов, В.С. Аверин

Настоящие исследования выявили, что на территориях около скважин Судовицкого нефтяного месторождения и на контрольном участке, расположенных на пойме реки Березина, было выявлено 142 вида жесткокрылых, относящихся к 92 родам 18 семейств. Наибольшее родовое и видовое богатство было характерно для жуков-щелкунов, долгоносиков и пластинчатых жуков. Структура доминирования на исследованных стационарах отличалась незначительно и не имела специфической характеристики в зависимости от места расположения скважины и способа добычи нефти. В то же время было обнаружено достоверное влияние организации скважин на пойме на численность жесткокрылых, что приводит к его резкому понижению в зоне прямого воздействия человека.

Ключевые слова: жесткокрылые, нефтяные скважины, сообщества, доминирование.

The present studies revealed that in the areas, near the wells of the Sudovitsk oil field and at the control plot located on the floodplain of the Berezina River, 142 species of coleoptera belonging to 92 genera of 18 families were identified. The largest generic and species richness was characteristic for ground beetles, weevils and lamellar beetles. The structure of dominance in the investigated plots differed insignificantly and did not have a specific characteristic, depending on the location of the well and the method of oil extraction. At the same time, a significant effect of the organization of wells on the floodplain on the number of coleopterans was found, which leads to its sharp decrease in the zone of direct human exposure.

Keywords: coleopterans, oil wells, communities, dominance.

Введение. Нефть – это жидкое природное ископаемое, состоящее из большого числа высокомолекулярных углеводородов разнообразного строения. В качестве эколого-геохимических характеристик основного состава нефти приняты содержание легкой фракции, метановых и циклических углеводородов, смол, асфальтенов и сернистых соединений.

Загрязнение нефтью влияет на весь комплекс морфологических, физических, физико-химических, биологических свойств почвы, определяющих ее плодородные и экологические функции. Исследований почвенной фауны территорий, нарушенных при нефтедобыче, крайне мало, они отрывочны, касаются однократных обследований загрязненных территорий [1], [2] или проведены в краткосрочных полевых модельных опытах [3].

В то же время Судовицкое нефтяное месторождение (Республика Беларусь, Светлогорский район) характеризуется наружным проведением нефтепродуктов к накопителю, и в случае аварии, она быстро локализуется и устраняется. В связи с этим для данного месторождения мы считаем более актуальным изучение влияния на биоту на данном месторождении не разливов нефти, ведущих к непосредственным загрязнениям, а антропогенную трансформацию экосистем, связанную непосредственно с организацией и проведением нефтедобычи.

Целью нашего исследования было изучение возможного влияния трансформации верхнего слоя грунта на видовой состав и численность герпетобионтных жесткокрылых в зависимости от удаления от центра площадки скважины.

Материал и методика. Сбор материала проводился в период с апреля по сентябрь 2016–2017 гг. на следующих стационарных участках:

1) Стационар 1 – контрольный участок, не подверженный техногенному воздействию (пойма реки Березина). Координаты: 52°44'03" с.ш. 29°36'09" в.д. Стационар характеризуется сплошным покрытием гидро- и гигрофитными видами растений: ива козья, осоки, тростник, редко встречаются небольшие березы, ольха, в повышениях рельефа – дуб, клен, осина. Почва пойменно-аллювиальная, переувлажненная.

2) Стационар 2 – скважина № 36 (гидроразрыв пласта не осуществлялся, запущена в эксплуатацию в 2009 г.). Координаты: 52°44'45" с.ш.; 29°29'34" в.д. Участок сопряжен со скважиной добычи нефти (зона обваловки 100 × 100 м, отчуждения – 200 × 200 м). Зона обваловки

лишена биоты, в зоне отчуждения встречаются травы (ослиник, икотник, ястребинка, пырей, мятлик, подорожник), проективное покрытие – 15 %. Почва у зоны обваловки песчаная, на расстоянии 10–15 м от зоны обваловки – тяжелая супесь (площадь проективного покрытия увеличивается до 70 %). За полосой отчуждения с северной стороны начинается лесной массив.

3) Стационар 3 – скважина № 32 (осуществлялся гидроразрыв пласта в 2011 г.; 52°44'12" с.ш.; 29°33'19" в.д.). Участок сопряжен со скважиной добычи нефти (зона обваловки 100 × 100 м, отчуждения – 200 × 200 м). Зона обваловки лишена биоты, в зоне отчуждения отмечены травы (ослиник, очиток, ястребинка, пырей, овсяница, овсюг) с площадью проективного покрытия 30 %. Почва песчаная. Ниже полосы отчуждения начинается пойма реки Березина со сплошным покрытием влаголюбивыми видами растений, почва сменяется на пойменно-аллювиальную.

4) Стационар 4 – скважина № 47 (осуществлялся гидроразрыв пласта в 2014 г.; 52°44'46" с.ш.; 29°29'35" в.д.). Участок сопряжен с новой скважиной добычи нефти, на которой активно ведется добыча (зона обваловки 100 × 100 м, отчуждения – 200 × 200 м). Зона обваловки характеризуется отсутствием биоты. В начале зоны отчуждения (15–20 м) проективное покрытие составляет 5 %: встречаются немногочисленные травы (пырей, ястребинка). Через 30–40 м проективное покрытие резко увеличивается до 85 %, появляются мятлик, полынь, мышиный горошек и др. Почвы песчаные. Вокруг зоны отчуждения преобладают открытые станции – пойменные луга, сопряженные со старицей реки Березина.

Сбор имаго жесткокрылых проводился почвенными ловушками (фиксатор – формалин), которые выставлялись из расчета 20 почвенных ловушек на один стационар. На участках с нефтяными скважинами ловушки выставлялись в линию по мере удаления от края отваловки скважины.

Первичная база данных по видовой принадлежности и численности собранных жесткокрылых составлялась с использованием «MS Excel». Для анализа распределений, средних, ошибок и верификации гипотез об их различиях и связях использовался пакет «Statistica 7.0». Доминирование в сообществах определялось по шкале Ренконена [4].

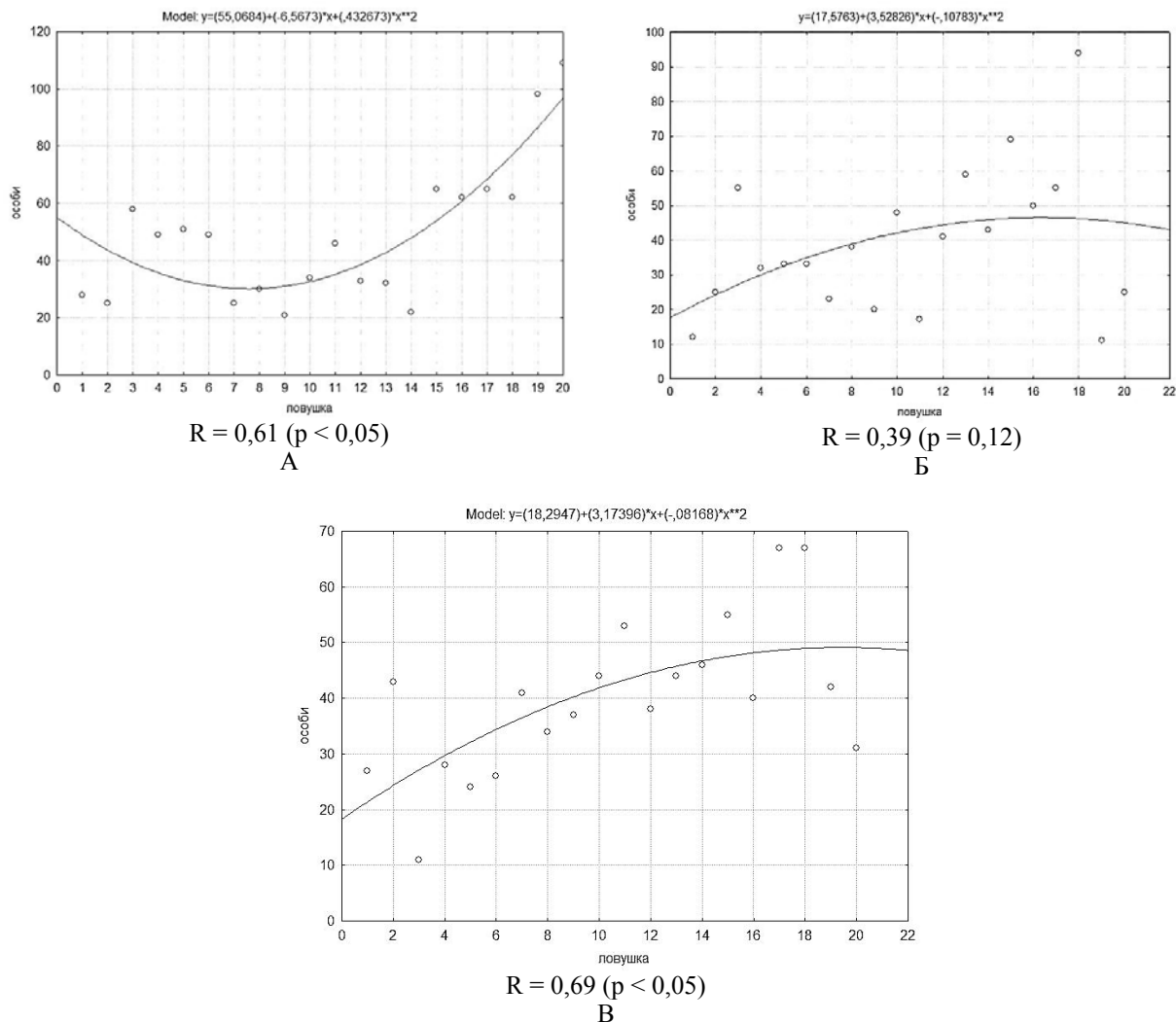
Результаты и обсуждение. Всего за весь период исследований на изученных нами стационарах было собрано почвенными ловушками 2436 экземпляров жесткокрылых 142 видов, относящихся к 92 родам 18 семейств (таблица 1). Среди представленных семейств, некоторые из них, а точнее – ряд представителей практически никакого отношения к герпетобионтной фауне не имеют. Это плавунец *Acilius sulcatus*, усач *Lamia textor* и рогачик *Dorcus parallelipedus*, наличие которых в ловушках можно считать случайным, на что указывает также и их минимальная численность.

Таблица 1 – Родовое и видовое богатство жесткокрылых исследованных территорий

Семейство	Количество родов	Количество видов
Buprestidae Leach, 1815 (Златки)	1	1
Byrrhidae Latreille, 1806 (Пилюльщики)	3	4
Carabidae Latreille, 1802 (Жужелицы)	17	48
Cerambycidae Latreille, 1802 (Усачи)	1	1
Chrysomelidae Latreille, 1801 (Листоеды)	6	8
Coccinellidae Latreille, 1806 (Божьи коровки)	5	6
Curculionidae Latreille, 1802 (Долгоносики)	22	31
Dermestidae Latreille, 1807 (Кожееды)	1	1
Dytiscidae Leach, 1815 (Плавунцы)	1	1
Elateridae Leach, 1815 (Щелкуны)	8	9
Histeridae Gyllenhal, 1807 (Карпузики)	1	3
Meloidae Gyllenhal, 1810 (Майки)	1	1
Lagriidae Latreille, 1825 (Мохнатки)	1	1
Lucanidae Latreille, 1806 (Рогачи)	1	1
Scarabaeidae Latreille, 1802 (Пластинчатоусые)	15	17
Silphidae Latreille, 1807 (Мертоведы)	2	3
Staphylinidae Latreille, 1802 (Стафилиниды)	2	2
Tenebrionidae Latreille, 1801 (Чернотелки)	4	4
Всего:	18	142

Также следует упомянуть жужилицу *Calathus erratus*, которая доминировала также на 3 стационарах, но в не зависимости от проективного покрытия, хотя и прослеживается тенденция к уменьшению обилия при увеличении плотности проективного покрытия растительности.

Нами была проведена оценка возможного влияния на численность жесткокрылых фактора удалённости от края отваловки скважин. В результате проведённого регрессионного анализа для скважин была выявлена криволинейная зависимость (рисунок 1).

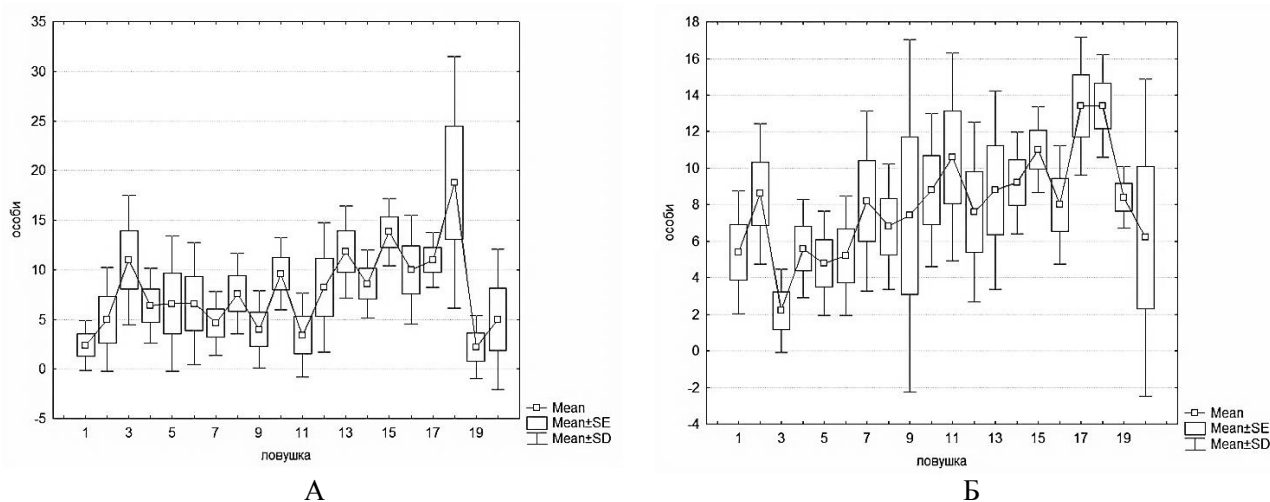


А – скважина № 32; Б – скважина № 36; В – скважина № 47

Рисунок 1 – Результаты оценки степени влияния расстояния ловушек от края отваловки нефтяной скважины на численность жесткокрылых

При этом для скважин с гидроразрывом пласта эта зависимость имела достоверность (рисунок 1А и рисунок 1В), а для старой скважины, выполненной традиционным способом, степень зависимости была низкой и не имела достоверности (рисунок 1Б). Данную особенность можно объяснить тем, что данный участок имеет довольно равномерное проективное покрытие растительностью, что способствует также его равномерное заселение жесткокрылыми.

Кроме этого следует отметить, что криволинейность зависимости численности беспозвоночных на скважинах, имеющих достоверность, можно объяснить в случае со скважиной № 32 сокращением численности беспозвоночных как экстремальными естественными условиями обитания в этой части участка, так и перманентным воздействием на грунт техники, обслуживающей скважины. Для скважины № 47 данную особенность можно объяснить разделением участка на 2 зоны: фактически песчаной дюны вблизи начала отваловки до гравийной дороги и пойменным лугом, начинавшимся практически сразу по другую сторону дороги, условия обитания на котором более благоприятно сказывались на жесткокрылых, что привело к росту их численности.

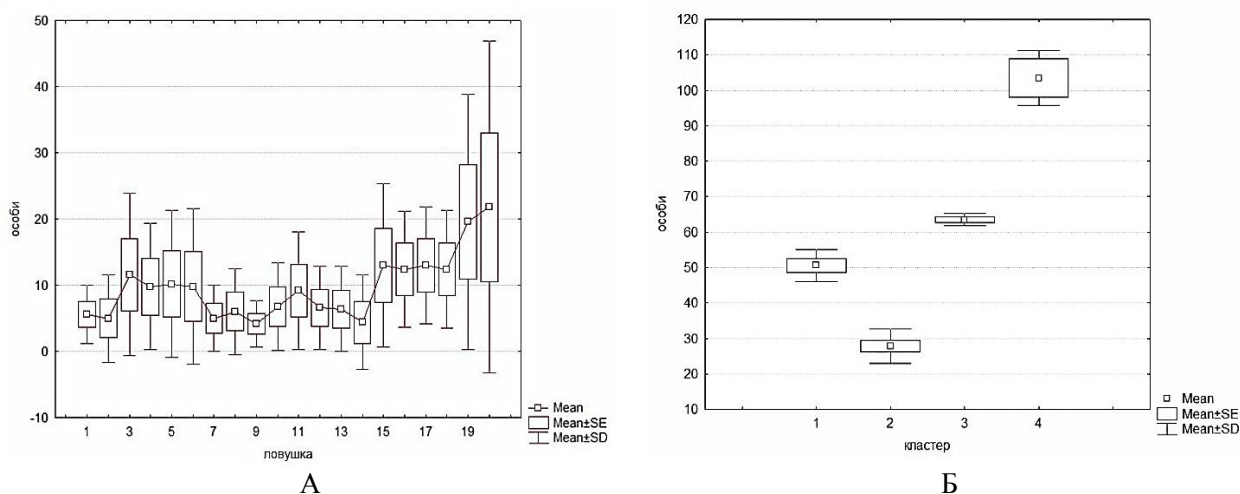


А – скважина № 36; Б – скважина № 47

Рисунок 2 – Результаты однофакторного дисперсионного анализа оценки влияния удалённости от края отваловки нефтяной скважины на численность жесткокрылых

В результате проведённого дисперсионного анализа было выявлено, что на исследованных скважинах наблюдалось достоверное влияние на изменение численности жесткокрылых: скважина № 36 – $F = 2,898$, $p < 0,001$; скважина № 47 – $F = 1,866$, $p < 0,05$ (рисунок 2). Для скважины № 32 дисперсионный анализ не показал прямого влияния – $F = 1,028$, $p = 0,44$ (рисунок 3А), но, в тоже время наблюдающаяся тенденция позволила предположить наличие не планового, а ступенчатого изменения, что косвенно подтверждается и достаточно значимой криволинейной регрессией.

Для проверки этой гипотезы нами был проведён кластерный анализ, который достоверно объединил всю ловушко-линию в 4 кластера, которые совпадали с озвученными выше зонами (голый песок, песок с редкой растительностью, песок с 50 % проективным покрытием растительности и краевой участок, примыкающий к пойме). Оценка влияния фактора удалённости уже на кластеры показала крайне высокую зависимость для центра каждого кластера – $F = 172,88$, $p < 0,0001$ (рисунок 3Б).



А – дисперсионный анализ численности по ловушкам; Б – дисперсионный анализ кластеров

Рисунок 3 – Оценка влияния удалённости от края отваловки нефтяной скважины № 32 на численность жесткокрылых

Таким образом, в результате проведённых исследований можно сказать, что:

1) Сообщества жесткокрылых, связанных с растительностью и почвами окрестностей нефтяных скважин исследованного месторождения представлены 142 вида жесткокрылых, относящихся к 92 родам 18 семейств.

2) Наибольшее родовое и видовое богатство было характерно для жуужелиц, долгоноси-ков и пластинчатоусых жуков.

3) Структура доминирования на исследованных стационарах отличалась незначительно и не имела специфической характеристики в зависимости от места расположения скважины и способа добычи нефти.

4) Обнаружено достоверное влияние организации скважин на пойме на численность жесткокрылых, что приводит к его резкому понижению в зоне прямого воздействия человека.

То есть можно сказать, что организация нефтяных скважин на пойме Березины, проявляющаяся в трансформации верхнего горизонта почвы и оголения грунта, достоверно влияет на численность герпетобионтных жесткокрылых, сокращая ее.

Литература

1. Порядина, И.М. Панцирные клещи некоторых районов нефтегазразработок Тюменской области / И.М. Порядина, Л.Д. Голосова // Проблемы почвенной зоологии : тез. докл. 7-го Всесюз. совещ. – Киев : Наукова думка, 1981. – С. 170–171.
2. Любвина, И.В. Влияние нефтепромысла на функциональное состояние лесного биогеоценоза / И.В. Любвина, Ю.К. Рацевский, Г.П. Романюк // Экология и охрана животных. – Куйбышев : Изд-во Куйбыш. ун-та, 1982. – С. 27–43.
3. Pirhonen, R. Petroleum fractions in soil: effects on populations of Nematoda, Encyrtidae and Microarthropoda / R. Pirhonen, V. Huhta // Soil Biol. Biochem. – 1984. – V. 16, № 4. – P. 347–350.
4. Renkonen, O. Statistisch-Ökologische Untersuchungen über die terrestrische Käferwelt der finnischen Bruchmoore / O. Renkonen // Ann. Zool. – Bot. Soc. Fennicae – 1938. – № 6. – P. 1–30.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 07.03.2018

УДК: 57.045:581.524.2:582.681.71:581.526.45(282.247.321.7)

Влияние метеорологических условий на развитие инвазивного вида эхиноцистиса лопастного (*Echinocystis lobata* (Michx.) Torr. et Gray) в луговых экосистемах р. Сож

Н.М. ДАЙНЕКО¹, С.Ф. ТИМОФЕЕВ¹, А.Д. БУЛОХОВ², Н.Н. ПАНАСЕНКО²

Фенофазы развития инвазивного вида эхиноцистиса лопастного *Echinocystis lobata* L. в 2017 г. в связи с неблагоприятными метеорологическими условиями задержали свое развитие на 10–15 дней позже, чем в 2016 г. Отмечается изменение морфологических показателей эхиноцистиса, как по годам исследований, так и между изучаемыми популяциями.

Ключевые слова: метеорологические условия, фенофазы, инвазивный вид, эхиноцистис лопастной, пойма.

The invasive species *Echinocystis lobata* L. delayed their development phenophases for 10–15 days in 2017 compared to 2016 due to unfavorable meteorological conditions. Morphological parameters of *Echinocystis* vary both within the years of study and the studied populations.

Keywords: meteorological conditions, phenophases, invasive species, *Echinocystis lobata*, floodplain.

Введение. В настоящее время на пойменных лугах р. Сож все большее распространение получает наиболее опасный агрессивный инвазивный вид эхиноцистис лопастной (*Echinocystis lobata* (Michx.) Torr. et Gray) [1]–[5]. Это однолетнее травянистое растение из семейства Тыквенные. Родина – Северная Америка. В Республике Беларусь отмечается с начала 60-х гг. минувшего столетия. Это растение с лазящими при помощи усиков стеблями, достигающими высоты 3–6 метров. В стадии всходов имеет два очень крупных семядольных листа, несколько напоминающие листья тыквы. Далее на растении развиваются крупные пятилопастные светло-зеленые листья. Позднее на растении появляются небольшие желтовато-беловатые раздельнополые цветки. На месте женских цветков образуются оригинальные плоды, напоминающие бочонковидные огурчики с многочисленными крупными шипами по всей поверхности плода. Семена крупные, зрелые, коричневые. В долинах рек эти семена разносятся чаще всего водой по прибрежным кустарникам, где впоследствии нередко образуются сплошные заросли. Эхиноцистис характеризуется довольно обильным плодоношением. Ежегодно образует самосев. Может быстро увеличивать площадь популяции. Трудно искоренима [6].

Для того, чтобы успешно бороться с такими инвазионными видами, необходимо изучить их эколого-биологические особенности в местах их произрастания. Нами [7] в 2016 г. начато изучение популяций эхиноцистиса лопастного в пойме р. Сож Гомельской области. Цель данной работы: выявить влияние метеорологических условий на фенофазы развития эхиноцистиса лопастного на пойменных лугах р. Сож.

Материал и методика исследования. Сбор материала проводился на территории Ветковского и Чечерского районов в вегетационные периоды 2016 и 2017 гг.

Для характеристики сообщества инвазивного вида эхиноцистиса лопастного и для установления фенофаз развития использовали методику [8], [9].

Латинские названия растений даны по С.К. Черепанову [10]. При наблюдении за эхиноцистисом лопастным использовали работу [11].

Метеорологические условия вегетационного периода 2016–2017 гг. представлены в таблице 1.

Анализ метеорологических условий за 2016 г. показал, что среднемесячная температура воздуха в апреле на 3,4°C; мае – на 1,5°C; июне – на 2,4°C; июле – на 1,4°C; августе – на 1,1°C; сентябре – на 1,0°C выше среднемесячной температуры. Анализ количества выпавших осадков по месяцам показал, что в апреле выпало на 8,3 мм; мае – на 33,2 мм; августе на 12,6 мм больше средней многолетней, а в июне – на 32,8 мм; июле – на 35,4 мм; сентябре – на 39,6 мм меньше средней многолетней. Таким образом, среднемесячное количество осадков за вегетационный сезон 2016 г. на 53,7 мм было ниже, чем средние многолетние данные.

Таблица 1 – Среднемесячная температура воздуха (°С, над чертой) и сумма осадков (мм, под чертой) по данным Гомельского областного центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

Месяц	2016 г.	2017 г.	Средние многолетние
	°C / мм		
Апрель	10	8,1	6,6
	53,3	16,9	45,0
Май	15,4	13,4	13,9
	88,2	31,2	55,0
Июнь	19,4	17,7	17,0
	46,2	43,5	79,0
Июль	21,2	18,5	19,8
	54,6	115,2	90,0
Август	19,8	20,3	18,7
	73,6	57,9	61,0
Сентябрь	14,0	14,8	13,0
	18,4	28,9	58,0
Сумма осадков, мм	334,3	293,6	388,0

Анализ метеорологических условий 2017 г. показал, что среднемесячная температура воздуха за апрель месяц на 1,5°С; в июне на 0,7°С, августе – на 1,6°С, в сентябре – на 1,8°С выше средней многолетней; в мае на 0,5°С, в июле – на 1,3°С ниже среднемесячной температуры. Количество выпавших осадков в апреле на 28,1 мм; мае 23,2 мм, июне – 35,5 мм, августе – на 3,1 мм, сентябре – 29,1 мм меньше средней многолетней величины. Итак, среднемесячное количество осадков за вегетационный сезон 2017 г. на 94,4 мм было ниже средних многолетних данных.

В Ветковском районе изучение первой популяции эхиноцистиса лопастного проводили в притеррасной части поймы р. Сож вблизи дер. Старое Село (N 52°31'490"; E 31°08'566"). Источником распространения эхиноцистиса служили огороды частного сектора, от которых эхиноцистис по кустарникам ивняков через 18–20 м достиг пониженного участка, где произрастали крапива двудомная, марь, мелколепестник канадский, ослинник двулетний, осот полевой и другая сорно-полевая растительность.

Изучение второй популяции эхиноцистиса лопастного произрастающей справа от дороги Гомель-Ветка после выезда из н.п. Покалюбичи в овраге вблизи кладбища (N 52°30'44,53"; E 31°03'24,48"). К этому оврагу примыкает понижение шириной 50–70 м, растянувшееся на несколько километров с дерново-глебоватыми почвами. На этом понижении произрастали ивы, а также луговое разнотравье: *Veronica longifolia*, *Filipendula ulmaria*, *Galium boreale*, *Thalictrum lucidum*, *Coronaria flos-cuculi*, *Rumex confertus*, *Ranunculus acris*, *Achillea cartilagine*, *Geum rivale*, *Galium uliginosum*, *Lysimachia vulgaris*, *Prunella vulgaris*, *Urtica dioica*, *Symphitum officinale* и др.; злаки: *Alopecurus pratensis*, *Agrostis stolonifera*, *Poa palustris*, *Deschampsia cespitosa*, *Festuca pratensis*; осоки: *Carex acuta*, *Carex vesicariae*, *Carex leporine*.

Изучение третьего объекта проводили наблюдения за развитием проросшей отдельной особи эхиноцистиса, вблизи понижения, примыкающего к прирусловой части поймы р. Сож (N 52°39'16,35"; E 31°04'53,068"). Вначале появившиеся плети на расстоянии 2–3 м развивались на почве, а затем переместились на рядом стоящие деревья ольхи, на которых уже были плети хмеля обыкновенного, а также на кустарники ивы, заросли которой подходят к руслу реки, и это есть путь заселения кустарников эхиноцистисом.

При изучении популяции эхиноцистиса лопастного на территории Чечерского района было обследовано шесть объектов.

Первый объект расположен в урочище Ковалев Рог выше по течению р. Чечёры, правого притока р. Сож при выезде из г. Чечерска (N 52°55'012,19"; E 30°50'3'07,99"). Это пониженная прирусловая часть поймы площадью до 1 га. Раньше здесь выпасался личный скот жителей находящегося рядом поселка. После прекращения выпаса стал интенсивно развиваться эхиноцистис, который распространился по всей территории этого участка. Здесь произрастают древесные формы ивы белой. Их возраст составляет 70–80 лет. Это понижение также представлено ассоциацией *Urticetum dioicae* (Domin 1944) Smarda 1963.

Во втором объекте изучение популяции эхиноцистиса проводили на окраине г. Чечерска вдоль правобережья русла реки Чечёра, на протяжении 300–400 м до впадения ее в р. Сож (N 52°54'52,153"; E 30°56'10,43"). Еще пять лет назад на пойменном лугу р. Чечёра выпасался личный скот жителей г. Чечерска, и эхиноцистис здесь не был отмечен. В связи с прекращением выпаса скота начали появляться отдельные особи эхиноцистиса на кустарниках ив, произрастающих по берегу р. Чечёра, которые покрывали 10–15 % их побегов.

Третьим объектом изучения эхиноцистиса является ул. Восточная г. Чечерска (N 52°54'18,983"; E 301°553'50,00"). Огороды жителей этой улицы выходят на пойму р. Чечёра. Здесь был прослежен путь эхиноцистиса от огородов, где он начинает развиваться вблизи заборов, где находится понижение, и распространена ассоциация *Urticetum dioicae* (Domin 1944) Smarda 1963. Далее по кустарникам ив (ива пепельная, ива ушастая, ива розмаринолистная, ива трехтычинковая) распространился до русла р. Чечёра. На пути встречается ассоциация *Poo-Festucetum pratensis* Sapegin 1986, *Deschampsietum cespitosae*, *Deschampsio-Agrostietum tenuis* Bulokhov 1990.

Нами также обследована четвертая популяция эхиноцистиса лопастного, которая произрастает на левобережье в прирусловой и центральной части поймы вдоль моста через р. Сож от д. Залесье к н.п. Вознесенск Чечерского района (N 52°53'24,41"; E 30°583'53,978"). Распространение эхиноцистиса начиналось от огородов крайних домов д. Залесье, находящихся вблизи моста. Далее их путь продолжался по кустарникам ивы, а также произрастающих здесь клёну ясенелистному и робинии лжеакация и занимал 10–15 % поверхности 4-х кроны.

Обследование пятого объекта в н.п. Красный Берег (N 53°56'16,643"; E 30°56'37,44"), находящегося на левом берегу р. Сож в прирусловой части, показало, что по дороге, ведущей от населенного пункта к бывшей паромной переправе через р. Сож на правый берег на протяжении более 500 метров по кустарникам ив и клёна ясенелистного распространялся эхиноцистис лопастной, занимающий до 20 % площади надземной части кустарников ивы и кроны клёна ясенелистного, являющегося также инвазивным видом.

Обследование шестого объекта (N 52°50'39,37"; E 30°59'55,19"), находящегося вблизи дачного поселка Городовка, расположенного на левом берегу р. Сож, показало, что по ивнякам по берегу реки развивается эхиноцистис, покрывая кустарники, в среднем, до 10 % их побегов [12].

Результаты исследований и их обсуждение. Анализ фенофаз изучения популяций эхиноцистиса лопастного в вегетационный период в изучаемых объектах Ветковского района в 2016–2017 гг. показал, что появление всходов в 2017 г. в связи с метеорологическими условиями задержалось по сравнению с 2016 г. на 9–15 дней. Фаза образования стебля и облиственность задержалась на 5–9 дней; полного облиствения на 3–8 дней; набухания цветочных почек – на 4–6 дней; полной бутонизации на 7–10 дней; начала цветения на 9–12 дней; полного цветения на 3–10 дней; отцветания – на 9–15 дней; начала образования плодов – на 10–17 дней; обсеменения – на 14–12 дней; усыхания и отмирания всего растения на 19–20 дней. Как видно из фенофаз развития в 2017 г. популяции Ветковского района по сравнению с 2016 г. задержали свое развитие в среднем на 10–15 дней (таблица 2).

Таблица 2 – Фенофазы развития изучаемых популяций эхиноцистиса лопастного в вегетационный период в изучаемых объектах Ветковского района в 2016–2017 гг.

Фенофазы	Дата наступления фенофаз		
	Популяции		
1	2	3	4
Появление всходов	<u>04.05</u>	<u>29.04</u>	<u>30.04</u>
	13.05	13.05	13.05
Образование стебля и облиственность	<u>19.05</u>	<u>15.05</u>	<u>15.05</u>
	24.05	24.05	24.05
Полное облиствение	<u>25.06</u>	<u>20.06</u>	<u>20.06</u>
	28.06	28.06	28.06

Окончание таблицы 2

Набухание цветочных почек	$\frac{29.06}{03.07}$	$\frac{27.06}{03.07}$	$\frac{27.06}{03.07}$
Полная бутонизация	$\frac{05.07}{12.07}$	$\frac{02.07}{12.07}$	$\frac{02.07}{12.07}$
Начало цветения	$\frac{08.07}{17.07}$	$\frac{05.07}{17.07}$	$\frac{05.07}{17.07}$
Полное цветение	$\frac{29.07}{01.08}$	$\frac{26.07}{05.08}$	$\frac{26.07}{01.08}$
Отцветание	$\frac{17.08}{26.08}$	$\frac{15.08}{30.08}$	$\frac{22.08}{26.08}$
Начало образования плодов	$\frac{24.08}{03.09}$	$\frac{22.08}{08.09}$	$\frac{15.08}{03.09}$
Обсеменение	$\frac{06.09}{20.09}$	$\frac{04.09}{25.09}$	$\frac{04.09}{20.09}$
Усыхание и отмирание всего растения	$\frac{28.09}{17.10}$	$\frac{25.09}{15.10}$	$\frac{25.09}{17.10}$

Примечание: в числителе указаны сроки наступления фенофаз в 2016 г., в знаменателе – в 2017 г.

Анализ некоторых морфологических показателей изучаемых популяций в пойме р. Сож Ветковского района (таблица 3) показал, что в 2016 г. длина плетей оказалась на (0,5–0,6) м длиннее, чем в 2017 г., длина листовой пластинки на (0,4–0,5) см также была больше в 2016 году. Диаметр плетей, длина плода и диаметр семени по годам наблюдений практически мало отличались друг от друга. Следует отметить, что длина плетей в изучаемых популяциях варьировала от 6,3 м до 7,2 м; диаметр плетей от 5,2 мм до 5,5 мм; длина листовой пластинки колебалась от 6,7 см до 8,8 см; длина плода от 5,3 см до 6,5 см; длина семени от 14,3 мм до 15,6 мм. Таким образом, отмечается изменение морфологических показателей эхиноцистиса как по годам исследований, так и между изучаемыми популяциями.

Таблица 3 – Некоторые морфологические показатели эхиноцистиса лопастного в пойме р. Сож Ветковского района, 2016–2017 гг.

Признак	Популяции		
	1	2	3
Длина плетей	$\frac{6,9 \pm 0,34}{6,4 \pm 0,32}$	$\frac{6,9 \pm 0,34}{6,3 \pm 0,31}$	$\frac{7,2 \pm 0,36}{6,7 \pm 0,33}$
Диаметр плетей	$\frac{5,4 \pm 0,27}{5,3 \pm 0,26}$	$\frac{5,5 \pm 0,28}{5,5 \pm 0,27}$	$\frac{5,4 \pm 0,27}{5,2 \pm 0,26}$
Длина листовой пластинки	$\frac{7,2 \pm 0,36}{6,7 \pm 0,33}$	$\frac{8,8 \pm 0,45}{8,4 \pm 0,42}$	$\frac{8,7 \pm 0,44}{8,3 \pm 0,41}$
Длина плода	$\frac{5,4 \pm 0,27}{5,3 \pm 0,26}$	$\frac{6,2 \pm 0,31}{6,2 \pm 0,36}$	$\frac{6,5 \pm 0,32}{6,4 \pm 0,32}$
Длина семени	$\frac{14,5 \pm 0,72}{14,3 \pm 0,71}$	$\frac{15,6 \pm 0,78}{15,6 \pm 0,78}$	$\frac{15,4 \pm 0,72}{15,3 \pm 0,76}$

Примечание: в числителе представлены данные за 2016 г., в знаменателе – за 2017 г.

Анализ фенофаз развития изучаемых популяций эхиноцистиса лопастного в вегетационный период в изучаемых объектах Чечерского района в 2016–2017 гг. (таблица 4) показал, что появление всходов в 2017 г. наступило на 10–14 дней позже по сравнению с 2016 г.; фазы образования стебля и облиственности на 8–12 дней; полное олиствление наступило на 6–10 дней позже; набухание цветочных почек – 7–9 дней; полная бутонизация 10–13 дней; начало цветения 8–15 дней; полное цветение 3–7 дней; отцветание – 9–13 дней; начало образования плодов 11–15 дней; обсеменение – 12–14 дней; усыхание и отмирание растений 13–18 дней. Таким образом, в Чечерском районе наступление фенофаз происходило на 9–12 дней позже, чем в 2016 г.

Таблица 4 – Фенофазы развития изучаемых популяций эхиноцистиса лопастного в вегетационный период в изучаемых объектах Чечерского района в 2016–2017 гг.

Фенофазы	Дата наступления фенофаз					
	Популяции					
	1	2	3	4	5	6
Появление всходов	<u>04.05</u> 14.05	<u>29.04</u> 14.05	<u>30.04</u> 14.05	<u>04.05</u> 14.05	<u>29.04</u> 14.05	<u>30.04</u> 14.05
Образование стебля и обли- ственность	<u>19.05</u> 27.05	<u>15.05</u> 27.05	<u>15.05</u> 27.05	<u>19.05</u> 27.05	<u>15.05</u> 27.05	<u>15.05</u> 27.05
Полное облиствение	<u>25.06</u> 01.07	<u>20.06</u> 01.07	<u>20.06</u> 01.07	<u>25.06</u> 01.07	<u>20.06</u> 01.07	<u>20.06</u> 01.07
Набухание цветочных почек	<u>29.06</u> 05.07	<u>27.06</u> 05.07	<u>27.06</u> 05.07	<u>29.06</u> 05.07	<u>27.06</u> 05.07	<u>27.06</u> 05.07
Полная бутонизация	<u>05.07</u> 15.07	<u>02.07</u> 15.07	<u>02.07</u> 15.07	<u>05.07</u> 15.07	<u>02.07</u> 15.07	<u>02.07</u> 15.07
Начало цветения	<u>08.07</u> 21.07	<u>05.07</u> 16.07	<u>05.07</u> 20.07	<u>08.07</u> 16.07	<u>05.07</u> 16.07	<u>05.07</u> 16.07
Полное цветение	<u>29.07</u> 05.08	<u>26.07</u> 01.08	<u>26.07</u> 06.08	<u>29.07</u> 01.08	<u>26.07</u> 01.08	<u>26.07</u> 01.08
Отцветание	<u>17.08</u> 30.08	<u>15.08</u> 24.08	<u>15.08</u> 30.08	<u>17.08</u> 24.08	<u>15.08</u> 24.08	<u>15.08</u> 24.08
Начало образования плодов	<u>24.08</u> 06.09	<u>22.08</u> 02.09	<u>22.08</u> 06.09	<u>24.08</u> 02.09	<u>22.08</u> 02.09	<u>22.08</u> 02.09
Обсеменение	<u>07.09</u> 21.09	<u>05.09</u> 17.09	<u>05.09</u> 21.09	<u>07.09</u> 17.09	<u>05.09</u> 17.09	<u>05.09</u> 17.09
Усыхание и отмирание все- го растения	<u>23.09</u> 09.10	<u>21.09</u> 05.10	<u>21.09</u> 09.10	<u>23.09</u> 06.10	<u>22.09</u> 06.10	<u>22.09</u> 06.10

Примечание: в числителе указаны сроки наступления фенофаз в 2016 г., в знаменателе – в 2017 г.

Анализ некоторых морфологических показателей изучаемых популяций в пойме р. Сож Чечерского района (таблица 5) выявил, что в 2016 г. длина плетей на (0,5–0,8) м, длина листовой пластинки на (0,3–0,6) см были длиннее, чем в 2017 г. наибольшая разница в диаметре плетей наблюдалась в 2016 г во второй популяции – 0,3 мм по сравнению с 2017 г., минимальная – 0,1 мм в четвертой популяции, а в шестой диаметр плетей в 2016 и 2017 гг был практически одинаковым. Длина плода на (0,1–0,2) см, а длина семени на (0,2–0,3) см оказались больше, чем в 2016 г. Длина плетей в популяциях варьировала от 6,1 см до 7,4 см; диаметр плетей от 4,1 мм до 4,9 мм; длина листовой пластинки от 7,2 см до 8,8 см; длина плода от 5,2 см до 6,7 см; длина семени от 14,1 см до 15,7 см.

Таблица 5 – Некоторые морфологические показатели эхиноцистиса лопастного в пойме р. Сож Чечерского района, 2016–2017 гг.

Фенофазы	Популяции					
	1	2	3	4	5	6
Длина плетей, м	<u>7,4 ± 0,37</u> 6,8 ± 0,40	<u>7,2 ± 0,36</u> 6,7 ± 0,41	<u>6,9 ± 0,34</u> 6,1 ± 0,32	<u>6,8 ± 0,3</u> 6,2 ± 0,34	<u>7,2 ± 0,36</u> 6,5 ± 0,32	<u>7,2 ± 0,36</u> 6,4 ± 0,38
Диаметр плетей, мм	<u>4,5 ± 0,22</u> 4,3 ± 0,21	<u>4,4 ± 0,22</u> 4,1 ± 0,19	<u>4,8 ± 0,24</u> 4,7 ± 0,23	<u>4,7 ± 0,23</u> 4,5 ± 0,22	<u>4,9 ± 0,24</u> 4,9 ± 0,24	<u>4,8 ± 0,28</u> 4,6 ± 0,23
Длина листовой пластинки, см	<u>8,8 ± 0,44</u> 8,5 ± 0,51	<u>7,8 ± 0,35</u> 7,6 ± 0,45	<u>7,6 ± 0,38</u> 7,2 ± 0,41	<u>7,8 ± 0,39</u> 7,4 ± 0,37	<u>8,1 ± 0,40</u> 7,7 ± 0,38	<u>7,9 ± 0,39</u> 7,3 ± 0,36
Длина плода, см	<u>6,7 ± 0,33</u> 6,6 ± 0,33	<u>5,4 ± 0,27</u> 5,2 ± 0,26	<u>5,7 ± 0,28</u> 5,6 ± 0,28	<u>5,4 ± 0,27</u> 5,2 ± 0,26	<u>5,7 ± 0,28</u> 5,6 ± 0,28	<u>5,4 ± 0,27</u> 5,3 ± 0,26
Длина семени, мм	<u>15,7 ± 0,98</u> 5,5 ± 0,93	<u>14,5 ± 0,91</u> 14,3 ± 0,85	<u>14,8 ± 0,82</u> 14,5 ± 0,77	<u>14,4 ± 0,78</u> 14,1 ± 0,70	<u>15,1 ± 0,88</u> 14,8 ± 0,74	<u>14,6 ± 0,90</u> 14,2 ± 0,71

Примечание: в числителе указаны сроки наступления фенофаз в 2016 г., в знаменателе – в 2017 г.

Заключение. Сравнительный анализ фенофаз развития изучаемых популяций эхиноцистиса лопастного в Ветковском районе в 2016–2017 гг. показал, что в 2017 г. в связи с неблагоприятными метеорологическими условиями фенофазы задержали свое развитие на 10–15 дней позже, чем в 2016 г. Отмечается изменение морфологических показателей эхиноцистиса как по годам исследований, так и между изучаемыми популяциями. Следует отметить, что морфологические показатели в 2016 г. оказались несколько выше, чем в 2017 г.

В популяциях эхиноцистиса в Чечерском районе наступление фенофаз также происходило на 9–12 дней позже, чем в 2016 г. Морфологические показатели в 2016 г. также были выше в 2016 г.

Таким образом, метеорологические условия 2017 г. оказали влияние на замедление темпов развития и снижение морфологических показателей эхиноцистиса лопастного.

Литература

1. Парфенов, В.И. Современная антропогенная динамика флоры: к проблеме мониторинга инвазивных чужеродных видов / В.И. Парфенов // Мониторинг состояния растительного мира : материалы Междунар. науч. конф., Минск, 22–26 сент. 2008 г. / Ин-т эксперимент. бот. им. В.Ф. Купречича НАН Беларуси ; редкол. : Н.А. Ламан (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2008. – С. 82–83.
2. Дубовик, Д.В. Инвазионные виды во флоре Беларуси / Д.В. Дубовик, А.Н. Скуратович, Д.И. Третьяков // Проблемы сохранения биологического разнообразия и использования биологических ресурсов : материалы II-ой Междунар. науч.-практ. конф. : сб. науч. работ / под общ. ред. В.И. Парфенова. – Минск, 2012. – С. 443–446.
3. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: результаты наблюдений, 2011 / под общ. ред. С.И. Кузьмина, И.В. Комоско. – Минск : «Бел НИЦ «Экология», 2012. – С. 201–205.
4. Мотыль, М. Разнообразие золотарника в Беларуси и биорациональные способы ограничения его инвазивного распространения / М. Мотыль, И. Гаранович // Наука и инновации. – 2014. – № 4 (134). – С. 65–67.
5. Чумаков, Л.С. Эколого-биотопическая характеристика золотарника канадского (*Solidago Canadensis* L.) / Л.С. Чумаков [и др.] // Экологический вестник. – 2014. – № 4 (30). – С. 110–117.
6. Агрессивные чужеродные виды диких животных и дикорастущих растений на территории Республики Беларусь // Мин-во природных ресурсов и охраны окружающей среды РБ. – Минск, 2008. – 44 с.
7. Дайнеко, Н.М. Развитие популяций инвазивного вида эхиноцистиса лопастного (*Echinocystis lobata* (Michx.) Torr. et Gray) в пойме р. Сож Гомельской области / Н.М. Дайнеко, С.Ф. Тимофеев, А.Д. Булохов, Н.Н. Панасенко // Мелиорация. – 2017. – №1 (79). – С. 70–75.
8. Панасенко, Н.Н. Новые сведения о сообществах инвазионных видов в Брянской области / Н.Н. Панасенко, Л.Н. Анищенко, Ю.Г. Поцепай // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. – 2013. – Т. 118, вып. 1. – С. 73–80.
9. Луканская, А.А. Ботанико-экологические особенности эхиноцистиса лопастного, произрастающего на территории центральной полосы Европейской части России / А.А. Луканская, Ю.В. Зеленова, И.В. Якунина // Вестник ТГУ. – 2014. – Т. 19, вып. 2. – С. 785–790.
10. Черепанов, С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР) / С.К. Черепанов. – СПб. : Мир и семья, 1995. – 992 с.
11. Бейдеман, И.Н. Методика изучения фенологии растений и растительных сообществ / И.Н. Бейдеман. // Новосибирск : Изд-во «Наука», 1974. – 161 с.
12. Дайнеко, Н.М. Развитие популяций инвазивного вида эхиноцистиса лопастного (*Echinocystis lobata* (Michx.) Torr. et Gray) в пойме р. Сож Гомельской области / Н.М. Дайнеко [и др.] // Мелиорация. – 2017. – №1 (79). – С. 70–75.

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины,

²Брянский государственный университет им. академика И.Г. Петровского²

УДК 591.55:595.76:574.5(282.247.321.78)(282.247.321.7)

Оценка состояния комплексов жесткокрылых прибрежных экосистем рек Ипуть и Сож

А.А. КАБЫШЕВА, Н.Г. ГАЛИНОВСКИЙ

Приведена оценка состояния комплексов жесткокрылых прибрежных экосистем рек Ипуть и Сож. Проанализирован видовой состав, выявлены экологические особенности, степень доминирования и параметры биоразнообразия, проведен таксономический анализ в сообществах жесткокрылых рек Ипуть и Сож под действием рекреационной нагрузки. Было установлено, что рекреационная нагрузка не всегда приводит к резкому сокращению видового богатства и численности, но в то же время в этих условиях наблюдается перестройка видового состава и структуры сообществ жесткокрылых.

Ключевые слова: жесткокрылые, прибрежные экосистемы, рекреационная нагрузка, гидропреферендум, биопреферендум, пищевая специализация.

The work is provided with an assessment of the coleopteran complexes of rivers Iput and Sozh coastal ecosystems. The analysis of species composition, the ecological features, degree of dominance and biodiversity parameters, taxonomical review in beetle communities of the Iput and Sozh rivers under the recreational load has been carried out. The recreational pressure does not always lead to severe reduction of species abundance and richness but at the same time we can observe a rebuilding of species composition and a coleopterans communities structure.

Keywords: beetles, coastal ecosystems, recreational load, hydropreference, biopreference, nutrition specialization.

Введение. Изучение жесткокрылых, обитающих в герпетобии береговых экосистем важны в связи с интенсивным процессом изменения ландшафтов человеком, вследствие чего многие виды исчезают, уменьшаются в численности, а некоторые, наоборот, получают ряд преимуществ для обитания и развития. По изменению состава сообществ, в том числе и прибрежных, можно судить об изменениях окружающей среды определенных территорий.

Исследования прибрежной фауны жесткокрылых Гомеля и Гомельской области мало-численны. Среди них в большей мере проводились исследования, связанные с изучением герпетобионтных жесткокрылых береговых сообществ реки Сож [1], [2]. Установлено, что увеличение рекреационной нагрузки не всегда приводит к резкому сокращению видового богатства и численности, но в этих условиях наблюдается перестройка видового состава и структуры сообществ жесткокрылых. Исследовались также прибрежные сообщества жесткокрылых реки Ипуть [3], [4], где был отмечен новый вид для фауны Беларуси [5].

Таким образом, **целью** нашего исследования было выявление особенностей населения и структуры сообществ жесткокрылых прибрежных экосистем рек Сож и Ипуть с различной степенью рекреационной нагрузки.

Материалы и методы. Исследования проводились на 6 стационарных участках прибрежной зоны рек Ипуть и Сож (по 3 на каждой реке). Выбор участков осуществлялся по 3 параметрам: проективному покрытию, следам посещения и частоте посещаемости. В зависимости от них рекреационное воздействие на участках оценивали по пятибалльной шкале (таблица 1).

Таблица 1 – Степень рекреационного воздействия на прибрежные экосистемы

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

Стационар «Ипуть 1». Располагался вблизи моста через реку Ипуть, активно посещался отдыхающими. Степень рекреационного воздействия – IV балла. Наблюдались значительные загрязнения полимерными изделиями. Берег пологий. Из растительности преобладали: горец птичий, подорожник большой, мятлик луговой, лапчатка гусиная, клевер ползучий, ива козья. Проективное покрытие – 35 %.

Стационар «Ипуть 2». Подвергался незначительному рекреационному воздействию со стороны отдыхающего населения (II балла). Берег обрывистый. Растительность: клевер луговой, ослинник двулетний, полынь обыкновенная, мелколепестник канадский, мятлик луговой, осока острая, тимофеевка луговая, одуванчик обыкновенный, подорожник большой, пижма обыкновенная, ива козья, ежевика сизая. Проективное покрытие – 80 %.

Стационар «Ипуть 3». Участок не являлся активной зоной отдыха человека, практически не посещался населением города (степень рекреационного воздействия – I балл). Растительность: мятлик, тимофеевка, клевер пашенный, пижма обыкновенная, клоповник мусорный, тысячелистник обыкновенный, подорожник ланцетолистный, одуванчик обыкновенный, лапчатка гусиная. Проективное покрытие – 85 %.

Стационар «Сож 1». Располагался вблизи гребной базы БФСО «Динамо», являлся активным местом отдыха человека, вследствие чего характеризовался наибольшей рекреационной нагрузкой из всех представленных участков берега реки Сож – IV балла. Засоренность данного участка невысокая.

Стационар «Сож 2». Отмечалась небольшая засоренность полимерными изделиями. Степень рекреационного воздействия – III балла. Берег пологий. Растительность: девясил иволистный, мятлик луговой, подорожник большой, лапчатка гусиная, пижма обыкновенная, сусак зонтичный, осока острая, клоповник мусорный, ситник тонкий, ива козья, ежевика сизая. Проективное покрытие – 70 %.

Стационар «Сож 3». В наименьшей степени был подвержен рекреационному воздействию (II балла). Берег пологий. Растительность: дурнишник обыкновенный, пижма обыкновенная, мелколепестник канадский, вероника колосистая, подорожник большой, девясил иволистный, клоповник мусорный, мятлик луговой, тимофеевка луговая, ива козья. Проективное покрытие – 85 %.

Сбор жесткокрылых осуществлялся с использованием почвенных ловушек (фиксатор – 9 % столовый уксус). На каждом участке размещалось по 10 ловушек в линию. Смена ловушек осуществлялась в течение 14 дней. Собранные имаго жесткокрылых размещались на ватные слои для дальнейшего определения. Идентификация видов жесткокрылых проводилась при помощи общепринятых определительных таблиц.

Анализ параметров разнообразия проведен с использованием индекса информационного разнообразия Шеннона, индекса концентрации доминирования Симпсона, выравнинности по Пиелу, а так же графического метода описания – рангового распределения обилий. Для сравнительного анализа сходства сообществ жесткокрылых использовался кластерный анализ, в основе которого был заложен коэффициент Жаккара. Доминирование в сообществах определялось по шкале Ренконена [6].

Результаты исследований. За период исследований было коллектировано 3992 экземпляра жесткокрылых, относящихся к 133 видам и 20 семействам. Наибольшим превосходством, как в численном, так и в видовом отношении, отличались жуужелицы – 64 вида при относительном обилии особей от 46,15 % до 87,17 % в сообществе. В колеоптерокомплексах берега реки Сож с ростом рекреационной нагрузки наблюдалось снижение обилия представителей данного семейства. Так, на стационаре «Сож 3» обилие жуужелиц составляло 87,17 %, на участке «Сож 2» – 70,79 %, а в сообществах стационара с наибольшей рекреационной нагрузкой («Сож 1») – 56,82 %. В то же время на исследованных прибрежных территориях реки Ипуть обилие представителей данного семейства, наоборот, возрастало: относительное обилие жуужелиц на участке «Ипуть 1» составляло 46,15 %, на стационаре «Ипуть 2» несколько выше – 50,56 %, и наибольшее обилие особей зафиксировано на участке «Ипуть 1» – 58,3 %. Так же в видовом отношении доминантами выступали семейства Curculionidae (20 видов), Staphylinidae (11 видов) и Chrysomelidae (6 видов). Однако по относительному обилию особей данные семейства уступали пластинчатоусым (2,9 %–26,41 %).

В результате исследований выяснилось, что наибольшим видовым богатством отличались стационарные участки берега реки Ипуть (117 видов), здесь же зафиксировано и наибольшее число особей жесткокрылых – 2594. Исследованные участки берега реки Сож характеризовались меньшим видовым составом (92) и числом особей (1398).

Следует отметить, что с ростом рекреационного воздействия в сообществах жесткокрылых берега реки Ипуть снижалось как видовое богатство, так и обилие особей. Так, в прибрежных комплексах участка с наименьшей степенью рекреационной нагрузки количество видов и особей составляло 90 и 1302 соответственно, в то же время в сообществах стационара «Ипуть 2» количество особей сократилось практически вдвое (8390 особей), а видовое богатство составило 73 вида. И, наконец, наименьшие показатели зафиксированы в сообществах участка «Ипуть 1» – 64 вида и 462 особи жесткокрылых. Однако на стационарах берега реки Сож такая тенденция не прослеживалась. Таким образом, можно сказать, что рекреационная нагрузка не всегда приводит к снижению видового спектра и численности жесткокрылых.

В результате исследований, на основании проведенного однофакторного дисперсионного анализа было выявлено, что численность жесткокрылых достоверно ($F = 4,55$; $p = 0,0004$) зависит от месторасположения исследованной экосистемы (рисунок 1).

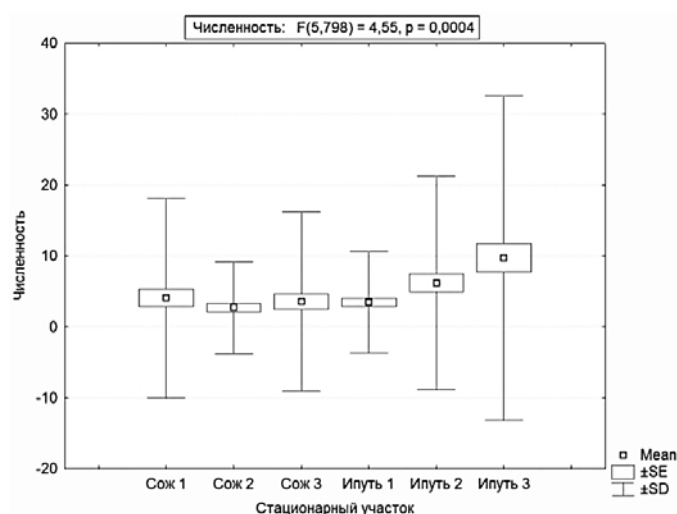


Рисунок 1 – Изменение численности жесткокрылых на стационарных участках берегов реки Сож и Ипуть

Анализируя степень доминирования жесткокрылых в исследованных сообществах, следует отметить, что общих доминантных видов для 6 изученных участков зафиксировано не было. Это косвенно может свидетельствовать о своеобразной уникальности видового состава прибрежных сообществ каждой из рек. Однако, в то же время, следует выделить виды, которые являлись доминантами на том или ином прибрежном участке каждой из рек. Так, например, чернотелка *Crypticus quisquilis* (18,94 %) и жужелицы *Amara aenea* (19,49 %) и *Harpalus affinis* (5,65 %) являлись абсолютными доминантами на стационаре «Сож 1», в то время как на остальных участках данные жесткокрылые отмечены как субдоминанты, рецеденты и субрециденты, либо вовсе не были зафиксированы. Мелкий *Phalacrus caricis*, предпочитающий открытые местообитания с невысоким проективным растительным покрытием, был отмечен как доминантный вид лишь на стационарном участке с высокой степенью антропогенной нагрузки – «Ипуть 1» (относительное обилие составило 5,84 %). Жужелица *Pterostichus melanarius* преобладала на стационарах «Сож 2» (13,93 %) и «Сож 3» (22,77 %), на остальных же участках данный вид отмечен как рецедент и субрецидент с долей менее процента.

На основании показаний индекса фаунистического сходства Жаккара был проведен кластерный анализ и объединение сообществ жесткокрылых на всех изученных участках (рисунок 2). Было установлено, что видовой состав жесткокрылых стационаров «Ипуть 2» и «Ипуть 3», которые отличались незначительной рекреационной нагрузкой, сходен более чем на 50 %. Эти участки образуют отдельный кластер. В этой же ветви кластера выделяются и участки «Сож 2» и «Сож 3», которые также объединены в единый кластер.

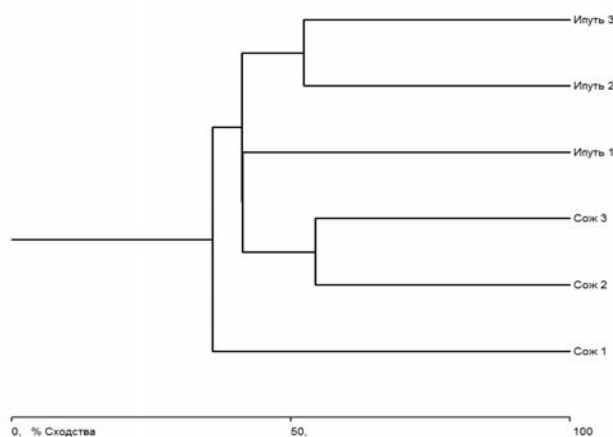


Рисунок 2 – Дендрограмма сходства сообществ жесткокрылых берегов рек Ипуть и Сож

Все вышеперечисленные участки схожи по видовому составу с участком «Ипуть 1», который был подвержен наибольшему рекреационному воздействию (рисунок 2).

Примечательно, что участок более крупной реки («Сож 1»), характеризующийся высокой степенью рекреационной нагрузки, образует единый кластер со всеми исследованными участками. Это свидетельствует о значительном видовом сходстве сообществ участка «Сож 1» со всеми изученными стационарами.

Для колеоптерокомплексов берега реки Сож характерно невысокое информационное разнообразие (колебалось в пределах от 1,27 до 1,33). Наименьший показатель индекса Шеннона был зафиксирован на участке, который в меньшей степени подвергался рекреационной нагрузке. При оценке рангового распределения обилий в сообществах жесткокрылых берега реки Сож следует отметить тот факт, что на стационаре «Сож 1», который подвергался наибольшей рекреационной нагрузке со стороны отдыхающего населения, редких видов больше, чем обильных (рисунок 3). Это подтверждается высоким показателем концентрации доминирования на данном участке (0,09). Эти особенности позволяют отнести распределение видов жесткокрылых в сообществах с наибольшей степенью рекреационного воздействия к модели логарифмического ряда. Стационар с наименьшей рекреационной нагрузкой в большей мере соответствует модели лог-нормального распределения (рисунок 3).

Линия ранжирования стационарного участка с промежуточной степенью рекреационного воздействия («Сож 2») более сглажена, что говорит о наибольшей выравненности на данном участке – 0,85, в то время как на участках «Сож 1» и «Сож 3» показатели выравненности несколько ниже – 0,74 и 0,75 соответственно. Таким образом, распределение видов жесткокрылых на стационаре «Сож 2» наиболее соответствует модели «разломанного стержня» МакАртура, что характерно для сообществ с неперекрывающимися нишами и интенсивной межвидовой конкуренцией.

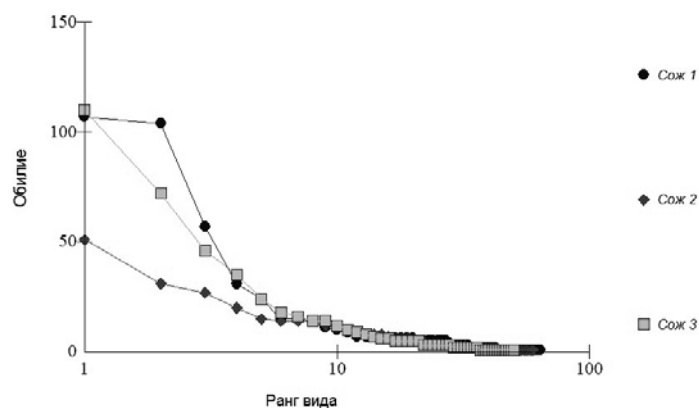


Рисунок 3 – Ранговое распределение обилий в сообществах жесткокрылых берега реки Сож

Для сообществ жесткокрылых берега реки Ипуть также характерно невысокое информационное разнообразие (изменялось в пределах от 1,47 до 1,58), однако показатели были несколько выше, чем в сообществах жесткокрылых реки Сож.

При оценке рангового распределения обилий выяснилось, что участок, не подверженный воздействию со стороны населения, соответствует модели лог-нормального распределения (рисунок 4), что может говорить о близости видовой структуры колеоптерокомплексов к таковой в естественных ценозах. В то же время распределение видов в сообществах, которые подвергались давлению со стороны человека, соответствует модели разломанного стержня.

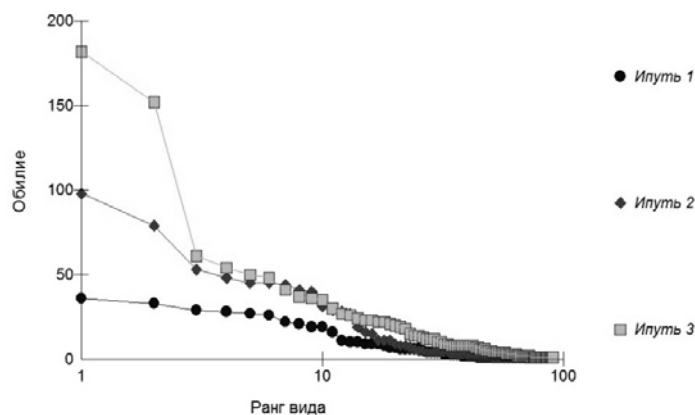


Рисунок 4 – Ранговое распределение обилий в сообществах жесткокрылых берега реки Ипуть

Наибольшим показателем выравненности характеризуется участок «Ипуть 1» – 0,85. Высокий показатель выравненности может указывать на то, что под действием рекреационной нагрузки данное сообщество претерпевало перестройку своей видовой структуры.

В результате исследований нами были проанализированы следующие экологические структуры: отношение жесткокрылых к влажности окружающей среды (гигропреферендум), биотопическая приуроченность (биопреферендум) и трофическая структура жесткокрылых в изученных сообществах (таблица 4).

В результате проведенных исследований на шести стационарных участках берегов рек Ипуть и Сож было выявлено 6 экологических групп по отношению к влажности. В целом, для береговых сообществ жесткокрылых рек Ипуть и Сож характерно преобладание мезофилов. Их видовое богатство составляло от 22 до 32 видов, а относительное обилие – от 31,7 % до 65,6 %. Группу субдоминантов составляли гигрофилы, мезогигрофилы и мезоксерофилы. В наименьшей степени представлены ксерофилы и гидробионты. Представители группы гидробионтов (*Hydrochara caraboides*, *Dryops luridus*) относятся к обитателям водной и полуводной растительности, которые, по всей видимости, попали в ловушку случайно.

Следует отметить, что в береговых сообществах реки Сож с ростом рекреационной нагрузки катастрофически повышалась численность ксерофильных видов (*Harpalus griseus*, *Cleonis pigra*, *C. quisquilius*, *Opatrum sabulosum*, *Harpalus distinguendus* и др.).

Таблица 4 – Экологические группы жесткокрылых прибрежных сообществ рек Ипуть и Сож

Экологические группы	Стационары											
	Ипуть 1		Ипуть 2		Ипуть 3		Сож 1		Сож 2		Сож 3	
	Виды	Обилие, %	Виды	Обилие, %	Виды	Обилие, %	Виды	Обилие, %	Виды	Обилие, %	Виды	Обилие, %
Гигропреферендум												
Гигрофилы	17	15,8	12	8,1	21	14,4	10	3,8	16	13,7	12	19,9
Гидробионты	0	0	2	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0

Окончание таблицы 4

Ксерофилы	7	10,8	7	6,5	11	8,7	8	41,7	4	3,6	3	0,8
Мезогигрофилы	11	16,2	10	8,0	9	6,6	5	2,7	5	4,9	6	9,3
Мезоксерофилы	7	9,7	14	14,8	17	14,6	14	20,0	10	12,3	7	11,6
Мезофилы	22	47,4	28	62,4	32	55,7	27	31,7	25	65,6	22	58,4
Биопреферендум												
Береговой	15	16,7	9	3,7	14	12,8	5	2,4	7	9,0	9	14,1
Болотный	3	1,7	3	4,1	5	1,9	2	0,7	1	2,7	2	8,5
Водный	0	0	2	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0
Лесной	11	10,2	12	15,4	15	7,2	11	4,4	9	7,4	7	4,8
Луговой	15	17,8	21	23,5	28	31,9	22	29,0	20	40,2	15	46,6
Полевой	17	36,8	19	27,7	24	30,0	17	59,7	17	32,5	14	23,2
Синантропный	1	3,5	2	6,5	1	0,5	0	0	1	0,3	1	0,6
Убиквисты	2	13,4	5	18,8	3	15,8	7	3,8	5	7,9	2	2,3
Пищевая специализация												
Детритофаги	1	0,2	2	0,6	3	2,2	1	1,1	3	1,4	2	0,6
Зоофаги	16	14,3	13	9,0	19	10,8	7	5,1	12	14,5	13	19,1
Копрофаги	1	7,8	1	11,8	1	14,0	1	0,2	1	5,5	1	1,2
Лимфофаги	1	2,4	2	2,4	2	0,3	2	1,1	0	0	0	0
Миксофаги	24	44,2	26	41,9	32	35,4	26	51,9	23	57,1	20	67,9
Мицетофаги	1	5,9	1	3,3	1	3,2	0	0,0	1	0,3	1	2,9
Некрофаги	1	3,5	2	6,5	1	0,5	1	0,2	1	0,3	2	0,8
Палинофаги	0	0	0	0	0	0	1	0,4	1	0,3	0	0
Сапрофаги	10	15,2	12	18,6	6	23,0	12	35,2	10	11,8	5	3,5
Фитофаги	9	6,7	14	5,9	25	10,7	13	4,9	8	9,0	6	3,9
Всего видов	64		73		90		64		60		50	
Всего особей		462		830		1302		549		366		483

Так, на стационарном участке «Сож 3» зафиксировано 3 вида ксерофилов при относительном обилии 0,8 %, а на участке «Сож 1» – уже 8 видов при относительном обилии 41,7 %. Это можно объяснить тем, что с ростом рекреационного воздействия уменьшается проективное покрытие почвы.

При рассмотрении спектра биоценозов, в которых предпочитают обитать собранные жесткокрылые, было выявлено 8 биопреферендумов, из которых наиболее широко были представлены луговые виды. Их численность в сообществах более крупной реки снижалась с ростом рекреационной нагрузки, а на стационарах притока Сожа, наоборот, увеличивалась. Наряду с предыдущей группой наблюдалось доминирование полевых видов. К числу преобладающих луговых видов следует отнести *Amara majuscula*, *Calathus fuscipes*, *Harpalus flavescens* и др. Из полевых видов преобладали: *C. quisquilis*, *Poecilus versicolor*, *Harpalus rufipes*. Преобладание луговых и полевых видов объясняется расположением стационаров, а так же наличием на участках соответствующей растительности: лугового и полевого разнотравья.

Группу субдоминантов составляли береговые и лесные жесткокрылые. В меньшей степени были зафиксированы убиквисты, водные, болотные и синантропные виды. Следует отметить, что в сообществах жесткокрылых берега беки Сож убиквисты по обилию особей занимали четвертую позицию из восьми (13,4 %–18,8 %), уступая полевым, луговым и береговым видам. В то же время в таковых сообществах реки Ипуть относительное обилие данной группы не превышало 7,9 %.

В результате проведенных исследований было выявлено 10 трофических групп: детритофаги, зоофаги, копрофаги, лимфофаги, миксофаги, мицетофаги, некрофаги, сапрофаги, фитофаги и палинофаги.

В населении жуков преобладали миксофаги, к которым относились представители семейства Carabidae (*A. aenea*, *Calathus erratus*, *Harpalus affinis* и другие), и зоофаги. Представители последних – жужелицы (*Bembidion quadrimaculatum*, *Chlaenius nigricornis*, *Microlestes minutulus* и др.) и кокцинеллиды (*P. quatuordecimpunctata*). Сапрофаги в широком смысле доминировали по относительному обилию в сообществах некоторых стационаров. В меньшей степени были представлены фитофаги. Наименьшим видовым богатством характеризовались такие группы жуков как копрофаги, лимфофаги, мицетофаги, некрофаги, детритофаги и палинофаги. Последние были зафиксированы лишь на стационарах «Сож 2» и «Сож 3».

Заключение. Колеоптерокомплексы берегов исследованных территорий достаточно широко представлены видами (133 вида из 20 семейств), среди которых преобладали жужелицы. Прибрежные сообщества каждой из рек уникальны по видовому составу, что подтверждается результатами кластерного анализа и отсутствием общих доминантных видов. Видовое разнообразие и богатство жесткокрылых в прибрежных сообществах реки Ипуть значительно превышало таковое в сообществах берега реки Сож. Для прибрежных сообществ жесткокрылых рек Ипуть и Сож характерно невысокое информационное разнообразие, которое увеличивалось по мере снижения рекреационного воздействия. Прибрежные сообщества исследованных рек сложены преимущественно мезофильными, мезогигрофильными и гигрофильными полевыми и луговыми миксофагами и зоофагами.

Литература

1. Галиновский, Н.Г. Жужелицы (Coleoptera, Carabidae) береговых урбоценозов реки Сож (на примере г. Гомеля) / Н.Г. Галиновский // Экологический вестник. – 2009. – № 1. – С. 116–124.
2. Галиновский, Н.Г. Жесткокрылые (Ectognatha, Coleoptera) прибрежных урбоценозов р. Сож / Н.Г. Галиновский // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2010. – № 3. – С. 166–172.
3. Кабышева, А.А. Эколого-фаунистический обзор колеоптерокомплексов берегов рек Ипуть и Сож с различной степенью рекреационной нагрузки / А.А. Кабышева, Н.Г. Галиновский // Проблемы рационального использования природных ресурсов и устойчивое развитие Полесья : сб. докл. Междунар. науч. конф., Минск, 14–17 сент. 2016 г. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.] ; редкол. : В.Г. Гусак (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2016. – Т. 2. – С. 400–405.
4. Галиновский, Н.Г. Эколого-фаунистический обзор жесткокрылых (Ectognatha, Coleoptera) прибрежных сообществ рек Сож и Ипуть в окрестностях города Гомель / Н.Г. Галиновский, А.А. Кабышева // Веснік МДПУ імя І.П. Шамякіна. – 2016. – №2 (48). – С. 22–29.
5. Галиновский, Н.Г. Редкие и новые для фауны Беларуси виды жесткокрылых (Coleoptera) Гомельского региона / Н.Г. Галиновский, А.Н. Крицкая, А.А. Кабышева // Зоологические чтения – 2015: матер. Междунар. научно-практ. конф., Гродно, 22–24 апреля 2015 г. / ГрГУ им. Я. Купалы ; редкол. : О.В. Янчуревич (отв. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2015. – С. 69–70.
6. Renkonen, O. Statistisch-Okologische Untersuchungen uber die terrestrische Kaferwelt der finnischen Bruchmoore / O. Renkonen // Ann. Zool. – Bot. Soc. Fennicae. – 1938. – №. 6. – P. 1–231.

Характеристика латерального распределения ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am в поверхностном слое почвы различных биогеоценозов белорусского сектора зоны отчуждения Чернобыльской АЭС

С.А. КАЛИНИЧЕНКО

Представлены результаты многолетних исследований особенностей латерального распределения ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am в верхнем слое почвы различных биогеоценозов на территории зоны отчуждения ЧАЭС. Определены параметры варьирования содержания радионуклидов в верхнем слое почвы бывшего сельскохозяйственного угодья и участков, расположенных в хвойном и лиственном лесу. Обнаружено снижение значений коэффициента вариации (V) со временем, прошедшим с момента аварии. Наибольшее значение варьирования (75,2 %) было получено для ^{90}Sr в почве соснового леса. Отмечено влияние ряда факторов на горизонтальное перераспределение радионуклидов.

Ключевые слова: латеральное распределение, коэффициент вариации, radionuclides (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am).

The results of long-term investigations of the ^{137}Cs , ^{90}Sr , and ^{241}Am horizontal distribution in the upper soil layer in various ecosystems on the territory of the exclusion zone of the Chernobyl NPP are presented in the article. The parameters of the variation the radioisotopes activities in the upper soil layer in the former agricultural lands as well as in the coniferous and deciduous forests were analyzed. A decrease in the values of the coefficient of variation (V) with the time elapsed since the accident was revealed. The highest value of the coefficient of variation (75,2 %) was obtained for ^{90}Sr in the soil in the pine forest. The effect of some factors on the horizontal redistribution of radionuclides is shown.

Keywords: horizontal distribution, coefficient of variation, radionuclides (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am).

Введение. В настоящее время радиоэкологическая обстановка загрязненных радионуклидами территорий в большей степени определяется не уровнями и количеством выпавших радиоактивных элементов с аэрозолями и частицами реакторного топлива, а погодноклиматическими и ландшафтными условиями, контролирующими биотическую и абиотическую миграцию радионуклидов. Формирование пространственного загрязнения поверхности почвы ближней зоны аварии на ЧАЭС является динамическим процессом, способным существенно изменить ситуацию с течением времени, прошедшего от момента выпадения радиоактивных осадков. Такие изменения зависят от ряда факторов как живой, так и неживой природы: погодноклиматические воздействия, ландшафтная дифференциация, сукцессионные процессы, связанные с изменением интенсивности и направленности антропогенного воздействия, деятельность живых организмов [1]–[4].

Исследование пространственного распределения радиоактивного загрязнения является важным условием разработки радиационных прогнозов. Изучение миграции радионуклидов с учетом пространственно-временной структуры ландшафтов зоны отчуждения ЧАЭС на разных масштабных уровнях может служить для пространственной оценки радиоэкологических ситуаций, являться основой радиологической экспертизы загрязненных территорий. К тому же, исследования распределения радионуклидов в ландшафтах можно использовать для выявления связи радиоактивного загрязнения с ландшафтными условиями, что имеет важное методическое значение для выявления факторов и механизмов формирования техногенных геохимических аномалий [1], [3].

Пространственные и временные закономерности ландшафтной дифференциации техногенных радионуклидов недостаточно изучены как из-за методических сложностей, так и вследствие их изменчивости на разных масштабных уровнях. По мнению российского исследователя В.Г. Линника [1] изучение ландшафтной дифференциации техногенных радионуклидов остается актуальным при организации радиационного мониторинга и планировании реабилитационных мероприятий на загрязненных территориях. Ландшафтный анализ и оценка распределения радионуклидов являются важным элементом системы радиационной

безопасности, направленной на оздоровление радиэкологической обстановки. Немаловажным фактором при этом является тип и степень лесорастительного покрытия исследуемого биогеоценоза. Специфика перераспределения радионуклидов будет существенно различаться в зависимости от типа формирования верхнего органогенного слоя, где в качестве биологического материала может выступать как быстро разлагающаяся подстилка лиственного леса, так и мощная многолетняя и многослойная подстилка сосняка. Иначе происходит пространственное перераспределение радионуклидов на поверхности участков, лишенных лесорастительного покрытия (луга, залежи, суходолы).

Согласно анализу факторов, определяющих долговременную динамику миграции радионуклидов в почвенно-растительном покрове, проведенного исследователями [2], специфической особенностью поставарийной ситуации является высокая степень гетерогенности радиоактивных веществ, выброшенных из аварийного блока, по радионуклидному составу и физико-химическим формам, миграционной среде и пространственного распределения радионуклидов на загрязненной территории. В начальный период после аварии загрязнение почвы экосистем зоны отчуждения радионуклидами характеризовалось высоким (до 60 % и выше) коэффициентом вариации [3]. В настоящее время, по мнению различных авторов [4]–[6], эти значения должны быть значительно ниже.

Материалы и методы исследований. Исследования проведены в белорусском секторе зоны отчуждения ЧАЭС на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника. В 2011–2017 гг. были изучены особенности горизонтального распределения ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am в почве биогеоценозов с различными лесорастительными условиями. Исследования проведены на территории гидроморфного смешанного лиственного леса с преобладанием березы (березняка), бывшего сельхозугодия (залежи) с автоморфным типом почвы и соснового леса с низким УГВ. Все три экспериментальных полигона расположены в ближней зоне (отчуждения) ЧАЭС в районе исследовательской станции «Масаны» на расстоянии около 10 км от эпицентра аварии (рисунок 1).

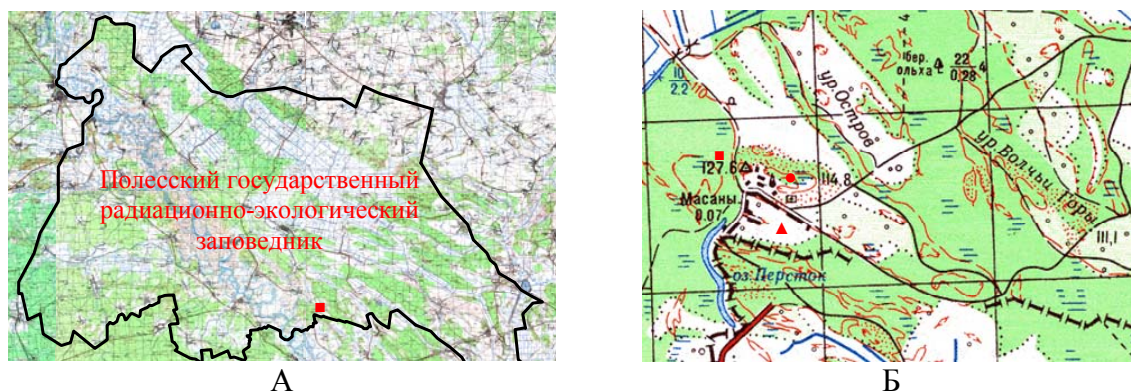


Рисунок 1 – Район проведения исследований – А (■) и участок карты-схемы с расположением экспериментальных полигонов – Б (■ – сосновый лес, ● – лиственный лес, ▲ – залежный луг)

С целью установления изменчивости (размаха варьирования) содержания радионуклидов в почве были определены коэффициенты вариации К. Пирсона (V), рассчитанные как отношение среднего квадратического отклонения для выборки (S_x) к средней арифметической ($\bar{x}$) из суммы частных или групповых средних: ($V = \frac{S_x}{\bar{x}} \times 100\%$).

При исследовании пространственной неоднородности радиоактивных выпадений был использован метод вложенных квадратов. Размер экспериментальных полигонов составил 100×100 м. Внутри основной экспериментальной площадки были выбраны малые размером 10×10 м, с которых проводился отбор смешанных образцов почвы стандартным пробоотборником диаметром 4 см на глубину 20 см. При этом одновременно были проведены измерения мощности дозы γ -излучения (МД) на высоте 1 м и 3–4 см от поверхности почвы при помощи дозиметра-радиометра МКС (EL) – 1117А.

Полевые исследования были проведены в сухую погоду в весенний период до отрастания травянистой растительности. Смешанные образцы почвы, включающие 5 уколов, упаковывались в полиэтиленовые пакеты, этикировались и передавались для лабораторных исследований (сушка, гомогенизация, спектрометрия и радиохимия).

Статистическая обработка результатов была проведена стандартными биометрическими методами (вариационная статистика и корреляционный анализ) [7].

Результаты исследований. Для радиоактивного загрязнения экспериментальных полигонов, как и для всей 30-км зоны ЧАЭС, характерен конденсационно-топливный тип выпадений. Поведение радионуклидов, представленных конденсационной компонентой, аналогично поведению радионуклидов глобальных выпадений. Радиологическое значение высокоактивных частиц реакторного топлива во многом зависит от плотности их выпадения, дисперсности, степени физической и химической устойчивости матрицы (склонность к деструкции) в реальных почвенно-климатических условиях. Однако в обоих случаях процесс латерального перераспределения радионуклидов по компонентам микрорельефа будет происходить по-разному. Это связано как с различиями в биогенной миграции, так и с физико-химическими свойствами самих элементов. Изменение как тех, так и других свойств определяется рядом факторов, среди которых мы рассматриваем наиболее определяющие, как для начального периода выпадений, так и для отдаленного (восстановительного) – это тип лесопокрывтия или его отсутствие и степень увлажнения поверхностных слоев почвы.

Оценка содержания радионуклидов в почве показала, что максимальные значения плотности загрязнения выбранного полигона на территории березняка составили: для ^{137}Cs – 6315,2 кБк/м² (170,7 Ки/км²), для ^{90}Sr – 3908,3 кБк/м² (105,6 Ки/км²), для ^{241}Am – 146,9 кБк/м² (4,0 Ки/км²). На территории залежи: для ^{137}Cs – 8079,4 кБк/м² (212,4 Ки/км²), для ^{90}Sr – 4550,9 кБк/м² (123,0 Ки/км²), для ^{241}Am – 148,9 кБк/м² (4,0 Ки/км²). В почве соснового леса: для ^{137}Cs – 5820,9 кБк/м² (157,3 Ки/км²), для ^{90}Sr – 2109,9 кБк/м² (57,0 Ки/км²), для ^{241}Am – 133,0 кБк/м² (3,6 Ки/км²).

Проведенные на высоте 1 м измерения МД на территории березняка показали невысокую вариабельность ($V = 11,9\%$), на высоте 3–4 см от поверхности почвы $V = 18,7\%$. Коэффициенты корреляции (r_{xy}) между МД на различной высоте и содержанием ^{137}Cs в почве значительно варьировали, что связано со сложным режимом увлажнения. Анализ МД на территории экспериментального полигона позволил судить о зависимости степени увлажнения поверхностных слоев почвы и лесопокрывтия на формирование γ -фона в биогеоценозе. Наименьшими уровнями МД характеризовались сильно увлажненные или полностью покрытые водой пробные площадки в большей степени покрытые лесом. Заметное изменение радиационной обстановки происходило по мере выхода на сухие участки поверхности с травянистой растительностью, не имеющие высоких деревьев. По всей видимости, на характер флуктуации МД на территории экспериментального полигона влияют не только указанные выше факторы, но и процессы первоначального выпадения аэрозолей на поверхность с последующим перераспределением активности. Естественно предположить, что в начальный период аварии максимум осадков характеризовались именно участки поверхности почвы, не покрытые лесом. Однако это не означает статический сценарий дальнейшего изменения радиоэкологической ситуации, когда наибольшее влияние оказывает исключительно физический распад. В ряде случаев, в зависимости от гетерогенности микрорельефа, типа и свойств почвы, деятельности живых организмов латеральная миграция может существенно ускоряться и значительно изменять радиационную обстановку. В связи с этим имеет место большая вероятность, что в отдаленный период аварии гидроморфные участки лесной поверхности, покрытые древесной растительностью, могут содержать наибольший запас радиоактивных веществ, никак себя не проявляющий, пока не измениться режим увлажнения.

Среднее значение МД на поверхности почвы залежи составило 4,01 мкЗв/ч, на высоте 1 м – 3,69 мкЗв/ч ($V = 8,5\%$). Сопоставление значений МД на территории исследуемого биогеоценоза (залежный луг) на поверхности почвы обнаружило высокую положительную корреляцию и схожую тенденцию проекционных следов с МД на высоте 1 м. Более высокая

точность сходимости в данном случае невозможна из-за увеличения интегральности формирования величины МД с высотой. На данном экспериментальном полигоне характер распределения уровней МД обусловлен в основном процессами первоначального выпадения аэрозолей на поверхность с последующим перераспределением активности с участием в нем биоты и климата. На момент радиоактивных выпадений данный участок представлял собой типичный агроценоз с минимальным набором травянистой растительности. Это обстоятельство позволяет рассматривать данный полигон в качестве примера влияния естественных сукцессионных процессов на горизонтальное распределение радионуклидов за время прошедшее с момента аварии, в отличие от участков, покрытых лесом.

Среднее значение МД на высоте 1 м в сосновом лесу составило 3,27 мкЗв/ч ($V = 5,5\%$), на поверхности почвы – 3,99 мкЗв/ч ($V = 9,5\%$), при этом r_{xy} составил 0,51. На данном полигоне с момента радиоактивных выпадений не происходило глобальных сукцессионных процессов, поэтому на горизонтальное перераспределение радионуклидов за время прошедшее с момента аварии влияли лишь естественные колебания в смене возрастной структуры леса, погодно-климатические условия и роющая деятельность животных. Гетерогенность микро-рельефа и режим увлажнения на залежи и в сосняке не могут оказывать существенного влияния на изменение радиационной обстановки, так как перепады высот незначительны и нивелируются роющей деятельностью копытных и других животных.

Анализ латеральной дифференциации ^{137}Cs в верхнем 20-см слое почвы березняка не выявил существенной неоднородности. Разница между минимальным и максимальным значениями составила 3,8 раза. В верхнем 20-см слое почвы залежи обнаружены участки с различными уровнями загрязнения, а разница между минимальным и максимальным значениями составила 5 раз. В верхнем 20-см слое почвы сосняка данная разница составила 3,7 раза. Коэффициент вариации радионуклида в почве березняка составил 27,4 %, для залежи – 34,0 %, для сосняка – 25,7 %, что является закономерным для отдаленного периода радиационной аварии. Представленные данные распределения ^{137}Cs указывают на определенное соответствие плотности загрязнения пробных площадей результатам γ -съемки. Участки с максимальными параметрами МД на высоте обнаруживают наиболее высокое содержание ^{137}Cs в почве. При этом эмпирический коэффициент корреляции между МД на высоте 1 м и содержанием ^{137}Cs в почве составил 0,07–0,21, для высоты 3–4 см $r_{xy} = 0,10$ –0,16. Графическое сравнение проекционных следов указывает на явную тенденцию выделения участков с наиболее высокими и низкими уровнями радиоактивного загрязнения в границах наших экспериментальных полигонов. Отклонения в формировании контурных следов связаны с особенностями микрорельефа, расположением зон повышенного увлажнения и геометрией измерения МД γ -излучения с высотой.

При исследовании перераспределения ^{90}Sr в пространстве наблюдается некоторая тенденция соотношения его содержания с ^{137}Cs . Пробные площади с высокими и низкими плотностями загрязнения почвы радионуклидами чаще всего совпадают. Однако участки с повышенной концентрацией ^{90}Sr более локальны, а уровни их загрязнения имеют более существенную разницу по сравнению со средним значением, чем это обнаружено в отношении ^{137}Cs . Различие между минимальным и максимальным значением плотности загрязнения почвы ^{90}Sr в березняке и на залежи составило 6,5 раза, в сосняке – 114,7 раз. Вероятнее всего такие различия объясняются нахождением данного радионуклида в ближней зоне аварии на ЧАЭС в составе матрицы топливных частиц. По данным украинских исследователей $95 \pm 5\%$ ^{90}Sr в ближней зоне аварии изначально находилось в составе топливной компоненты черновыбывших выпадений [8]. Различия в генезисе ^{137}Cs и ^{90}Sr ближней зоны также подтверждаются при этом очень низким коэффициентом положительной корреляции ($r_{xy} = 0,08$). Корреляция же между плотностью загрязнения территории ^{90}Sr и МД γ -излучения также, как и в случае с ^{137}Cs незначительна и указывает лишь на общие тенденции перераспределения радионуклидов в пространстве. Обращает на себя внимание различие в локализации ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве экспериментальных полигонов. Если на лесопокрытых территориях не наблюдается существенного сходства в залегании радионуклидов в почве, то на залежи распределение идентично, что подтверждается высоким коэффициентом положительной корреляции

($r_{xy} = 0,81$). К тому же значительная часть радионуклида в сосняке сосредоточена в мощной хвойной подстилке. Коэффициент вариации ^{90}Sr для экспериментального полигона в березняке составил 48,3 %, на залежи – $V = 36,0$ %, в сосняке – $V = 72,5$ %.

По характеру варьирования содержания в почве ^{241}Am занимает промежуточное положение между ^{137}Cs и ^{90}Sr . Так коэффициент вариации для экспериментального полигона в березняке составил 28,7 %, на залежи – $V = 37,5$ %, в сосняке – $V = 31,9$ %. Дифференциация по плотности загрязнения в данном случае выражена несколько ниже, чем для ^{90}Sr . Это объясняется более низкими мобильными свойствами ^{241}Am и способностью образовывать комплексы с тонкодисперсной фракцией почвы. Размах вариации минимального и максимального значений по плотности загрязнения поверхности почвы в березняке составляет 4,8 раза, на залежи – 32,4 раза, в сосняке – 6,7 раза. Наибольшая положительная корреляция для ^{241}Am наблюдается при сравнении с ^{137}Cs ($r_{xy} = 0,68–0,90$). При сравнении со ^{90}Sr $r_{xy} = 0,20–0,81$. В дальнейшем также необходимо учитывать постоянное увеличение со временем содержания ^{241}Am в почве вследствие распада ^{241}Pu , что может отразиться на характеристиках горизонтального распределения.

С целью выявления характера распределения радионуклидов в почве на территории экспериментальных полигонов нами был проведен вариационный анализ по основным статистическим параметрам. Расчет значений доверительного интервала в большинстве случаев показал незначительное отклонение от величины средних значений при характерном для таких исследований уровне значимости ($P \leq 0,05$), что говорит о высокой достоверности проведенных наблюдений. Показатели дисперсии и среднего квадратического отклонения приемлемы для заданных условий имеющейся совокупности значений. Естественно менее всего варьирует такой показатель как МД, представляя собой производный результат измерения от нескольких источников. И чем выше проводится измерение от поверхности почвы, тем, естественно, будет происходить большее нивелирование точечных источников и ниже будет корреляционная связь с содержанием радионуклидов в почве. По всем исследуемым площадкам значения варьирования МД у поверхности почвы более чем на 30 % выше, чем на высоте 1 м. Наименьшими различиями в варьировании МД отличался сосновый лес, а наибольшими – березняк, что связано как с различиями в лесорастительных условиях, так и в режимах увлажнения (рисунок 2).

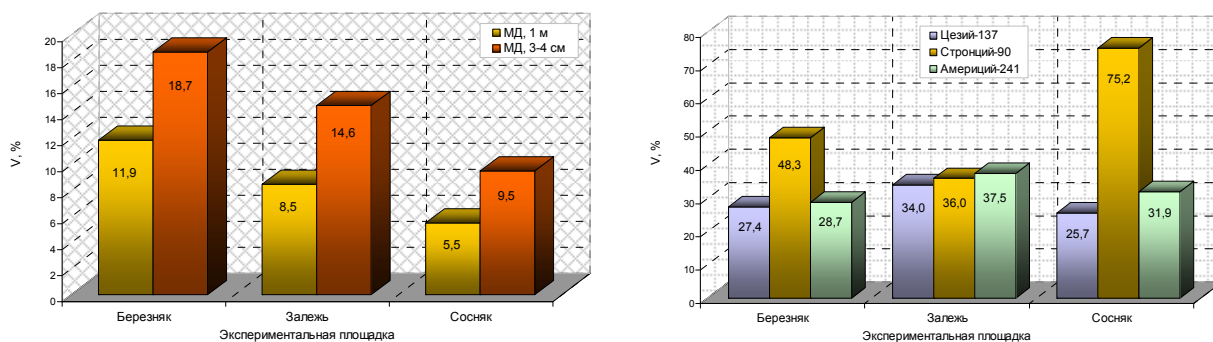


Рисунок 2 – Вариабельность значений МД и содержания ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am в верхнем слое почвы на различных экспериментальных полигонах, %

Проведенный анализ характера варьирования показал, что в лесных биогеоценозах в большей степени изменчивости содержания в верхнем слое почвы подлежит ^{90}Sr . Это подтверждается наибольшим коэффициентом вариации. Наименьше различий в варьировании содержания ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am в верхнем слое почвы наблюдается на залежном лугу, что в большей степени зависит от структуры сформированного сообщества и отсутствия древесного яруса. Полученные результаты указывают, с одной стороны, на более высокую мобильность ^{90}Sr в почвах зоны отчуждения по сравнению с другими радионуклидами чернобыльского происхождения, с другой стороны, на способность биотических компонентов изучаемых лесных фор-

маций в большей степени задействовать данный химический элемент в обменных процессах, происходящих в экосистеме, чем другие радионуклиды. Однако данные характеристики варьирования не содержат информации о законе распределения всей совокупности полученных данных. Следовательно, был проведен анализ вариационных рядов с проверкой нулевой гипотезы. При расчете параметров вариационных рядов были оценены показатели асимметрии и эксцесса. При $N = 100$, как в наших исследованиях, ошибки этих оценок составляют: $S_{As} = 0,24$ и $S_{Ex} = 0,48$. Дальнейший расчет критериев достоверности оценок (t_{As} , t_{Ex}) показал, что только в случае с анализом МД можно говорить о распределении эмпирических данных по нормальному закону. Это подтверждает и проверка по биометрическим таблицам. В остальных случаях нулевая гипотеза опровергается. Многие исследователи также подтверждают данную ситуацию, говоря о логнормальном распределении при изучении чернобыльских выпадений.

При исследовании пространственного распределения ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{241}Am обращает на себя внимание во всех случаях правосторонняя (положительная) асимметрия вариационной гистограммы, а в отношении ^{90}Sr она еще и дискретна. Дискретность и асимметрия направлены в сторону образцов с наибольшей активностью, что подтверждает возможное нахождение на данных полигонах радионуклидов в составе топливных частиц. Так как количество топливных частиц снижается по мере удаления от эпицентра аварии, то естественно, принимая во внимание полученные результаты, будет наблюдаться и закономерное снижение коэффициентов корреляции и вариации. Если теоретически предположить условия равномерного распределения топливных частиц в почве, то при прочих равных условиях такое снижение будет носить прямо пропорциональный характер.

Исходя из проведенного статистического анализа можно заключить, что, так как распределение ^{137}Cs ближе всего по своим параметрам к нормальному закону, то в данном случае можно говорить об определенной стабилизации обстановки, на которую влияние будет оказывать в большей степени только физический распад. В отношении же ^{90}Sr обстановка представляется наиболее сложной, что связано с выходом его из состава матрицы топливных частиц и увеличении количества подвижных форм. По всей видимости, эти процессы в настоящее время продолжают. Что касается ^{241}Am , то скорость процессов горизонтальной миграции данного радионуклида, несмотря на продолжающееся увеличение его количества в почве, ниже, чем для ^{90}Sr , что связано с более низкой биогенной миграцией и перераспределением его с биотой. При этом необходимо также учитывать и специфику радиоактивного загрязнения поверхности биогеоценоза. Находясь в почве в определенных формах и обладая различными физико-химическими свойствами каждый радионуклид будет в разной степени реагировать на влияние того или иного фактора среды, будь то влияние биоты или факторы неживой природы.

Снижение вариабельности содержания ^{137}Cs в почвенном горизонте свидетельствует об уменьшении темпов миграции из-за его фиксации на глинистых минералах почвы и выравнивании градиентов загрязнения на локальном уровне. Исследуемые показатели варьирования отражают процессы трансформации радионуклидов с учетом специфики свойств выбранного ландшафта. Другими словами, обладают видоспецифичностью для каждого выбранного биогеоценоза. Это объясняется многофакторностью, влияющей в данном случае на варьирование признака. Такое свойство как мультифрактальность пространственной структуры распределения радионуклидов в почве не влияет на варьирование их содержания (плотности загрязнения), так как одинаково проявляется на разных масштабных уровнях, сохраняя одни и те же статистические закономерности.

Заключение. Проведенные исследования указывают на ряд общих закономерностей пространственного распределения радионуклидов в почве. В большинстве случаев все три исследуемых радионуклида (^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{241}Am) имеют одинаковый характер варьирования признака при латеральном перераспределении в верхнем 20-см слое. Однако нами были обнаружены и некоторые отличия. Так, в отношении ^{90}Sr был получен высокий коэффициент вариации (75,2 %) для экспериментального полигона, расположенного в сосновом лесу, более характерный для свежих радиоактивных выпадений, что, скорее всего, связано со структурной организацией экосистемы соснового леса. Коэффициенты вариации для ^{137}Cs (25,7 %)

и ^{241}Am (31,9 %) на исследуемом участке являются характерными для отдаленного периода аварии и подтверждаются исследованиями российских и украинских ученых [1]–[3], [8], [9]. С течением времени параметры миграции радионуклидов в исследуемой нами системе достигнут таких значений, при которых произойдет уравнивание всех динамических составляющих и выход на квазистабильное ее состояние. Естественно, данные процессы будут происходить с различной интенсивностью для каждого радионуклида, что связано с его физическими свойствами, количеством, свойствами самой почвы и режимом увлажнения, и, конечно же, с мощностью работы биотической составляющей.

Необходимо подчеркнуть, что описанные выше особенности поведения радионуклидов характерны именно для тех условий, в которых они изучались. В других же условиях процессы латеральной миграции могут идти иначе. Существующие различия в варьировании латерального распределения радионуклидов в почве биогеоценозов ближней зоны аварии на ЧАЭС обусловлены не только характером и временем радиоактивных выпадений, но и ландшафтно-структурной организацией экосистем, изменением гидрологических и погодноклиматических условий, типом растительного сообщества и роющей деятельностью животных. Неоднородность плотности загрязнения радионуклидов возрастает по мере увеличения гидроморфизма почвы. Существенную роль в горизонтальном распределении радионуклидов играют структурные колебания микрорельефа, т. е. его выпуклые формы, очевидно, являются зонами сноса, а вогнутые – зонами накопления активности. Влияние всех этих факторов требуют тщательного дальнейшего изучения.

Литература

1. Линник, В.Г. Ландшафтная дифференциация техногенных радионуклидов: геоинформационные системы и модели : автореф. дис. ... д-ра геогр. наук : 25.00.23 / В.Г. Линник ; МГУ им. М.В. Ломоносова. – Москва, 2008. – 40 с.
2. Иванов, Ю.А. Анализ факторов, определяющих долговременную динамику миграции радионуклидов в почвенно-растительном покрове / Ю.А. Иванов // Проблемы чернобыльской зоны отчуждения : науч.-техн. сб. – 2009. – Вып. 9. – С. 23–39.
3. Линник, В.Г. Ландшафтно-географические исследования в связи с аварией на ЧАЭС / В.Г. Линник // Вест. Моск. ун-та. Сер.5. География. – 1996. – № 1. – С. 38–44.
4. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации / В.А. Ипатьев [и др.] ; под общ. ред. В.А. Ипатьева. – Гомель : Институт леса НАН Беларуси, 1999. – 454 с.
5. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиоэкология после Чернобыля / Под ред. Ф. Уорнера, Р. Харрисона ; пер. с англ. – М. : Мир, 1999. – 512 с.
6. Алексахин, Р.М. Ядерная энергия и биосфера / Р.М. Алексахин. – М. : Энергоиздат, 1982. – 216 с.
7. Лакин, Г.Ф. Биометрия: учеб. пособие для биологич. спец. вузов / Г.Ф. Лакин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 1980. – 293 с.
8. Kashparov, V.A. Soil contamination with ^{90}Sr in the near zone of the Chernobyl accident, Tschiersch J. / V.A. Kashparov, S.M. Lundin, Yu.V. Khomutinin [et al.] // Journal of environmental radioactivity. – 2001. – Vol. 56, № 3. – P. 285–298.
9. Линник, В.Г. Принципы ландшафтно-геохимического и радиоэкологического картографирования территорий, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС (проект РАДЛАН) / В.Г. Линник, Л.М. Хитров, Е.М. Коробова. – М. : ГЕОХИ АН СССР, 1991. – 50 с.

Влияние микробного препарата АгроМик на агрономически полезные группы микроорганизмов почвы в посевах кукурузы

И.И. КОНЦЕВАЯ, Н.М. ДАЙНЕКО, А.В. МИНИНА

Полученные результаты свидетельствуют о сукцессионных различиях в микробиологических процессах исследуемых подтипов почвы. Препарат АгроМик в конце периода вегетации способствует активизации процессов минерализации и переходу в неустойчивое состояние микробиоценоза дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы. В тоже время микробиоценоз мелкозалежного минерализованного торфяника характеризуется интенсивным процессом иммобилизации и переходом в более устойчивое состояние, стремящееся к состоянию климаксовой системы.

Ключевые слова: микробный препарат, АгроМик, микроорганизмы, микробиоценоз почвы, превращение органического вещества.

The results of the research demonstrate succession differences in the microbiological processes of the studied soil subtypes. At the end of the vegetation period the AgroMik preparation at the end of the vegetation period enhances the activation of mineralization processes and the transition to an unstable state of microbiocenosis of sod-podzolic light loamy soil. At the same time, the microbiocenosis of a shallow mineralized peat bog is characterized by intensive immobilization process and transition to a more stable state tending to the state of the climax system.

Keywords: microbial preparation, AgroMik, microorganisms, soil microbiocenosis, transformation of organic matter.

Введение. Известно, что продуктивность сельскохозяйственных земель определяется составом и спектром микробиоценоза почвы, поскольку протекающие в ней процессы микробиологического превращения вещества отражаются на условиях роста и питания растений. Плодородие почвы в существенной мере зависит от содержания гумусовых веществ в почве и их качественного состава [1], [2]. Однако гумус и его сопутствующие компоненты относятся к трудноминерализуемой части органического вещества, которая становится доступной для растений только после трансформации микроорганизмами почвы [3], [4]. Поэтому вопросы изучения микробиологического превращения органического вещества почвы в легкодоступные для растений формы, а также вопросы преобразования гумусовых веществ в результате применения новых видов удобрений, включая биоудобрения, несомненно, заслуживают особого внимания.

Микробный препарат АгроМик был разработан для стимуляции роста и развития тритикале в Институте Микробиологии НАН Беларуси. Микробиологическая характеристика препарата приведена в [5].

Цель исследования: изучить влияние микробного препарата АгроМик на основные агрономически ценные группы микроорганизмов разных подтипов почвы Гомельского региона и контролируемый ими процесс превращения органического вещества в посевах кукурузы.

Материал и методы исследования. Исследования выполняли на землях агрокомбината «Южный» вблизи н.п. Поколюбичи Гомельского района Гомельской области Беларуси. Объектом исследований являлась биологическая активность разных подтипов почвы под посевами кукурузы сорта «Полесский 212».

Опыт I был заложен на минерализованном мелкозалежном торфянике.

Опыт II был заложен на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве.

Под посевы кукурузы согласно технологической карте вносились следующие дозы удобрений: $N_{90}P_{30}K_{90}$ кг/га.

Варианты опытов были заложены 5 мая 2017 г. в 4-х кратной повторности на учетной площадке 14 м² по следующей схеме:

- 1) контроль – без обработки семян и вегетирующих листьев;
- 2) обработка препаратом АгроМик семян и растений в фазах «3-й лист» и «появление очередных листьев».

Норма высева кукурузы – 100 000 семян на гектар. Ширина междурядий – 70 см. Семена кукурузы были обработаны с помощью ручного опрыскивателя, перемешаны и сразу засыпаны в семенные бункера сеялки.

Для определения микробиологических показателей почвы отбирали для каждого варианта опыта смешанный образец из трех повторностей с глубины пахотного горизонта 0-20 см. Отбор образцов почвы проводили в следующие фазы роста кукурузы: всходы, 3-й лист, появление очередных листьев, выметывание метелки, молочная спелость зерна кукурузы, и после уборки.

Микробиологическую индикацию почвы выполняли согласно общепринятых в почвенной микробиологии методов [6], [7].

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

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

Расчет эколого-физиологических индексов и коэффициентов выполняли по [8].

Полученные данные обработаны статистически с использованием пакета прикладного программного обеспечения «Statsoft (USA) Statistica v.7.0» [9].

Результаты и их обсуждение. По данным Гомельского областного центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды за 2017 г. среднемесячная температура осадков за вегетационный сезон была на 94,4 мм меньше по сравнению со средней многолетней. Отметим, что наибольшая температура и максимальное количество осадков выдалось на июль месяц и также эти показатели были выше, чем средние многолетние.

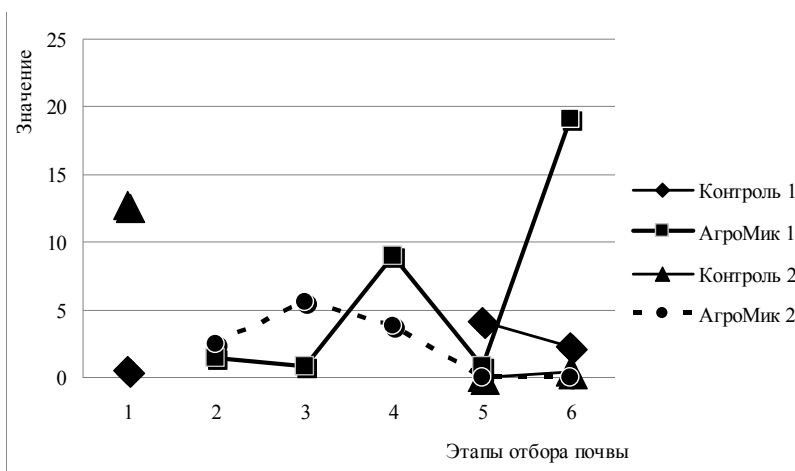
В июле на растениях кукурузы отмечали выметывание метелки.

Таким образом, метеорологические условия исследуемого периода вегетации являлись оптимальными для микробного сообщества почвы. Как известно, почвенная засуха негативно влияет на численность и активность микроорганизмов, в увлажненной почве минерализационные процессы активируются [10], [11].

Одним из важных показателей активности биологических процессов в почве является соотношение численности микроорганизмов, развивающихся на крахмало-аммиачном (КАА) агаре и характеризующих процесс преобразования аммиачного азота, к численности микроорганизмов, учтенных посевом на мясо-пептонном агаре (МПА) и контролирующих превращение белковых веществ почвы. Рассчитанный по данной формуле коэффициент минерализации и иммобилизации Мишустина показывает интенсивность разложения легкодоступного вещества и активизацию начальной стадии процесса гумусообразования. Увеличение коэффициента минерализации выше единицы свидетельствует о преобладании в почве процессов иммобилизации и интенсивном использовании азота почвы микроорганизмами с включением в биомассу, а его снижение – об усилении гумификационных процессов [12].

В контроле значение коэффициента минерализации в фазе всходы для дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы составило 12,75 (рисунок 1). В конце вегетационного периода этот показатель снизился до 0,004–0,41. В то же время следует отметить, что минимальному значению коэффициента минерализации на стадии молочной спелости соответствовало резкое увеличение в почве численности аммонификаторов до 8 200 млн. КОЕ/г абсолютно сухой почвы. В варианте опыта с применением препарата АгроМик также наблюдали подобную тенденцию постепенного возрастания процессов минерализации к концу периода вегетации кукурузы.

Для исходного микробонаселения мелкозалежного минерализованного торфяника значение коэффициента минерализации колебалось от 0,47 на этапе всходы до 4,09–2,23 в конце вегетации, что свидетельствует о протекании, соответственно, умеренных процессов минерализации в почве и о возрастании процессов связывания азота микроорганизмами к концу периода вегетации.



1 – мелкозалежный минерализованный торфяник; 2 – дерново-подзолистая легкосуглинистая почва
Этапы отбора почвы на фазах роста кукурузы: 1 – всходы, 2 – 3-й лист, 3 – появление очередных листьев, 4 – выметывание метелки, 5 – молочная спелость зерна; 6 – после уборки

Рисунок 1 – Коэффициент микробной минерализации органического вещества почвы

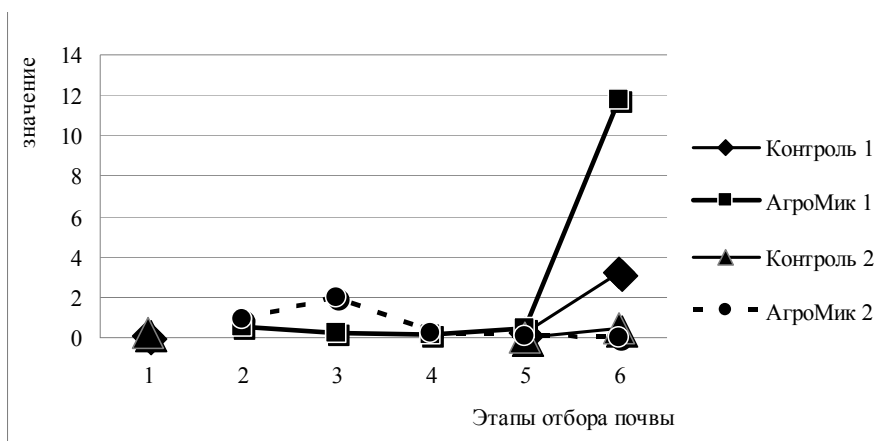
Под действием препарата АгроМик интенсивность процессов минерализации и биологической иммобилизации азота в минерализованном торфянике колеблется, значение коэффициента минерализации Мишустина на фазах «3-й лист» и «выметывание метелки» превышает единицу. Полученные результаты свидетельствуют о достаточно развитой амилалитической части почвенного микробоценоза, что, в свою очередь, повышает ее активность в трансформации углеводов почвы и связывании свободного азота. После уборки коэффициент минерализации резко возрос до 19,14, что косвенно свидетельствует о повышении скорости разложения гумуса. О подготовке органического вещества к процессу гумификации с последующим его разложением, трансформацией и продуцированием гумусовых веществ почвы также говорит развитие олиготрофной и автохтонной групп исследуемого микробоценоза, что в итоге влечет за собой повышение численности амилалитиков по причине высвобождения олиготрофами в почвенный раствор определенного количества аммиака. Число представителей вышеуказанных групп возросло по причине появления в почве бедного азотом органического вещества – соломы кукурузы.

По сравнению с началом вегетационного периода для осеннего времени года связывание азота микроорганизмами и включение его в свою биомассу – положительный процесс, поскольку таким путем нитрат и аммиак связываются и не теряются в результате выщелачивания зимой.

Таким образом, для дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы микробиологическое превращение азотсодержащих органических соединений в варианте обработки препаратом АгроМик на протяжении периода вегетации колеблется, показывая более значимые глубинные процессы минерализации на этапе отбора почвы «после уборки». На минерализованном торфянике наблюдали обратную картину преобразования азотсодержащего органического вещества почвы.

Если коэффициент минерализации Мишустина характеризует начальный этап процесса превращения органического вещества, то индекс педотрофности Никитина показывает степень развития микроорганизмов, как относящихся к автохтонной экологической нише (коренному микробонаселению), так и участвующих в новообразовании гумусовых соединений [3], [4], [8].

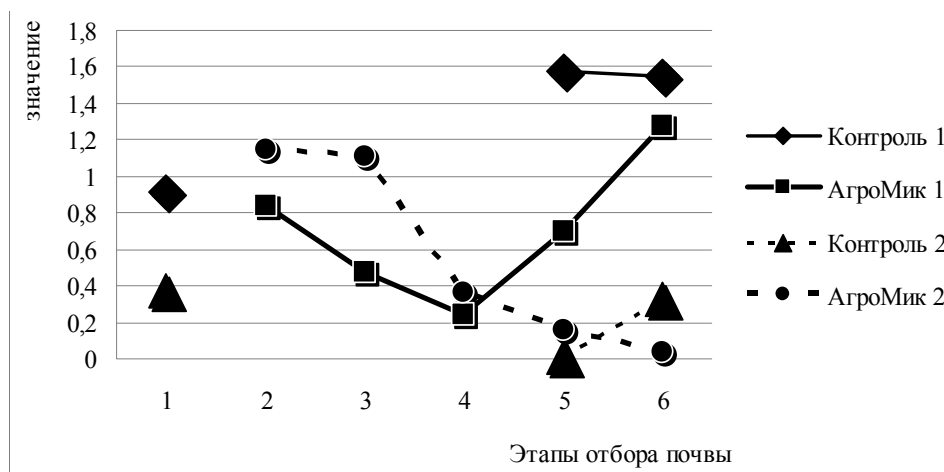
Для дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы в контроле отмечали колебания значений коэффициента педотрофности от 0,238 до 0,002 на протяжении вегетационного периода и повышение до 0,45 в конце сезона вегетации. При использовании биоудобрения изменение значений коэффициента педотрофности свидетельствует о его существенном повышении на этапе «появление очередных листьев» в результате возрастания в почве количественного содержания подвижных органических веществ. К окончанию периода вегетации данный показатель уменьшается (рисунок 2). При таком низком значении индекса педотрофности можно утверждать, что в осенний период биоценоз находится в неустойчивом состоянии и подвержен негативным воздействиям. При этом количество в почве подвижных органических веществ повышается по сравнению с летним периодом.



1 – мелкозалежный минерализованный торфяник; 2 – дерново-подзолистая легкосуглинистая почва
 Этапы отбора почвы на фазах роста кукурузы: 1 – всходы, 2 – 3-й лист, 3 – появление очередных листьев, 4 – выметывание метелки, 5 – молочная спелость зерна; 6 – после уборки

Рисунок 2 – Коэффициент педотрофности Никитина органического вещества почвы

При анализе мелкозалежного минерализованного торфяника в контроле значение коэффициента педотрофности Никитина на тестируемых фазах роста кукурузы колеблется умеренно от 0,11 до 0,204 и после уборки составляет 3,19 (рисунок 2), что указывает на то, что содержание в почве подвижных органических веществ находится на определенном невысоком уровне на протяжении вегетационного периода и возрастает после уборки растений. В опыте похожее колебание по содержанию в почве подвижных органических соединений отмечали на протяжении всего периода вегетации. Коэффициент педотрофности резко возрос на стадии «после уборки». Такое повышение индекса педотрофности показывает высокую степень сродства неспецифической органической части почвы исконному почвенному веществу – гумусу. Можно утверждать, что после окончания периода вегетации в опыте биогеоценоз был приближен к естественным ценозам изучаемой почвенно-климатической зоны и обладал большей устойчивостью к негативным воздействиям со стороны антропогенного вмешательства.



1 – мелкозалежный минерализованный торфяник; 2 – дерново-подзолистая легкосуглинистая почва
 Этапы отбора почвы на фазах роста кукурузы: 1 – всходы, 2 – 3-й лист, 3 – появление очередных листьев, 4 – выметывание метелки, 5 – молочная спелость зерна; 6 – после уборки

Рисунок 3 – Индекс олиготрофности Аристовской органического вещества почвы

Для исходной дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы значение индекса олиготрофности колебалось, уменьшаясь от 0,37 до 0,005, и затем повышаясь до 0,33 (рисунок 3). Это свидетельствует о том, что в начале и в конце периодов вегетации замедляются процессы деструкции органического вещества и изучаемый биоценоз находится в более-менее устойчивом состоянии.

В опыте индекс олиготрофности на начальных фазах вегетации был равен 1,15, снижаясь на следующих стадиях роста кукурузы до минимального значения на этапе отбора почвы «после уборки» до 0,04. Таким образом, в конце периода вегетации изучаемый биоценоз дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы находился в неустойчивом состоянии, обусловленном продолжением процессов деструкции органического вещества.

В контроле изменение индекса олиготрофности мелкозалежного минерализованного торфяника свидетельствует, что на фазе всходы процессы деструкции органического вещества были выше, чем к концу периода вегетации, когда они, наоборот, замедлялись, и биоценоз характеризовался более устойчивым состоянием. В опыте для данного подтипа почвы установлено сначала повышение процессов деструкции органического вещества, а затем замедление к концу периода вегетации, и, соответственно, переход биоценоза в более устойчивое состояние, стремящееся к состоянию климаксной системы.

Таким образом, в варианте обработки препаратом АгроМик наблюдали на протяжении вегетационного периода возрастающую стимуляцию развития олиготрофной части микробиоценоза дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, в то время как на мелкозалежном минерализованном торфянике отмечали зигзагообразное колебание численности представителей данной экологической ниши.

Заключение. Полученные результаты свидетельствуют о сукцессионных различиях в микробиологических процессах в исследуемых подтипах почвы. Препарат АгроМик в конце периода вегетации способствует активизации процессов минерализации и переходу в неустойчивое состояние микробиоценоза дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы. В тоже время микробиоценоз мелкозалежного минерализованного торфяника характеризуется интенсивным процессом иммобилизации и переходом в более устойчивое состояние, стремящееся к состоянию климаксной системы.

Работа выполнена при поддержке ГПНИ (№ темы М16-28).

Литература

1. Вальков, В.Ф. Плодородие почв и сельскохозяйственные растения: экологические аспекты / В.Ф. Вальков [и др.]. – Ростов н/Д. : Изд-во ЮФУ, 2008. – 416 с.
2. Зайдельман, Ф.Р. Генезис и экологические основы мелиорации почв и ландшафтов: учебник / Ф.Р. Зайдельман. – М. : КДУ, 2009. – 720 с.
3. Звягинцев, А.Г. Биология почв / А.Г. Звягинцев, И.П. Бабьева, Г.М. Зенова. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Издательство Московского университета, 2005. – 448 с.
4. Белюченко, И.С. Микроорганизмы почв и их роль в функционировании аграрных ландшафтов / И.С. Белюченко // Наука, технологии и инновации в современном мире. – 2016. – № 1(3). – С. 18–25.
5. Микробный препарат АгроМик для стимуляции роста и развития тритикале / Е.А. Соловьева [и др.]. – М. : Беларус. навука, 2013. – 178 с.
6. Основные микробиологические и биохимические методы исследования почв / под ред. Ю. Возняковской. – М.-Л. : ВНИИСХМ, 1987. – 47 с.
7. Теппер, Е.З. Практикум по микробиологии / Е.З. Теппер, В.К. Шильникова, Г.И. Переверзева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1987. – 239 с.
8. Титова, В.И. Методы оценки функционирования микробиоценоза почвы, участвующего в трансформации органического вещества: науч. метод. пособие / В.И. Титова, А.В. Козлов. – Н. Новгород : Нижегород с.-х. акад., 2012. – 192 с.
9. Доспехов, Б.А. Практикум по земледелию : учеб. для ун-тов / Б.А. Доспехов, И.П. Васильев, А.М. Туликов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1987. – 58 с.
10. Наплекова, Н.Н. Аэробное разложение целлюлозы микроорганизмами в почвах западной Сибири / Н.Н. Наплекова. – Новосибирск : Наука, 1974. – 250 с.
11. Шулико, Н.Н. Влияние длительного применения удобрений на агрохимические и биологические свойства чернозема выщелоченного и продуктивность ячменя в южной лесостепи Западной Сибири : дис. ... канд. с.-х. наук : 06.01.04 / Н.Н. Шулико. – Омск, 2017. – 169 с.
12. Надежкин, С.М. Подвижные формы органического вещества в полевых агроценозах / С.М. Надежкин // Системы воспроизводства плодородия почв в ландшафтном земледелии : материалы Всерос. науч.-практ. конф., Белгород, 27–29 июня 2001 г. – Белгород : Крестьянское дело, 2001. – С. 139–141.

УДК 577.175.152:582.632.1:576.535

Применение абсцизовой кислоты при депонировании *Betula pendula* Roth. и *B. pubescens* Ehrh. в культуре *in vitro*

И.И. КОНЦЕВАЯ

Показана возможность хранения культуры березы повислой и пушистой в условиях *in vitro* в течение 12 месяцев при использовании питательных сред, дополненных абсцизовой кислотой, на фоне повышенной концентрации сахарозы, активированного угля и 6-бензиламинопурина. Выявлены существенные различия между апробированными клонами берез по их реакции на длительное хранение. Из тестируемых генотипов клон 3ф1 березы пушистой – наиболее устойчив к длительному беспересадочному культивированию.

Ключевые слова: абсцизовая кислота, регенерационная способность, культура *in vitro*, береза, депонирование.

The possibility of 12-months storing of silver and downy birch cultures *in vitro* using nutrient media supplemented with abscisic acid against a background of high concentrations of sucrose, activated carbon and 6-benzylaminopurine is shown in the paper. Significant differences in the reaction to long-term storage from the approved birch clones were found. Among the tested genotypes, the downy birch clone 3f1 is the most resistant to long-term non-crop cultivation.

Keywords: abscisic acid, regenerative capacity, culture *in vitro*, birch, depositing.

Введение. В последнее десятилетие для поддержания обширных коллекций растений активно используют клеточные культуры [1]. В настоящее время развиваются следующие основные подходы к хранению культур растений: криосохранение, депонирование растущей коллекции при пониженных положительных температурах, изменение концентрации углеводов в среде, индукция осмотического стресса, использование ретордантов, снижение атмосферного давления в культуральных сосудах, гипоксия и другие [2].

Наибольшее распространение получил метод криоконсервации, который активно реализуется в биотехнологических лабораториях при достаточном финансировании [3], [4]. Однако данная процедура включает несколько этапов, на каждом из которых требуется специальное оборудование и индивидуальный для каждой культуры подбор криопротекторов, условий охлаждения и размораживания. Все это ограничивает применение данного способа сохранения. Встречаются единичные сведения о депонировании отдельных лесных древесных пород при низких положительных температурах [5]–[7], хотя такой метод неплохо разработан у лекарственных, плодовых и ягодных культур [8], [9].

Остальные вышеперечисленные методы депонирования растений в культуре *in vitro* применяются редко, поскольку слабо изучен их эффект замедления ростовых процессов в культуре тканей и практически не изучено их влияние на стабильность генотипов растений. Публикации по данному вопросу немногочисленны, хотя, несомненно, вызывают интерес. Поиск веществ, одновременно замедляющих рост растений и поддерживающих их жизнеспособность длительный период времени, отработка способов их применения, всегда будут востребованы.

Одним из наиболее активных эндогенных ингибиторов ростовых процессов является абсцизовая кислота (АБК). АБК рассматривается как антистрессовый фактор [10]. Было обнаружено, что АБК накапливается в растениях при различных неблагоприятных воздействиях (водном дефиците, повышенной концентрации солей, пониженной температуре и других). Вследствие накопления АБК происходит изменение белкового метаболизма и повышение устойчивости к стрессовому фактору [11]. Установлено, что добавление в питательную среду АБК тормозит рост культуры *in vitro* [12]–[14].

Целью настоящей работы явилось изучение возможности длительного беспересадочного культивирования *in vitro* эксплантов березы повислой и пушистой на средах, дополненных АБК, в том числе на фоне включения повышенного содержания сахарозы, активированного угля, 6-БАП.

Материал и методы исследования. В работе использовали микропобеги клона 3ф1 березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) и клона 31 березы повислой (*B. pendula* Roth). Культуры росли на модифицированной агаризованной среде WPM без гормонов [15] при оптимальных условиях: температуре 23 ± 1 °C, 16-часовом фотопериоде, освещенности 2000–3000 лк. После 1 месяца культивирования в асептических условиях побеги разрезали на 1-узловые сегменты длиной 0,8–1,2 см, содержащие лист. Экспланты помещали на среду с соблюдением вертикальной ориентации. В опытных вариантах при разных комбинациях в составе питательных сред увеличивали содержание сахарозы (до 40 г/л), добавляли активированный уголь (20,0 г/л), 6-бензиламинопурин (6-БАП) (0,5 и 2,0 мг/л), включали АБК (5,0 или 10,0 мг/л) (таблица 1).

Таблица 1 – Состав питательной среды

Номер среды	Сахароза, г/л	Активированный уголь, г/л	АБК, мг/л	6-БАП, мг/л
контроль	30,0	-	-	-
1	30,0	-	5,0	-
2	30,0	-	10,0	-
3	30,0	-	10,0	2,0
4	40,0	20,0	5,0	-
5	40,0	20,0	5,0	0,5

Объем использованных сосудов составлял 200 мл. В каждом из них было не менее 50 мл агаризованной питательной среды с pH равной 5,6–5,8. В культуральный сосуд помещали по 18–20 эксплантов и инкубировали при оптимальных условиях роста. Состояние эксплантов в процессе хранения визуально оценивали через 1, 3, 6, 9, 12 месяцев культивирования по следующим параметрам: процент эксплантов с признаками некроза, хлороза, усыхания, выраженных в полной степени либо частично; процент погибших эксплантов; интенсивность роста и развития (подсчитывали количество эксплантов с корнями, отмечали высоту побегов, степень развитости корней и побегов).

Спустя 6, 9 и 12 месяцев хранения по одному сосуду каждого варианта были извлечены из культуральной комнаты. Микрорастения черенковали на 1-узловые сегменты и переносили на безгормональную среду. В процессе пассирования материала подсчитывали число эксплантов, полученных из одного культурального сосуда. В течение 1 месяца узловые сегменты инкубировали при оптимальных условиях роста, после чего проводили оценку материала. Контролем служили экспланты, которые росли при стандартных условиях в течение 1 месяца. Определяли морфологические параметры сформировавшихся растений (высоту побегов, число листьев и корней, степень их развитости, длину корней). Обработку экспериментальных данных осуществляли по стандартным статистическим программам Microsoft Excel и «Statsoft (USA) Statistica v.7.0». Для сравнения изучаемых показателей между опытными и контрольными группами использовали t-критерий Стьюдента. Нулевую гипотезу отклоняли при уровне статистической значимости $p < 0,05$ [16].

Результаты и их обсуждение. С момента помещения эксплантов на питательную среду, развитие их проходило неравномерно, в зависимости от генотипа и состава среды. Обычно в течение первого месяца культивирования эксплантов наблюдали формирование из них полноценных растений на большинстве апробированных опытных средах. Наиболее интенсивное развитие микрорастений продолжалось еще и в последующие два месяца культивирования. Затем рост главных побегов минимизировался, хотя ростовые процессы продолжались вплоть до 9 месяца культивирования.

В таблице 2 представлены данные по влиянию условий длительного хранения культуры *in vitro* березы на пяти средах модифицированного состава на деструктивные изменения эксплантов, рост и развитие микрорастений после субкультивирования.

Таблица 2 – Влияние условий длительного хранения на деструктивные изменения эксплантов, рост и развитие микрорастений после субкультивирования

Вариант (среды- длительность хранения, мес)	Экспланты с признаками некроза, хлороза/ усыхания, %		Средняя высота микрорастений, см		Среднее число корней на растении, шт.	
	клоны		клоны		клоны	
	31	3ф1	31	3ф1	31	3ф1
контроль-1	0/0	0/0	5,7 ± 0,3	2,9 ± 0,2	2,8 ± 0,2	2,0 ± 0,3
1–6	75/0	0/30	1,1 ± 0,2*	3,8 ± 0,2	0,2 ± 0,02*	4,1 ± 0,3*
1–9	80/10	0/50	2,9 ± 0,5*	3,9 ± 0,2*	1,0 ± 0,4*	2,7 ± 0,3
1–12	100/0	0/100	3,2 ± 0,5*	2,7 ± 0,2	1,7 ± 0,5*	2,2 ± 0,3
2–6	75/0	0/15	2,9 ± 0,5*	3,7 ± 0,3	1,4 ± 0,4*	4,3 ± 0,4*
2–9	90/5	0/100	2,6 ± 0,6*	3,8 ± 0,2	0,9 ± 0,3*	4,1 ± 0,4*
2–12	95/5	10/90	3,2 ± 0,4*	2,9 ± 0,2	1,4 ± 0,3*	2,0 ± 0,3
3–6	95/0	0/40	3,2 ± 0,2*	4,3 ± 0,6*	1,1 ± 0,2*	3,9 ± 0,3*
3–9	95/0	0/60	3,5 ± 0,4*	3,6 ± 0,2	1,8 ± 0,4	3,7 ± 0,4*
3–12	95/0	0/100	3,9 ± 0,3*	2,9 ± 0,2	1,2 ± 0,4*	3,2 ± 0,3
4–6	0/50	0/20	2,6 ± 0,4*	3,6 ± 0,2	0,8 ± 0,2*	3,6 ± 0,4*
4–9	60/40	0/100	3,3 ± 0,5*	3,2 ± 0,3	1,2 ± 0,3*	2,8 ± 0,5
4–12	85/0	0/100	2,6 ± 0,4*	2,7 ± 0,2	1,4 ± 0,7	3,4 ± 0,5
5–6	50/10	0/10	2,4 ± 0,4*	3,8 ± 0,2	0,7 ± 0,2*	4,4 ± 0,5*
5–9	60/10	0/100	2,6 ± 0,3*	3,1 ± 0,2	1,0 ± 0,3*	3,6 ± 0,4*
5–12	85/15	5/95	4,9 ± 0,4	3,0 ± 0,2	2,0 ± 0,6	3,8 ± 0,4*

Примечание: уровень значимости при * $p < 0,01$

Наличие АБК, независимо от его концентрации в питательной среде, способствовало подавлению роста у 60–70 % эксплантов клона 31 березы повислой, которые оставались жизнеспособными, но не развивались в течение 3 месяцев инкубирования. Эти экспланты при дальнейшем культивировании сформировали развитые микрорастения. У клона 3ф1 березы пушистой для завершения ростовых процессов у большинства растений различных вариантов опыта потребовался период 3 месяца. Высота побегов на одной и той же среде существенно варьировала у обоих изученных генотипов во всех опытных вариантах.

Через 6–9 месяцев культивирования отмечали у растений появление боковых побегов, развившихся из пазушных почек. Независимо от состава среды, появление боковых побегов наблюдали у обоих исследуемых клонов березы в 10–100 %. Установлено, что цитокинин 6-БАП практически не подавлял апикальное доминирование. Об этом свидетельствуют результаты, полученные на апробированных генотипах в вариантах 3 и 5. Хотя, несомненно, совместное действие 6-БАП и АБК в первые месяцы культивирования негативно повлияло на рост микропобегов (таблица 2).

Независимо от состава питательной среды, самые развитые микрорастения спустя 9 месяцев культивирования достигали в высоту 8–14 см. Из-за ограничения объема культурального сосуда одревесневшие побеги переплетались, что ухудшало условия работы с материалом при черенковании и переносе эксплантов на свежие среды. Следует учитывать и формирование сильных, развитых корней. Возрастала вероятность инфицирования материала извне. При последующем пассировании таких микрорастений были изменены приемы работы.

Обычно к 12 месяцам инкубирования у растений клона 3ф1 березы пушистой формировались сильные, мощные корни. У клона 31 березы повислой либо совсем отсутствовали, либо были слабо развитые корни в вариантах 1 и 2 (таблица 2). Следует отметить, что независимо от наличия корней у изученных генотипов на среде 3, содержащей 2,0 мг/л 6-БАП, в основании побегов формировалась каллусная ткань кремового цвета с различной интенсивностью роста в пределах одного генотипа.

В результате длительного культивирования, одновременно с ростом и развитием эксплантов, наблюдали деструктивные изменения. Уже в течение трех месяцев хранения у клона 31 березы повислой отмечали в 10–75 %, в зависимости от состава питательной среды, полную гибель растений в результате некроза и усыхания. Также наблюдали до 5–60 % микрорастений с незначительными признаками некроза. Обычно изменение зеленой окраски начинается по-

степенно, распространяясь по листу, независимо от положения на растении. Иногда листочки приобретали коричневую окраску, некоторые из них опадали. С удлинением периода хранения микроклональных растений, описанные выше деструктивные процессы становились у них более выраженными. Полностью засохшие или некротизированные растения обычно наблюдали спустя 6 месяцев. Число таких растений варьировало в зависимости от генотипа материала. Наиболее устойчивым генотипом к хранению оказался клон 3ф1 березы пушистой (таблица 2). По-нашему мнению, это связано с повышенной плоидностью березы пушистой ($2n = 56$).

Несмотря на то, что спустя 12 месяцев хранения количество питательной среды уменьшилось в сосудах незначительно, основная причина гибели растений – усыхание как побегов, так и листьев. К 9–12 месяцам беспересадочного инкубирования почти все растения березы, независимо от видовой принадлежности, полностью или частично подверглись процессу старения (таблица 2). У березы повислой спустя 12 месяцев культивирования наблюдали на фоне полного усыхания 80–95 % материала развитие единичных сильных растений с развитыми побегами. В этих же условиях культивирования у березы пушистой отмечали гибель в 5–10 %, а выжившие микрорастения характеризовались симптомами усыхания в равной небольшой степени.

Способность эксплантов к росту и пролиферации после различных периодов хранения была оценена после того, как культуры перенесли на свежую среду и инкубировали при стандартных условиях в течение 1 месяца. Поскольку ранее на березе повислой было установлено, что с увеличением длительности холододового хранения отмечается тенденция сначала к увеличению, а спустя 5–9 месяцев – к снижению показателей изученных морфологических параметров растений после 30-дневного субкультивирования [5], в настоящем эксперименте пассирование материала на свежую безгормональную среду выполняли после 6, 9 и 12 месяцев.

У изученных генотипов отмечали при дальнейшем клонировании тенденцию уменьшения суммарного числа 1-узловых сегментов побегов от возрастания периода хранения.

В процессе культивирования при стандартных условиях экспланты росли и развивались, формируя побеги и корневую систему. Выявлено, что растения клона 31 березы повислой после инкубирования на опытных средах во втором пассаже имели более низкие значения по высоте растений, числу листьев и корней на растении по сравнению с контролем. И эта тенденция сохранялась независимо ни от состава питательной среды, ни от периода длительности первого пассажа. У растений клона 3ф1 березы пушистой отмечали стабильное развитие эксплантов. В опытных вариантах значения морфометрических показателей микро-растений были равны либо превышали значение в контроле (таблица 2).

Приведенные в настоящей работе результаты свидетельствуют о неоднозначном влиянии апробированных составов питательных сред на состояние эксплантов березы при разной длительности периода хранения. Выявлены симптомы некроза, хлороза, усыхания, затрагивающие частично или полностью микропобеги. Сходные симптомы были отмечены исследователями на других древесных растениях в результате хранения материала при низких положительных температурах [7]. Скорость развития деструктивных изменений на эксплантах зависит от объема питательной среды. Высыхание среды является естественным процессом, прежде всего, из-за потери воды, что, тем не менее, негативно сказывается на статусе длительно инкубированных растений. В данном эксперименте изначально был подобран оптимальный объем питательной среды в одном культуральном сосуде и количество эксплантов, помещенных в сосуд. Спустя 12 месяцев культивирования визуально не наблюдали значительного уменьшения количества среды в сосуде.

По данным НИЦ EVIKA (Эстония), у них сохраняется *in vitro* более 1292 представителей 34 видов растений в генобанке, где основное внимание уделено хранению меристемных растений и микропобегов. При этом активно используются составы сред с цитокининами (БАП, кинетином), повышенным содержанием сахарозы и калия. Лучшие результаты по сохранению высокой жизнеспособности микропобегов отмечали в присутствии высоких концентраций БАП и сахарозы [17].

В ряде случаев серьезной проблемой является выделение растениями в среду фенольных и иных соединений, подавляющих рост и вызывающих гибель культуры. Включение в состав сред активированного угля позволило успешно культивировать такие растения [18].

На древесных культурах (береза, тополь, осина) также показано, что введение активированного угля (1,5–2,0 %) в питательные среды, предназначенные для длительного хранения культур, способствовало удлинению периода между пересадками до 6 месяцев с сохранением их жизне- и регенерационной способности [6].

Существенный интерес представляет исследование применения АБК при криоконсервации растений, чтобы увеличить морозоустойчивость тканей и клеток [11]. Использование АБК для поддержания жизнеспособности культуры тканей при оптимальных условиях роста или в условиях пониженных положительных температур свидетельствует о зависимости эффекта АБК от генотипа материала [13]. На различных видах растений показано позитивное влияние АБК в концентрации 10–20 мг/л на сохранение жизнеспособности и регенерационную активность культуры тканей [13]–[14]. Имеются сведения об ингибирующем влиянии АБК, применяемого в инкубационных средах, на рост и развитие микрорастений дуба после второго периода субкультивирования [12].

Апробированные в нашем эксперименте составы питательных сред практически не влияли на развитие микрорастений ни в первом, ни во втором пассажах после разных периодов хранения. Даже если растения и характеризовались понижением темпов роста побегов по сравнению с контролем, то по развитию корневой системы они превосходили контрольные растения.

Несомненно, состав питательной среды, используемой при депонировании растительного материала, имеет большое значение. При разработке протоколов исследователь обязан выбирать: применять или не применять гормоны, стимуляторы роста или иные БАВ для повышения жизнеспособности и предотвращения потери регенерационной активности у растений, длительное время культивированных при определенных условиях без пассирования. Необходимо помнить о соматоклональной изменчивости в культуре тканей, которая может реализоваться в значительную индуцированную изменчивость.

Заключение. Представленные результаты показали возможность хранения культуры березы повислой и березы пушистой в условиях *in vitro* в течение 12 месяцев при использовании питательных сред, дополненных АБК, при повышенной концентрации сахарозы, активированного угля и 6-БАП. Отсутствует негативное влияние тестируемых веществ на рост и развитие эксплантов березы, субкультивированных после разных сроков хранения на свежие среды. Выявлены существенные различия между апробированными клонами берез по их реакции на длительное хранение. Из исследуемых генотипов клон 3ф1 березы пушистой наиболее устойчив к длительному беспересадочному культивированию независимо от сроков хранения. Необходим периодический визуальный контроль за состоянием микрорастений и, по мере необходимости, пересадка растений на свежую питательную среду.

Работа выполнена при поддержке ГПНИ (№ темы М16-33).

Литература

1. Генетические банки растений: проблемы формирования, сохранения и использования / О.И. Молканова [и др.] // Вестник Удмуртского университета. Биология. Науки о Земле. – 2010. – Вып. 3. – С. 33–39.
2. Towill, L.E. Biotechnology and germplasm preservation / L.E. Towill // Plant breed. rev. – 1989. – № 7. – P. 159–182.
3. Cryopreservation of *in vitro* tissue of deciduous forest trees / D.M. Reed [et al.] // Plant cryopreservation: a practical guide. – New York : Springer, 2007. – P. 365–386.
4. Сохранение вегетативно размножаемых культур в *in vitro* и криоколлекциях: методические указания / Рос. акад. с.-х. наук, Всерос. науч.-исслед. институт растениеводства им. Н.И. Вавилова ; сост.: С.Е. Дунаева ; под ред. докт. биол. наук Т.А. Гавриленко. – Санкт-Петербург : ВИР, 2011. – 64 с.
5. Концевая, И.И. Хранение *Betula Pendula* Roth. в культуре *in vitro* при низких положительных температурах / И.И. Концевая, А.А. Яцына // Весці НАН Беларусі. Сер. біял. навук. – 2003. – № 1. – С. 14–17.
6. Рекомендации по сохранению и воспроизводству методами биотехнологии ценных генотипов карельской березы, осины, тополя белого и сереющего / сост. О.С. Машкина, Т.М. Табацкая. – Воронеж : ВГУ, 2005. – С. 2–9.

7. Janeiro, L.V. Cold Storage of in vitro cultures of wild cherry, chestnut and oak / L.V. Janeiro, A.M. Vieitez, A. Ballester // Ann. sci. for. – 1995. – Vol. 52. – P. 287–293.
8. Сохранение генофонда растений, вегетативно размножаемых в условиях in vitro, во Всероссийском институте растениеводства им. Н.И. Вавилова / С.Е. Дунаева [и др.] // Цитология. – 2004. – Т. 46, № 9. – С. 789–790.
9. Использование методов биотехнологии растений для сохранения и изучения биоразнообразия мировой флоры / В.Б. Белокурова [и др.] // Цитология и генетика. – 2005. – № 1. – С. 41–51.
10. Кефели, В.И. Природные ингибиторы роста / В.И. Кефели // Физиология растений. – 1997. – Т. 44, № 3. – С. 471–480.
11. Четверикова, Е.П. Роль абсцизовой кислоты в морозоустойчивости растений и криоконсервации культур in vitro / Е.П. Четверикова // Физиология растений. – 1999. – Т. 46, № 5. – С. 823–929.
12. Gebhardt, K. Micropropagation and restricted-growth storage of adult oak genotypes / K. Gebhardt, U. Fruhwacht-Wilms, H. Weisgerber // Ann. sci. for. – 1993. – Vol. 50, Suppl. 1. – P. 323–329.
13. Jarret, R.L. Absciscic acid-induced growth inhibition of sweet Potato (*Ipomoea batatas* L.) in vitro / R.L. Jarret, N. Gawel // Plant Cell, Tissue and Organ Culture. – 2004. – Vol. 24, № 1. – P. 13–18.
14. Сидорович, Е.А. Клональное микроразмножение новых плодово-ягодных растений / Е.А. Сидорович, Е.Н. Кутас. – Минск : Навука і тэхніка, 1996. – 249 с.
15. 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.
16. Лакин, Г.Ф. Биометрия / Г.Ф. Лакин – М. : Высш. шк., 1990. – 352 с.
17. Kotkas, K. The application of biotechnological methods on preservation of plant biological diversity in Estonia / K. Kotkas, V. Vasar, A. Vaasa // Бюл. гос. Никит. ботан. сада. – 2002. – № 85. – С. 27–30, 65.
18. Использование методов биотехнологии растений для сохранения и изучения биоразнообразия мировой флоры / В.Б. Белокурова [и др.] // Цитология и генетика. – 2005. – № 1. – С. 41–51.

Созофиты высшего ранга лесостепной части Черниговской области в пределах Левобережного Приднестровья (Украина)

Л.А. ЛОБАНЬ¹, Н.А. СМОЛЯР²

По результатам обобщения литературных сведений, обработки гербарных коллекций и данных оригинальных исследований произведена флоросозологическая характеристика растительных сообществ лесостепной части Черниговской области Украины в пределах Левобережного Приднестровья. Определена раритетная фракция видового состава растительных сообществ исследуемого региона, которая составляет 48 видов, среди которых 6 – охраняются на международном, 23 – национальном и 25 – региональном уровнях, 24 вида рекомендуются для региональной охраны в Черниговской области. Редкие виды обсуждаются в фитоценотическом и созологическом отношении. Наводятся сведения о состоянии охраны созофитов высшего ранга лесостепной части Черниговской области и создании перспективных природно-заповедных объектов с целью их охраны.
Ключевые слова: созофиты, растительные сообщества, флоросозологическая характеристика, охрана, природоохрана, лесостепная часть Черниговской области, Украина.

The florosoecological characteristics of the plant communities of the forest-steppe part of the Chernihiv region of Ukraine within the left-bank Dnieper River were defined according to the results of reported data generalization, processing of herbarium collections and original research data. Rare fraction of the species composition of the plant communities in the investigated region that was composed of 48 species was identified, among them 6 species were protected at international scale, 23 at national and 25 at regional scale; 24 were recommended for regional protection in Chernihiv region. Rare species were discussed in the phytocenotic and soecological aspects. The information on the state of protection of the high-ranking sozophytes of the forest-steppe part of the Chernihiv region and the perspective nature reserves are given in the article.

Keywords: sozophytes, plant communities, florosoecological characteristics, environmental protection, nature reserves, forest-steppe part of the Chernihiv region, Ukraine.

Введение. Одной из важных предпосылок стабилизации экологического состояния окружающей среды является сохранение биоразнообразия и, в первую очередь, ее раритетной составляющей. Редкие виды – чувствительные индикаторы состояния экосистем и их изменений, в том числе и под воздействием антропогенных факторов. Поэтому изучение редких видов растений является важной задачей флоросозологии.

В составе богатой флоры Черниговской области имеется значительная часть видов, подлежащих охране на разных уровнях – международном (Европейский Красный список, Бернская конвенция), национальном (Красная книга Украины) и региональном [1]. Учитывая, что по Черниговской области проходит граница между Полесьем и Лесостепью, эти природные ее части естественно отличаются своими природными условиями, в том числе и растительным миром. Современная флоросозологическая характеристика полесской Черниговщины приведена во многих публикациях украинских ученых как отдельного региона [1], [2], так и в контексте Восточного Полесья [3]. Целью этой публикации является флоросозологическая характеристика лесостепной части Черниговской области касательно созофитов высшего ранга, то есть включённых в международные списки и охраняемые в Украине на государственном уровне.

Материалы и методы исследований. Исследование осуществлено в контексте флоросозологической характеристики лесостепной части Черниговской области Украины в пределах Левобережного Приднестровья (далее – ЛЧЧС), которая нами изучается на протяжении двадцати последних лет (1997–2017 гг.) общепринятыми в геоботанике и флоросозологии методами. Созологическому анализу подлежали литературные сведения, фонды Гербария Института ботаники НАН Украины (KW), кафедры ботаники Национального университета имени Тараса Шевченко (KWU), кафедры биологии Нежинского государственного университета имени Николая Гоголя, а также оригинальные материалы, полученные нами в ходе научных экспедиций.

В исследуемых местонахождениях нами выполнены полные геоботанические описания. Участие некоторых видов в растительных сообществах указывается в %. Сообщества с участием созофитов приводятся согласно доминантной классификации растительности. Природоохранный статус редких видов указан соответственно подходам Красной книги Украины [4]. Названия видов приводятся по чеклисту С.Л. Мосякина и М.М. Федорончука [5].

Регион исследований согласно физико-географического районирования Украины принадлежит к Северной лесостепной области Полтавской (Приднепровской) равнины (Ичнянско-Лохвицкий район) и Северной области Днепро-Донецкой террасовой равнины (Бахмацко-Нежинский и Бобровицко-Лосиновский районы) [6], геоботанического – к Европейско-Сибирской лесостепной области Восточно-Европейской провинции Левобережно-Приднепровской подпровинции и двух геоботанических округов: Бахмацко-Кременчуцкого (Бобровицко-Бахмацкий, Яготинско-Оржицкий районы) и Роменско-Полтавского (Прилуцко-Лохвицкий район) [7]. Он составляет 2/5 части Черниговской области и в целом включает основную часть бассейна Удаи – реки третьего порядка бассейна Днестра.

Результаты исследований и их обсуждение. По результатам комплексных флорозоологических исследований нами в растительном покрове лесостепной части Черниговщины указывается 48 видов растений, что составляет 37,5 % от количества редких высших сосудистых видов растений области [1], [2], [8]. Они включены в охранные списки разных рангов (6 – охраняются на международном уровне, 23 – государственном, 25 – региональном), а еще 24 вида нами рекомендуются для региональной охраны (*Aconitum lasiostomum* Rchb., *Campanula cervicaria* L., *Chimaphila umbellata* (L.) W. Barton, *Corydalis intermedia* (L.) Mérat, *Dentaria bulbifera* L., *Digitalis grandiflora* Mill., *Equisetum hyemale* L., *Hypericum montanum* L., *Nymphaea alba* L., *Ostericum palustre* (Besser) Besser, *Oxycoccus palustris* Pers., *Parnassia palustris* L., *Phlomis tuberosa* L., *Primula veris* L., *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn., *Pulmonaria mollis* Wulfen ex Hornem., *Scolochloa festucacea* (Willd.) Link., *Sempervivum ruthenicum* Schnittsp. & C.B. Lehm., *Utricularia vulgaris* L., *Valeriana officinalis* L., *Veratrum nigrum* L., *Vinca minor* L., *Viola persicifolia* Schreb., *Wolffia arrhiza* (L.) Horkel ex Wimmer) [2].

В статье посписочно, согласно уровней охраны, приводятся особенности распространения и эколого-ценотическая характеристика редких видов флоры в исследованных биотопах, а также указывается состояние сохранения и охраны их местонахождений.

Из Приложений Бернской конвенции мы приводим шесть видов (*Adenophora liliifolia* (L.) DC., *Aldrovanda vesiculosa* L., *Ostericum palustre*, *Pulsatilla patens* (L.) Mill., *Salvinia natans* (L.) All., *Iris hungarica* Waldst. из 11, которые указываются для Черниговской области в целом [1], [9]. Местонахождения этих видов обозначены на рисунке 1.

Adenophora liliifolia – редкий европейско-сибирский вид. В Украине изредка встречается в лесных районах и Лесостепи. На Черниговщине известно несколько местонахождений вида со среднечисленными полночленными ценопопуляциями (до 50 экземпляров на площади 0,1 га) и единичными растениями. На территории ЛЧЧО вид выявлен нами в небольшом урочище Лосиновское около с. Валентиево (Нежинский р-н) в березовом лесу с *Quercus robur* и *Populus tremula*, в негустом травостое которого преобладали луговые и опушечные виды. *A. liliifolia* произрастает по краю леса в ассоциации *Querceto-Betuletum sparsiherbosum*. Её ценопопуляция насчитывает несколько десятков цветущих и плодоносящих экземпляров [2]. Местонахождение требует охраны. На территории ИНПП также отмечается местонахождение (единичные экземпляры) *A. liliifolia* в долине р. Иченька на восток от с. Хаенки (Ичнянский р-н) на опушке березового леса в ценозах *Betuletum (verrucosae) graminosum* [10].

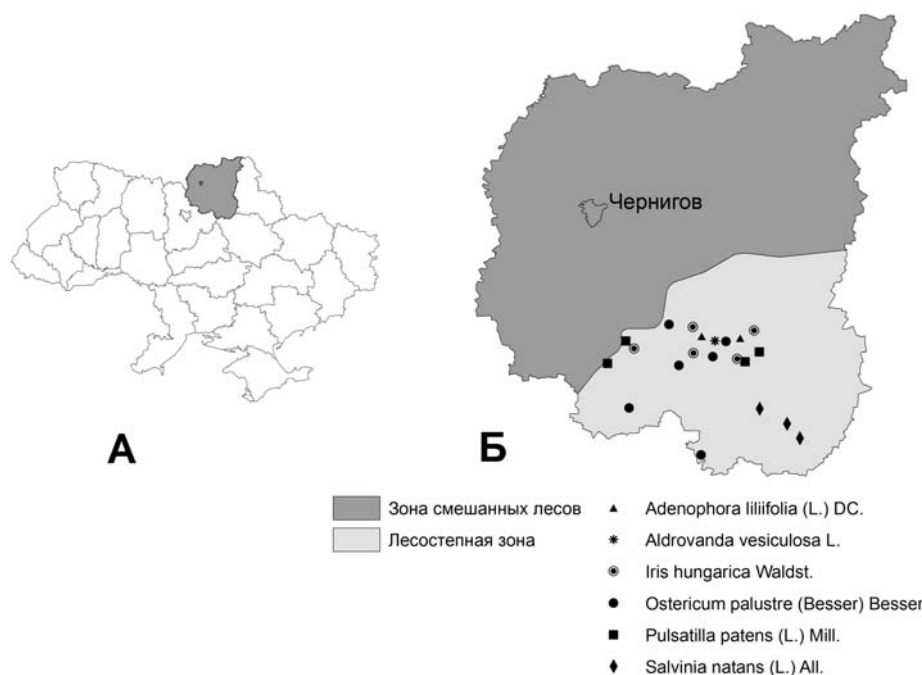


Рисунок 1 – Картограмма расположения региона исследований на карте Украины (А); местонахождения видов на территории ЛЧЧО, подлежащих международной охране (Б)

Aldrovanda vesiculosa – редкий реликтовый европейско-средиземноморско-переднеазиатский вид. Насекомоядное водное растение. В Украине изредка встречается в Прикарпатье, на Полесье, в Лесостепи, Степи, кроме Карпат и Крыма. На территории ЛЧЧО вид обнаружен в непроточных водоёмах и на обводненных участках болот. Встречается в Ичнянском районе на мелководьях заболоченной северной части урочища Жевак (целостного природного комплекса с территорией гидрологического заказника общегосударственного значения «Дорогинский») в пойме р. Удай между сёлами Бакаивка и Монастырище в обводнённых вздутоосокково-вахтовых сообществах [10]. *A. vesiculosa* образует сообщества, которые включены в Зелёную книгу Украины [11]. Это местонахождение находится на территории, перспективной для включения в состав национального природного парка «Ичнянский» (далее – ИНПП).

Iris hungarica – европейский вид. В Украине встречается изредка в южной части Полесья; рассеянно – в Лесостепи и Степи. Произрастает на опушках лиственных и смешанных лесов, между кустарников, на лугах. На территории ЛЧЧО вид выявлен нами в небольшом урочище Лосиновское около с. Валентиево (Нежинский р-н) в сообществах *Quercetum convallariosum*, в лесном урочище «Твани» – в *Pineto-Quercetum convallariosum*. Еще вид зафиксирован в лесных массивах около с. Новый Подол (Ичнянский р-н) в сообществе *Populetum (tremulae) caricosum (pilosae)*, с. Козары (Носовский р-н) в сообществах *Quercetum convallarioso-pteridiosum (aquilini)*, *Quercetum franguloso-convallariosum*, *Pineto-Quercetum calamagrostidoso-convallariosum* [12], [13], [14]. Главными причинами сокращения численности данного вида на территории области являются вырубка лесов и сбор на букеты. В регионе охраняется на территориях Ичнянского НПП (Ичнянский р-н); ботанических заказников местного значения «Урочище «Твани» (Нежинский р-н) и «Козарская дача» (Носовский р-н). Требуется охраны на региональном уровне.

Ostericum palustre – редкий европейско-западно-азиатский вид, широтный ареал которого простирается от субтропической до умеренной зоны. В Украине встречается на Полесье, в Лесостепи и на северо-востоке Степи. Произрастает на территории ЛЧЧО на влажных и заболоченных лугах, среди кустарников, на эвтрофных болотах, пойменных лесах. Здесь сосредоточены основные черниговские локалитеты вида.

Почти все образцы этого вида для Черниговщины с Гербария Института ботаники НАН Украины (KW) датируются 20–30 гг. XX столетия и собраны преимущественно в её северной части. Для территории ЛЧЧО указываются современные находки вида из ИНПП

А.А. Жигаленком. Это пять локалитетов *O. palustre* на настоящих и торфянистых лугах в сообществах *Festuca pratensis* Huds., *F. regeliana* Pavl. и *Deschampsia caespitosa* (L.) Beauv. по оба берега болота Удай на северный запад от с. Заудайка, вдоль р. Иченька (притоки Удай) на восток от с. Хаенки. Вид встречается группами (по 2–4 экземпляра) на выкашиваемых участках [10]. При исследовании территории бассейна р. Удай нами этот вид обнаружен в четырех локалитетах. В сообществах *Carex hartmanii* Cajand. (40–45 %) между селами Припутни и Вишневка (Ичнянский р-н) найдены его единичные экземпляры. На территории гидрологического заказника общегосударственного значения «Дорогинский» (Ичнянский р-н) *O. palustre* обнаружен в сообществе *Alnetum scirposum (sylvaticae)*. На территории болота Перевод между сёлами Сергеевка и Сухолиски (Прилуцкий р-н) обнаружено несколько местонахождений *O. palustre* на торфянистом лугу в сообществах с преобладанием *Carex omskiana* Meinsh. и *C. acutiformis* Ehrh., а также вид встречается в экотонной полосе между притеррасным ольшанником и высокотравным болотом в пойме р. Иченька в ИНПП. На территории Бобровицко-Бахмацкого геоботанического района известно два локалитета вида: в заводи р. Вьюницы возле с. Красные Партизаны (Носовский р-н) в полосе заболоченного луга с доминированием *Carex caespitosa* L. и на влажных лугах в заводи р. Вьюницы возле с. Хвильевка (Нежинский р-н) с доминированием *Festuca pratensis* Huds. [15]. Четыре из указанных выше местонахождений требуют охраны.

Pulsatilla patens – уязвимый европейско-западносибирский вид вблизи южной границы ареала. В Украине распространен на Полесье, в Лесостепи и Северной Степи, где встречается в сосновых, дубово-сосновых лесах, на лесных полянах, опушках, порубках на дерново-подзолистых почвах. Для Черниговщины вид указывается из полесских районов [16]. Из территории ЛЧЧО вид указывается для ИНПП А.А. Жигаленком, где он встречается в урочище Томашевка около с. Коломийцево в сообществах *Quercetum graminosum* с доминированием в травянистом покрове *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth и *Agrostis tenuis* Sibth. [10]. Охраняется также в ботаническом заказнике местного значения «Козарская дача» (Носовский р-н) и заповедном урочище «Дубрава» (Бобровицкий р-н) [12]. Находки этого вида представлены в регионе исследований мало- и среднечисленными ценопопуляциями.

Salvinia natans – редкий реликтовый голарктический вид. В Украине распространён в долинах Днепра, Десны, Южного Буга, Сиверского Донца и других рек. На территории ЛЧЧО встречается преимущественно в центральной и южной его части в составе водной растительности реки Удай и ее притоков на эвтрофных и мезоэвтрофных замкнутых или проточных водоёмах с илисто-песчаными почвами. Нами вид обнаружен на мелководьях р. Удай возле с. Подыше (Прилуцкий р-н), сел Журавка, Ладан, Полонки (Варвинский р-н) Черниговской области, где был представлен многочисленными популяциями в сообществах типичной водной растительности, и доминировал, и содоминировал в окружении *Lemna minor* L., *Spirodela polyrrhiza* (L.) Schleid., *Hydrocharis morsus-ranae* L. Сообщества этого вида включены в Зеленую книгу Украины. В регионе охраняется на территориях ряда гидрологических заказников местного значения («Густынский» (Прилуцкий р-н) и «Поливщина» (Варвинский р-н). Два локалитета требуют охраны.

Список созофитов ЛЧЧО, которые включены в Красную книгу Украины, и состояние обеспечения их охраной в объектах природно-заповедной сети Черниговской области, приводятся в таблице 1.

Таблица 1 – Эколого-созологическая характеристика созофитов ЛЧЧО, включённых в Красную книгу Украины (2009)

№ п/п	Название вида	Природо-охранный статус	Эколого-ценотическая группа	Кол-во местонахождений	Охрана местонахождений		
					ИНПП	Зак.	Зап. ур.
1.	<i>Adonis vernalis</i> L.	н	ст	5		+	
2.	<i>*Aldrovanda vesiculosa</i> L.	р	ак	1		+	
3.	<i>Allium ursinum</i> L.	н	сл	2	+		
4.	<i>Carex bohémica</i> Schreb.	у	пр	1	+		
5.	<i>Dactylorhiza incarnata</i> (L.) Soó s.l.	у	пр	10	+	+	

Окончание таблицы 1

6.	<i>Dactylorhiza maculata</i> (L.) Soó s.l.	у	пр	3	+		
7.	<i>Dactylorhiza majalis</i> (Rchb.) P. F. Hunt & Summerhayes s.l.	р	пр	2	+	+	
8.	<i>Epipactis atrorubens</i> (Hoffm. ex Bernh.) Besser	у	сл	2		+	
9.	<i>Epipactis heleborine</i> (L.) Crantz	н	сл	более 10	+	+	
10.	<i>Epipactis palustris</i> (L.) Crantz	у	пр	1	+		
11.	<i>Galanthus nivalis</i> L.	н	сл	более 10	+		
12.	<i>Iris sibirica</i> L.	у	пр	2		+	
13.	<i>Lilium martagon</i> L.	н	сл	более 10	+	+	
14.	<i>Listera ovata</i> (L.) R. Br.	н	сл	10		+	+
15.	<i>Lycopodium annotinum</i> L.	у	сл	5	+	+	
16.	<i>Neottia nidus-avis</i> (L.) Rich.	н	сл	более 10	+	+	
17.	<i>Platanthera bifolia</i> (L.) Rich.	н	сл	до 10	+	+	
18.	<i>Pulsatilla pratensis</i> (L.) Mill.	н	сл	2		+	
19.	* <i>Pulsatilla patens</i> (L.) Mill.	н	сл	3	+		+
20.	<i>Salix starkeana</i> Willd.	у	пл	1	+		
21.	* <i>Salvinia natans</i> (L.) All.	н	ак	4		+	
22.	<i>Stipa capillata</i> L.	н	ст	2			
23.	<i>Utricularia minor</i> L.	у	ак	1	+		

Примечание: * – вид, охраняемый на международном уровне; природоохранный статус вида (н – неоценённый, р – редкий, у – уязвимый); эколого-ценотическая группа (сл – сильвант, ст – степант, пр – пратант, пл – палюдант, ак – аквант); охрана местонахождений (ИНПП – национальный природный парк «Ичнянский»; зак. – заказник; зап. ур. – заповедное урочище).

Особенности распространения и характеристика местонахождений некоторых видов из этого списка, которые также вошли в Приложения Бернской конвенции, приведены выше.

Результаты анализа списка созофитов высшего ранга ЛЧЧО, включенных в Красную книгу Украины, указывают на безусловное доминирование в систематическом отношении видов, принадлежащих к отделу *Magnoliophyta* (23,92 %), из которых 7 видов (30 %) – к классу *Liliopsida* и 16 (70 %) – к *Magnoliopsida*. Наибольшее количество видов представлено в семействе *Orchidaceae* (9 видов), значительно меньше – в *Ranunculaceae* (3), *Liliaceae* (2), остальные семейства в списке представлены лишь по одному виду (*Poaceae*, *Iridaceae*, *Cyperaceae*, *Amaryllidaceae*, *Salicaceae*, *Droseraceae*, *Lentibulariaceae*), также, как и отделы высших споровых растений (*Lycopodiophyta* и *Polypodiophyta*).

По ценотической принадлежности редкие виды флоры региона исследований, включенные в Красную книгу Украины, распределены между разными эколого-ценотическими группами: лесной (сильваны широколиственные – семь видов, хвойнолесные – четыре; всего 50 % от видов списка), луговой (пратанты – шесть; 22 %), болотной (палюданты – один; 5 %), водной (акванты – три; 13 %) и степной (степанты – два; 10%). Такие показатели свидетельствуют в общем о большей сохранности лесной растительности в регионе по сравнению с другими типами.

Для третьей части созофитов (семь видов) высшего ранга на территории ЛЧЧО известно 10 и более местонахождений (таблица 1). Большинство редких видов встречается в регионе исследований в 2–5 местонахождениях, а пять (22 %) – известны лишь в одном локалитете.

В отношении природоохранного статуса эти виды принадлежат к группам: редкие (2; 9 %), уязвимые (9; 39 %), неоцененные (12; 52 %).

Результаты анализа состояния охраны выше указанных созофитов свидетельствуют о том, что практически все виды, кроме *Stipa capillata*, охраняются в регионе исследований на территории объектов природно-заповедного фонда (одного НПП, 35 заказников и двух заповедных урочищ). Безусловно, наивысшими показателями флоросоюзической уникальности по созофитам высшего ранга характеризуется ИНПП, поскольку на его территории охраняется 17 видов из 25, указываемых нами для ЛЧЛП, в том числе восемь из них – на территориях природно-заповедных объектов, входящих в состав парка. Эталоном сохранения редких видов высшего уровня охраны являются также заказники «Дорогинский», «Жевак» (Ичнянский р-н), «Кобыж-

чанская дача» (Бобровицкий р-н), «Козарская дача» (Носовский р-н), «урочище «Твани» (Нежинский р-н), «Галаганове» (Сребнянский р-н) и заповедное урочище «Ветхое» (Нежинский р-н).

Для обеспечения охраны ценопопуляций выше указанных созофитов и повышения её эффективности на территории ЛЧЧО предлагаем создать природно-заповедные объекты возле сёл Антоновка в Варвинском районе, Сергеевка и Сухолески, Подыще и Шапрановка в Прилуцком, Красные Партизаны в Носовском, на территории урочища Лосиновское и возле с. Хвылевка в Нежинском, а угодья гидрологического заказника «Жевак» в Ичнянском районе следует присоединить к гидрологическому заказнику «Дорогинский».

Литература

1. Андрієнко, Т.Л. Рідкісні види судинних рослин Чернігівщини та їх представленість на природно-заповідних територіях області / Т.Л. Андрієнко, О.В. Лукаш, О.І. Прядко [та ін.] // Заповідна справа в Україні. – 2007. – Т. 13, вип. 1–2. – С. 33–38.
2. Лобань, Л.О. Рідкісні види басейну р. Удай, запропоновані для регіональної охорони (Чернігівська обл.) / Л.О. Лобань // 36. наук. праць викладачів природничо-географічного факультету. – Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2007. – Вип. 1. – С. 12–18.
3. Лукаш, О.В. Флора судинних рослин Східного Полісся: созологічна оцінка / О.В. Лукаш. – Київ : Фітосоціоцентр, 2010. – 220 с.
4. Червона книга України / за ред. Я.П. Дідуха. – К. : Глобалконсалтинг, 2009. – С. 177.
5. Mosyakin, S.L. Vascular Plants of Ukraine a nomenclatural checklist / S.L. Mosyakin, M.M. Fedoronchuk. – K. : M.G. Kholodny Institute Botany, 1999. – 345 p.
6. Физико-географическое районирование Украинской ССР / Под ред. В.П. Попова, А.М. Маринича, А.И. Ланько. – К. : Изд-во Киевск. ун-та, 1968. – 683 с.
7. Геоботанічне районування Української РСР / Барбарич А. І. (відп.ред.). – К. : Наукова думка, 1977. – 304 с.
8. Охорона фіторізноманіття Чернігівської області: види Червоної книги України / Т.Л. Андрієнко-Малюк, Л.О. Лобань, О.В.Лукаш [та ін.] ; під ред. Т.Л. Андрієнко-Малюк та О.В. Лукаша. – Чернігів : Десна Поліграф, 2016. – 120 с.
9. Судинні рослини Смарагдової мережі України під охороною Бернської конвенції / під ред. В.А. Соломахи. – Житомир : Вид. О.О. Євенок, 2017. – 152 с.
10. Жигаленко, О.А. Анований конспект флори Ічнянського національного природного парку / О.А. Жигаленко. – Суми : Університетська книга, 2015. – 79 с.
11. Зелена книга України / за ред. Я.П. Дідух. – К. : Альтерпрес, 2009. – 448 с.
12. Дідик, Л.В. Поширення регіонально рідкісних видів під охороною Бернської конвенції у лісостеповій частині Чернігівської області / Л.В. Дідик, Л.О. Лобань // Актуальні питання біологічної науки : збірник статей IV Міжн. заочн. наук.-практ. конф. – Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2018. – С. 115–118.
13. Лобань, Л.О. Флористичні знахідки у басейні р. Удай (Чернігівська область) / Л.О. Лобань // Укр. бот. журн. – 1999. – Т. 56, № 3. – С. 314–317.
14. Лобань, Л.О. Лісова рослинність верхньої частини басейну р. Удай (Чернігівська область) / Л.О. Лобань // Укр. бот. журн. – 2000. – Т. 57, № 4. – С. 386–392.
15. Лобань, Л.О. *Ostetricum palustre* (Bess.) Hoffm. – вид Бернської конвенції на межиріччі Остер-Удай (Чернігівська обл.) / Л.О. Лобань, Л.В. Дідик // 36. наук. праць Полтавського державного педагогічного університету ім. В.Г. Короленка. – Полтава, 2008. – Випуск 6 (47). – С. 117–122.
16. Карпенко, Ю.О. Раритетний ценофонд Чернігівського Полісся та його охорона на територіях природно-заповідного фонду загальнодержавного рівня / Ю.О. Карпенко // 36. наук. праць Полтавського державного педагогічного університету ім. В.Г.Короленка. – Полтава, 2004. – Вип. 4 (37). – С. 157–165.

¹Нежинский государственный университет им. Н. Гоголя

²Киевский национальный университет им. Т. Шевченко

Хозяйственная оценка флоры Припятского Полесья

А.Н. Мялик

Представлен анализ хозяйственной ценности видов, слагающих флору Припятского Полесья. Выделены группы таксонов, имеющих как полезные (пищевые, декоративные, медоносные, пряно-ароматические, кормовые, технические), так и отрицательные (ядовитые и сорные) свойства. Результаты исследований показывают, что почти все из 1986 видов спонтанной флоры имеют ту или иную хозяйственную ценность. Наиболее многочисленными являются декоративные, лекарственные, сорные и кормовые растения.

Ключевые слова: Припятское Полесье, флора, ресурсы флоры, хозяйственные группы видов.

An analysis of the economic value of the species composing the flora of the Pripyat Polissya is presented. Groups of taxa that have both useful (food, decorative, honey, spicy-aromatic, fodder, technical) and negative (poisonous and weedy) properties are distinguished. The results of the research show that almost all of the 1986 species of spontaneous flora have this or that economic value. The most numerous are ornamental, medicinal, weed and fodder plants.

Keywords: Prypiackae Paliesse, flora, flora resources, economic species.

Введение. В пределах южной части Беларуси важнейшим природным и хозяйственным регионом является Припятское Полесье, которое представляет собой отдельный физико-географический округ, расположенный в центральной части Полесской провинции [1]. Флора данной территории имеет ряд особенностей, которые проявляются в её таксономической и географической структуре [2], [3], [4] соотношении биологических [5], экологических [6] и хронологических [7], [8] элементов. Слагающие флору виды имеют также ряд ценных хозяйственных признаков, чем определяется её ресурсная ценность. Поскольку ресурсы растительного мира любой природной территории включают всё то потенциальное богатство, которое содержится в её флоре, необходимы различные подходы к их выявлению и изучению. К ресурсам растительного мира относится сырьё, применяемое в промышленности; растительные продукты, используемые в медицине или сельском хозяйстве; живые растения, имеющие значение для лесного хозяйства и садоводства; группировки растений санитарного, водоохранного, почвозащитного и другого значения [9]. Некоторым видам свойственны и отрицательные для хозяйственной деятельности человека признаки, что должно учитываться при оценке общей ресурсной ценности флоры. В соответствии с вышесказанным, цель настоящей работы – оценить хозяйственную ценность флоры Припятского Полесья с выделением групп растений, имеющих как положительное, так и отрицательное значение для человека.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования являлась флора Припятского Полесья в целом, а предметом – хозяйственная ценность её различных компонентов: спонтанного, природного, аборигенного и адвентивного. Поскольку хозяйственная функция биоты определяется наличием используемых или потенциально используемых видов, то при оценке хозяйственного значения флоры необходимо учитывать не только те виды растений, которые в настоящее время являются источником получения прибыли, но и те, которые пока ещё не эксплуатируются вследствие их малой изученности или отсутствия эффективных технологий использования. К ним, например, могут относиться ресурсы некоторых лекарственных растений, применяемых преимущественно в народной медицине, однако не являющиеся официальными средствами получения доходов [10].

Для оценки хозяйственного значения видов флоры Припятского Полесья выделены следующие их группы, учитывающие как полезные, так и отрицательные свойства растений: **сорные** – являются сорняками в сельскохозяйственных угодьях, в лесокультурах, а также на приусадебных участках; **ядовитые** – растения, части или выделения которых ядовиты для человека и хозяйственно-ценных животных; **пищевые** – могут употребляться в пищу челове-

ком; **декоративные** – имеют декоративные качества, которые позволяют применять их в озеленении населённых пунктов, при устройстве газонов, цветников и т.д.; **медоносные** – растения, посещаемые пчёлами для сбора нектара и пыльцы; **пряно-ароматические** – могут использоваться как специи в кулинарии и для приготовления фитокомпозиций; **лекарственные** – используется в официальной и народной медицине для лечения и профилактики заболеваний человека и животных; **технические** – могут использоваться в качестве сырья в различных отраслях промышленности (деревообработка, парфюмерия) или как строительный и топливный материал; **кормовые** – могут применяться для кормления сельскохозяйственных животных или как пастбищные и сенокосные культуры; **мелиоративные** – восстанавливают структуру и плодородие почв, могут использоваться как закрепители песков, сидератные культуры, для устройства защитных полос, очистки сточных вод и т. д. [9]. При определении хозяйственной ценности отдельных видов использованы различные литературные источники [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], а также материалы собственных исследований, выполненных на территории Припятского Полесья в 2010–2017 гг. в пределах Берёзовского, Ганцевичского, Дрогичинского, Ивановского, Ивацевичского, Кобринского, Лунинецкого, Пинского, Столинского районов Брестской и Житковичского, Лельчицкого и Петриковского районов Гомельской области.

Результаты и их обсуждение. Согласно нашим исследованиям, современная флора сосудистых растений Припятского Полесья представлена 1986 видами растений, относящимся к 807 родам и 163 семействам [6]. В этот список включены все дикорастущие, дичающие и выращиваемые в культуре в условиях открытого грунта таксоны, составляющие спонтанную флору. Аборигенный компонент представлен 866 видами растений, которые объединяются в 372 рода и 116 семейств. Заносное происхождение имеют 1120 видов, относящихся к 575 родам и 120 семействам. Современная природная флора насчитывает 1450 видов из 583 родов и 143 семейств. Под ней рассматривается совокупность всех аборигенных, а также тех адвентивных таксонов, способность к натурализации которых позволяет им произрастать в пределах полустественных и естественных экосистем.

Многие виды флоры Припятского Полесья издавна используются человеком либо являются перспективными для хозяйственного использования, составляя важную часть природных ресурсов этой территории. Всё многообразие растительного мира по-разному используется человеком: одни виды в больших объёмах заготавливаются в естественных экосистемах и являются важным источником продуктов питания и сырья для различных отраслей промышленности; другие, ввиду своей высокой ценности, введены в культуру и возделываются на полях, плантациях и приусадебных участках; третьи – имеют неширокое применение по причине редкой встречаемости или недостаточной изученности; четвёртые – пока никак не используются человеком, однако обладая некоторыми хозяйственно ценными признаками, могут быть использованы в будущем. В таблице 1 представлено распределение видов флоры Припятского Полесья по выделенным хозяйственно-ценным группам.

Таблица 1 – Распределение видов флоры Припятского Полесья по хозяйственным группам

Хозяйственная группа растений	Компонент флоры (количество видов)			
	спонтанный	природный	аборигенный	адвентивный
Полезные свойства				
Пищевые	274	168	79	195
Декоративные	1012	520	321	691
Медоносные	286	241	162	124
Лекарственные	686	591	390	296
Пряно-ароматические	108	69	43	65
Технические	241	181	114	127
Кормовые	334	324	194	140
Мелиоративные	54	53	34	20
Отрицательные свойства				
Сорные	428	380	79	349
Ядовитые	154	147	91	63

Рассматривая спонтанный компонент можно отметить, что практически все виды флоры Припятского Полесья имеют определённую хозяйственную ценность. Из них 1012 таксонов (более 50 %) обладают декоративными свойствами – т. е. могут использоваться в озеленении населённых пунктов и приусадебных участков. Лекарственные свойства имеют 688 видов, кормовые – 334, медоносные – 286, пищевые – 274 и т. д. Значительное количество видов имеет отрицательное хозяйственное значение: к сорнякам относится 428 таксонов, а к ядовитым растениям – 154 представителя флоры. Следует отметить, что один и тот же вид может обладать одновременно несколькими как полезными, так и отрицательными свойствами: например, *Pulsatilla pratensis* (L.) Mill. одновременно является декоративным, медоносным, лекарственным и ядовитым растением.

Значительным числом ценных с хозяйственной точки зрения видов обладает природная флора рассматриваемой территории (таблица 1). Так, в пределах естественных экосистем Припятского Полесья произрастает 591 лекарственный вид, 520 – декоративных, 324 – кормовых, 241 – медоносный и ряд других таксонов, обладающих ценными свойствами. Всё это указывает на высокую ресурсную ценность дикорастущей флоры рассматриваемого региона.

Высокая хозяйственная ценность любой флоры обуславливает проблемы рационального использования, сохранения и возобновления её биологических ресурсов. Особую значимость они приобретают на фоне интенсификации антропогенной трансформации ландшафтов, что актуально и для территории Белорусского Полесья. Рассмотрение хозяйственного значения аборигенных и адвентивных видов в отдельности позволяет выявить уязвимость некоторых из них с одной стороны, а также наметить общие направления заноса и интродукции новых адвентивных видов растений с другой.

На рисунке 1 представлены спектры хозяйственно-ценных видов аборигенного и адвентивного компонентов флоры Припятского Полесья.

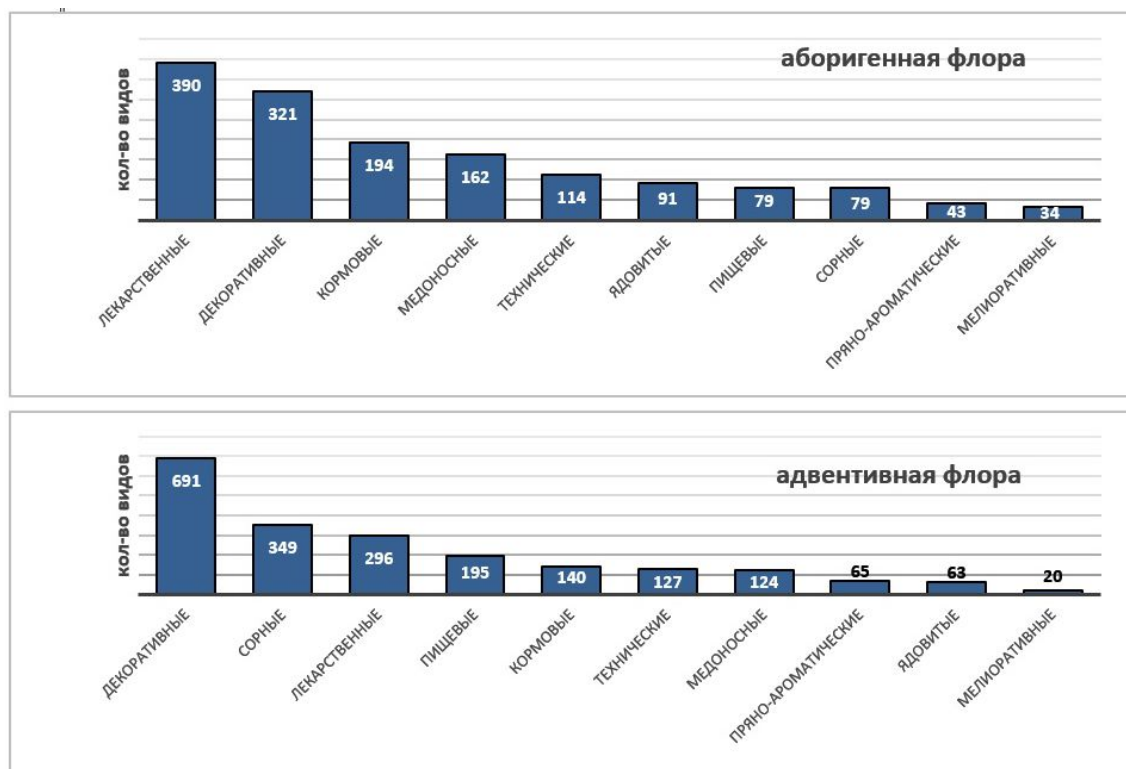


Рисунок 1 – Спектр хозяйственно-ценных видов флоры Припятского Полесья

Представленный рисунок демонстрирует, что позиции ряда хозяйственно-ценных групп растений в спектрах аборигенной и адвентивной фракций рассматриваемой флоры не совпадают, что позволяет выявить некоторые особенности их хозяйственно-экономической структуры. В составе аборигенного компонента флоры наиболее представительными (более 100 ви-

дов) являются группы лекарственных, декоративных, кормовых, медоносных и технических растений. Растения, имеющие отрицательные хозяйственные свойства (ядовитые и сорные), находятся в хвостовой части спектра. С ними соседствуют и такие ценные группы растений как пищевые и пряно-ароматические, насчитывающие всего 79 и 43 представителя соответственно.

Особенность адвентивной фракции флоры заключается в том, что здесь на лидирующие позиции выходят сорные (349 представителей) и пищевые (195 представителей) растения. Первые из них представлены в основном случайно-занесёнными видами, а вторые (как и большинство декоративных, лекарственных и других ценных растений) являются результатом целенаправленной интродукции. В хвосте спектра находятся такие относительно малочисленные группы как ядовитые и мелиоративные, а также пряно-ароматические растения.

Наибольшее количество видов во флоре Припятского Полесья (1012) обладает декоративными свойствами: из них 691 вид является адвентивным, а 321 – аборигенным. Эта хозяйственная группа достаточно условная, поскольку при оценке возможности использования данных видов в благоустройстве населённых пунктов должны учитываться не только их эстетические свойства, но и возможность и целесообразность культивирования. Многие из декоративных видов аборигенного происхождения (75 таксонов) введены в культуру и широко используются в благоустройстве: *Picea abies* (L.) Karst., *Iris sibirica* L., *Viburnum opulus* L. и ряд других. Большинство же аборигенных видов (*Inula salicina* L., *Nymphaea alba* L., *Thalictrum lucidum* L. и др.), обладающих высокими декоративными свойствами, пока не культивируются, но могут собираться в дикорастущих условиях (*Cephalanthera rubra* (L.) Rich., *Gladiolus imbricatus* L., *Pulsatilla patens* (L.) Mill. и др.), что является одной из причин уменьшения численности их местообитаний.

Декоративные растения адвентивного происхождения отличаются большим разнообразием и представлены таксонами, имеющими различное географическое происхождение и биологические особенности. Среди них известны деревья (*Fraxinus pennsylvanica* Marshall, *Picea pungens* Engelm., *Tilia americana* L. и др.), кустарники (*Amorpha fruticosa* L., *Cotoneaster dammeri* C.K. Schneid., *Buxus sempervirens* L. и др.), лианы (*Campsis radicans* (L.) Bureau, *Clematis jackmanii* T. Moore, *Toxicodendron radicans* (L.) Kuntze и др.), различные травянистые многолетники (*Armeria maritima* (Mill.) Willd., *Primula japonica* A.Gray, *Rodgersia aesculifolia* Batalin и др.) и однолетники (*Ipomoea lobata* (Cerv.) Thell., *Phacelia campanularia* A. Gray, *Tagetes tenuifolia* Cav. и др.). Практически все они являются целенаправленно занесёнными видами (эргазиофитами), интродуцированными на территорию Белорусского Полесья в различное историческое время. Только незначительная часть декоративных видов растений адвентивного происхождения относится к ксенофитам – таксонам, занесённым сюда случайно: *Eupatorium maculatum* L., *Lathyrus tuberosus* L., *Ononis repens* L. и другие.

Лекарственными свойствами обладает 686 видов флоры Припятского Полесья – все они могут использоваться в официальной или народной медицине и ветеринарии для лечения болезней человека и животных. В составе аборигенной флоры таких видов 390, присутствуют они практически среди всех семейств и различных эколого-биологических групп и, тем самым, могут произрастать в различных фитоценозах: лесных (*Frangula alnus* Mill., *Rhamnus cathartica* L., *Vaccinium vitis-idaea* L. и др.), луговых (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim., *Inula britannica* L., *Veronica longifolia* L. и др.), болотных (*Comarum palustre* L., *Ledum palustre* L., *Oxycoccus palustris* Pers. и др.), околородных (*Alisma plantago-aquatica* L., *Hydrocharis morsus-ranae* L., *Mentha aquatica* L. и др.) и т. д.

Среди адвентивных таксонов лекарственными свойствами обладает 296 видов. Среди представителей этой группы отмечены виды, ввезённые непосредственно в качестве лекарственных растений (*Borago officinalis* L., *Mentha × piperita* L., *Nepeta cataria* L. и др.), а также виды других хозяйственных групп, используемые в медицине и ветеринарии (*Anethum graveolens* L., *Ocimum basilicum* L., *Zea mays* L. и др.).

Группа растений, обладающих сорными свойствами, представлена 428 видами, что составляет 21,55 % от видового состава спонтанной флоры Припятского Полесья. Из них 79 видов имеют аборигенное происхождение, а 349 (более 80 %) – адвентивное. Следовательно, роль адвентивных видов в формировании сорного компонента флоры в настоящее время является приоритетной. Большинство сорняков аборигенного происхождения относятся к видам-апофитам с широким ареалом: голарктическим, евразийским и европейско-сибирским

плюризональным (*Ranunculus repens* L., *Taraxacum officinale* F.H. Wigg., *Tussilago farfara* L. и др.). В составе сорного компонента адвентивной флоры приоритетную роль играют виды европейского (*Chenopodium rubrum* L., *Cirsium arvense* (L.) Scop., *Plantago major* L. и др.), североамериканского (*Amaranthus blitum* L., *Ambrosia artemisiifolia* L., *Helianthus tuberosus* L. и др.) и азиатского (*Elsholtzia ciliata* (Thunb.) Hyl., *Impatiens glandulifera* Royle, *Salsola collina* Pall. и др.) происхождения. Биоморфологические особенности большинства сорных видов определяются преобладанием (более 53 %) однолетников, отличающихся обильной семенной продуктивностью. Многолетники представлены преимущественно вегетативно подвижными длиннокорневищными и стержнекорневыми видами растений.

К кормовым растениям относится 194 аборигенных вида, которые могут использоваться как корм для сельскохозяйственных животных, а также других представителей дикой фауны, имеющих ресурсную ценность. Большинство видов этой группы относятся к семействам *Gramineae* (*Phleum pratense* L., *Festuca rubra* L., *Poa pratensis* L. и др.), *Fabaceae* (*Astragalus glycyphyllos* L., *Lotus corniculatus* L., *Trifolium repens* L. и др.) и *Cyperaceae* (*Eleocharis palustris* (L.) Roem. et Schult., *Carex ovalis* Gooden., *Carex vesicaria* L. и др.), произрастающим в составе лугово-болотных фитоценозов. Для кормления сельскохозяйственных животных могут быть использованы 140 адвентивных видов растений. Как и в составе аборигенного компонента флоры в данной группе наиболее многочисленными являются представители семейств *Gramineae* (*Avena sativa* L., × *Festulolium loliaceum* (Huds.) P. Fourn., *Secale cereale* L. и др.) и *Fabaceae* (*Coronilla varia* L., *Melilotus officinalis* (L.) Lam., *Vicia sativa* L. и др.). Всего в составе флоры Припятского Полесья насчитывается 334 кормовых вида растений.

Несколько менее представительной является группа медоносных растений, куда включены таксоны (286 видов), обладающие высокой нектаропродуктивностью и пыльценосностью. Из них 162 вида являются аборигенами: *Acer platanoides* L., *Calluna vulgaris* (L.) Hull, *Tilia cordata* Mill. и многие другие. Среди медоносных растений адвентивного происхождения достаточно многочисленными являются виды растений, целенаправленно занесённые на изучаемую территории как ценные медоносы: *Phacelia tanacetifolia* Benth., *Robinia pseudoacacia* L., *Scutellaria baicalensis* Georgi и другие. Всего в рассматриваемой группе насчитывается 124 адвентивных вида.

Среди представителей аборигенной флоры 79 видов могут использоваться человеком в пищу как ягодные (*Fragaria vesca* L., *Ribes nigrum* L., *Vaccinium vitis-idaea* L. и др.), плодовые (*Malus sylvestris* Mill., *Pyrus pyrausta* Du Roi, *Sorbus aucuparia* L. и др.), орехоплодные (*Corylus avellana* L., *Quercus robur* L. и *Trapa natans* L.), крахмало- и сахароносные (*Acer platanoides* L., *Nymphaea candida* C. Presl, *Pteridium pinetorum* C.N. Page et R.R. Mill и др.), витаминоносные (*Aegopodium podagraria* L., *Allium ursinum* L., *Primula veris* L. и др.), овощные (*Allium oleraceum* L., *Asparagus officinalis* L., *Rumex acetosa* L. и др.) растения. Некоторые из них (*Betula pendula* Roth, *Vaccinium myrtillus* L., *Vaccinium vitis-idaea* L. и др.) имеют существенное экономическое значение – они сами или их продукты заготавливаются в больших объёмах; использование некоторых других видов (например, *Allium ursinum* L.) является одной из причин снижения их численности.

Более представительной и разнообразной является группа пищевых растений адвентивного происхождения, насчитывающая 195 видов. Среди них отмечены зерновые (*Hordeum vulgare* L., *Panicum miliaceum* L., *Zea mays* L. и др.), овощные (*Beta vulgaris* L., *Brassica oleracea* L., *Daucus sativus* (Hoffm.) Röhl. ex Pass. и др.), плодовые (*Malus prunifolia* (Willd.) Borkh., *Persica vulgaris* Mill., *Prunus domestica* L. и др.), ягодные (*Oxycoccus macrocarpos* (Aiton) Pursh, *Ribes rubrum* L., *Vitis riparia* Michx. и др.), витаминоносные (*Allium fistulosum* L., *Eruca sativa* Mill., *Spinacia oleracea* L. и др.) и другие растения, используемые человеком в пищу. Эта группа растений постоянно пополняется за счёт интенсивной интродукции новых видов: *Melothria scabra* Naudin, *Sesamum indicum* L., *Vigna unguiculata* (L.) Walp. и ряда других.

Значительная часть пищевых растений обладает также пряно-ароматическими свойствами, т. е. может использоваться для приготовления ароматических чаёв, фитокомпозиций и в качестве специй. Всего же в составе спонтанной флоры Припятского Полесья таких видов 108 – 43 аборигенных и 65 адвентивных. Среди аборигенных видов этой группы более многочисленными являются представители семейств *Labiatae* (*Melittis sarmatica* Klokov, *Mentha*

× *verticillata* L., *Thymus serpyllum* L. и др.), *Rosaceae* (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim., *Geum rivale* L., *Ribes nigrum* L. и др.) и *Gramineae* (*Hierochloa hirta* (Schrank) Borbás, *Anthoxanthum odoratum* L., *Hierochloa repens* (Host) P. Beauv. и др.). Среди пряно-ароматических растений адвентивного происхождения также более многочисленными являются представители перечисленных выше семейств (за исключением *Gramineae*), а также виды из семейств *Compositae* (*Artemisia abrotanum* L., *Tagetes erecta* L., *Tanacetum balsamita* L. и др.) и *Umbelliferae* (*Anethum graveolens* L., *Carum carvi* L., *Coriandrum sativum* L. и др.).

Группа технических растений насчитывает всего 241 вид. Среди представителей аборигенной флоры 117 видов могут обеспечивать различные отрасли промышленности разнообразным сырьём: натуральными волокнами (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., *Typha latifolia* L., *Urtica dioica* L. и др.), красителями (*Bistorta major* Gray, *Calluna vulgaris* (L.) Hull, *Serratula tinctoria* L. и др.), дубильными веществами (*Quercus robur* L., *Rumex aquaticus* L., *Salix cinerea* L. и др.) и т. д. Многие виды древесных растений (*Picea abies* (L.) Karst., *Pinus sylvestris* L., *Betula pendula* Roth и др.) дают ценную древесину и другую продукцию её переработки (канифоль, бумагу, спирты и т. д.). Группа технических растений адвентивного генезиса насчитывает 127 таксонов, представлена она также видами различного хозяйственного использования: *Linum usitatissimum* L., *Nicotiana tabacum* L., *Solanum tuberosum* L. и многими другими.

В составе флоры Припятского Полесья 154 вида относятся к ядовитым растениям и, тем самым, обладают отрицательными хозяйственными свойствами для человека. Среди них 91 вид является аборигенным, а 63 – адвентивным. Большинство ядовитых аборигенных видов являются представителями семейств *Ranunculaceae* (*Actaea spicata* L., *Ranunculus acris* L., *Thalictrum flavum* L. и др.) и *Scrophulariaceae* (*Melampyrum nemorosum* L., *Pedicularis palustris* L., *Rhinanthus minor* L. и др.). К ядовитым растениям относятся также такие виды как *Cicuta virosa* L., *Daphne mezereum* L., *Paris quadrifolia* L. и некоторые другие. Большинство аборигенных ядовитых растений обладают одновременно и лекарственными свойствами. Особенность ядовитых растений адвентивного происхождения заключается в том, что практически все они относятся к группе декоративных представителей культурной флоры: *Aconitum × cammarum* L., *Datura tatula* L., *Taxus baccata* L. и многие другие.

Различные виды дикорастущих растений используются для улучшения плодородия почв, закрепления грунтов, в борьбе с водной и ветровой эрозией, при очистке водоёмов и т. д. Все они объединяются в группу мелиоративных растений, к которой относится 34 представителя аборигенной флоры Припятского Полесья: *Lemna minor* L., *Stratiotes aloides* L., *Typha latifolia* L. и другие. Группа мелиоративных растений является самой малочисленной (20 видов) и в составе адвентивного компонента флоры. Большинство этих видов могут использоваться для восстановления и поддержания плодородия почв (*Lupinus albus* L., *Lupinus angustifolius* L., *Secale cereale* L. и др.), а также для очистки водоёмов (*Elodea canadensis* Michx., *Lemna gibba* L., *Typha laxmannii* Lepech. и др.).

Заключение. Оценивая хозяйственное значение рассматриваемых представителей флоры Припятского Полесья следует отметить, что как аборигенный, так и адвентивный её компоненты обладают значительным ресурсным потенциалом. Они сложены видами различной хозяйственной ценности, которые могут быть использованы для снабжения ценным сырьём разных отраслей промышленности, а также для удовлетворения личных нужд населения. Спектр ведущих хозяйственно-ценных групп (лекарственные, декоративные, кормовые, медоносные и т. д.) видов аборигенной флоры Припятского Полесья соответствует флоре Беларуси в целом [18], а также некоторым другим природным регионам (например, бассейну реки Свяги [19]). Его особенности заключаются в низких позициях групп растений с отрицательными хозяйственными свойствами – сорных и ядовитых.

В составе адвентивной флоры сорные растения наоборот являются одними из самых многочисленных, поскольку широко представлены как среди видов, имеющих случайный занос, так и среди различных интродуцентов. В целом более 800 заносных видов в составе флоры Припятского Полесья являются эргазиофитами – целенаправленно ввезёнными сюда человеком для их культивирования и последующего хозяйственного использования. Всё это

способствует обогащению адвентивной флоры новыми таксонами и в результате их натурализации является причиной синантропизации растительного покрова в регионе, а также создаёт предпосылки для формирования здесь богатой и разнообразной культурной флоры.

Литература

1. Нацыянальны атлас Беларусі / Камітэт па зямельных рэсурсах, геадэзіі і картаграфіі пры Саўеце Міністраў Рэспублікі Беларусь. – Мінск : Белкартаграфія, 2002. – 292 с.
2. Мялик, А.Н. Анализ географического распространения видов аборигенной флоры Припятского Полесья / А.Н. Мялик // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2016. – № 2. – С. 15–21.
3. Парфёнов, В.И. Флора Белорусского Полесья. Современное состояние и тенденции развития / В.И. Парфёнов. – Минск : Наука и техника, 1983. – 295 с.
4. Парфёнов, В.И. Флористические особенности Припятского Полесья / В.И. Парфёнов, Д.В. Дубовик, А.Н. Скуратович // Рациональное использование пойменных земель : материалы науч.-практ. семинара, ГПУ «Национальный парк «Припятский», 19–21 июня 2013 г. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.] ; редкол.: В.С. Хомич (отв. ред.) [и др.]. – Минск : РУП «Минсктиппроект», 2013 – С. 110–114.
5. Мялик, А.Н. Биоморфологический анализ аборигенной флоры Припятского Полесья / А.Н. Мялик // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 5. Хімія. Біялогія. Навукі аб Зямлі. – 2016. – № 1. – С. 46–54.
6. Мялик, А.Н. Экологический анализ аборигенной флоры Припятского Полесья / А.Н. Мялик // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. Естественные науки. – 2016. – № 3 (96). – С. 40–47.
7. Мялик, А.Н. Эколого-географические особенности пограничных видов флоры Припятского Полесья / А.Н. Мялик // Ботаника (исследования) : сб. научн. тр. / Ин-т эксперимент. бот. НАН Беларуси. – Минск, 2016. – Вып. 45. – С. 71–82.
8. Козловская, Н.В. Хорология флоры Белоруссии / Н.В. Козловская, В.И. Парфёнов. – Минск : Наука и техника, 1972. – 307 с.
9. Ильин, М.М. Общие вопросы изучения сырьевых растений / М.М. Ильин // Методика полевого исследования сырьевых растений. – Москва : Изд. АН СССР, 1948. – С. 7–24.
10. Сафонов, М.А. Оценка потенциала биологических ресурсов: основные подходы и проблемы реализации / М.А. Сафонов // Вестник Оренбургского гос. педагогического ун-та. – 2013. – № 2. – С. 35–43.
11. Гусынин, И.А. Токсикология ядовитых растений / И.А. Гусынин. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Сельхозиздат, 1962. – 624 с.
12. Лекарственные растения и их применение / Д.К. Гесь [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1974. – 591 с.
13. Мялик, А.Н. Хозяйственное значение инвазионных видов Белорусского Полесья / А.Н. Мялик, О.А. Галуц // Прыроднае асяроддзе Палесся: асаблівасці і перспектывы развіцця : зб. навук.прац / Нац. акад. навук Беларусі, Палес. аграр.-экал. ін-т ; рэдкал. : М.В. Міхальчук (гал. рэд.) [і інш.]. – Мінск, 2016. – Вып. 9. – С. 24–29.
14. Пряно-ароматические растения природной флоры Беларуси / С.А. Дмитриева [и др.] // Проблемы сохранения биологического разнообразия и использования биологических ресурсов : материалы III Междунар. научн.-практ. конф., посвященной 110-летию со дня рождения академика Н.В. Смольского, Минск, 7–9 октября 2015 : в 2 ч. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.] ; редкол. : В.В. Титок [и др.]. – Минск, 2015. – Ч. 1. – С. 57–61.
15. Ульянова, Т.Н. Сорные растения во флоре России и других стран СНГ / Т.Н. Ульянова. – СПб. : ВИР, 1998. – 233 с.
16. Флора БССР : в 5 т. / редкол. Б.К. Шишкин (глав. ред.) [и др.]. – Минск : изд-во Акад. наук Белорус. ССР. – 1959. – 5 т. – 267 с.
17. Чопик, В.И. Дикорастущие полезные растения Украины : справочник / В.И. Чопик, Л.Г. Дудченко, А.Н. Краснова. – Киев : Наук. Думка, 1983. – 399 с.
18. Козловская, Н.В. Флора Белоруссии, закономерности ее формирования, научные основы использования и охраны / Н.В. Козловская. – Минск : Наука и техника, 1978. – 128 с.
19. Фролов, Д.А. Флора бассейна реки Свияги : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.02.01 / Д.А. Фролов ; Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. – Сыктывкар, 2011. – 23 с.

УДК 332.3 + 911.6:502.34 (476)

Структура землепользования и экологическое состояние физико-географических округов Беларуси

А.С. СОКОЛОВ

Приведены результаты расчёта показателей структуры землепользования, орошения, осушения, антропогенной нагрузки, экологического состояния, кадастровой оценки земель сельскохозяйственного назначения для физико-географических округов – единиц физико-географического районирования Беларуси в Европейской десятичной системе районирования. Выделены группы округов с наибольшей и наименьшей трансформацией природной среды.

Ключевые слова: структура землепользования, категория земель, сельскохозяйственные земли, пашни, физико-географическое районирование, экологическое состояние.

In the article the results of calculation of indicators of land use, irrigation, drainage, anthropogenic load, ecological status and cadastral assessment of agricultural lands for the physical-geographical districts – units of physical-geographical zoning of Belarus in the European decimal system of zoning are shown. Groups of districts with the highest and lowest transformation of the natural environment were selected.

Keywords: structure of land use, land category, agricultural land, arable land, physical-geographical zoning, environmental state.

Современная схема физико-географического районирования Беларуси в Европейской десятичной системе районирования предложена Г.И. Марцинкевич с соавторами в 2001 г. [1]. Согласно ей территория делится на 5 провинций (выделяемых по географическим границам, которые обуславливают разный генезис рельефа и направленность физико-географических процессов), 14 округов (выделяемых по разновозрастным типам рельефа и антропогенным отложениям), 49 районов (выделяемых по типу рельефа и характеру почвенно-растительного покрова).

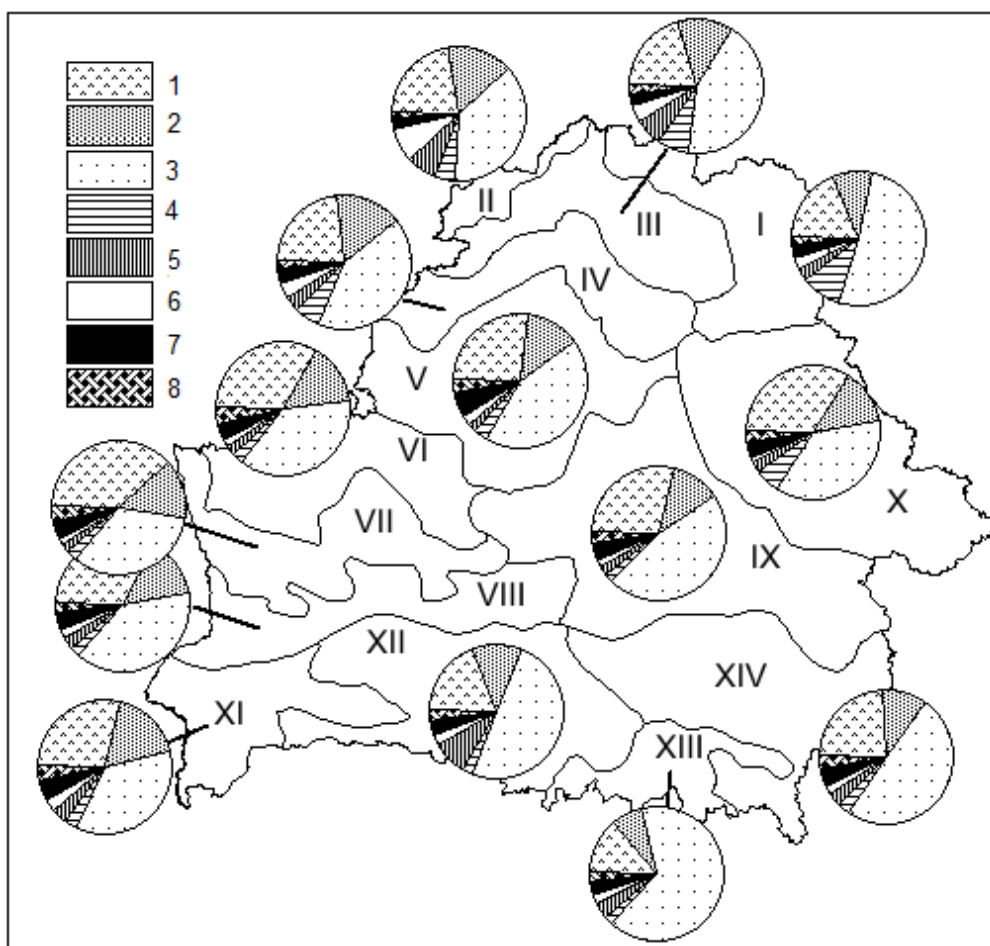
Указанные природные факторы, которые легли в основу выделения единиц физико-географического районирования, во многом определяют и характер хозяйственной деятельности человека, уровень антропогенной преобразованности природной среды. Особенности и закономерности связей между природными условиями территории, с одной стороны, и основными направлениями её использования и экологическим состоянием, с другой, позволяет выявить анализ соотношения различных категорий земель физико-географических провинций, округов и районов.

Целью настоящей работы является выявление природных и территориальных особенностей соотношения типов земель и экологического состояния природной среды в разрезе физико-географических округов. Исходя из данной цели сформулированы задачи:

- определение структуры землепользования физико-географических округов Беларуси;
- выявление округов, выделяющихся по доле земель различных категорий;
- оценка степени антропогенной преобразованности территорий округов по рассчитанным показателям их экологического состояния.

Для вычисления площадей земель различных категорий в пределах округов были использованы данные о площади земель соответствующих категорий в административных районах за 2017 г. [2], взвешенные по площади доли данного административного района в пределах физико-географического округа. Так же были рассчитаны показатели численности населения и кадастровой оценки сельскохозяйственных земель. В качестве показателей антропогенной нагрузки на природную среду использовалась плотность всего населения, плотность сельского населения, коэффициент относительной напряжённости эколого-хозяйственного баланса [3] и геоэкологический коэффициент [4].

Структура землепользования (соотношение земель различных категорий) по округам представлена на рисунке 1. Видно, что максимальные доли пахотных земель характерны для округов на западе страны (Понеманье, Западное Предполесье, Юго-Западный округ Белорусской гряды), а также для Приднепровского округа на востоке (более 30 %). По доле нарушенных земель выделяются Центральный округ Белорусской гряды и Брестское Полесье.



Физико-географические провинции и округа: Белорусское Поозерье: I – Витебское Поозерье, II – Браславское Поозерье, III – Подвинье, IV – Нарочано-Ушачское Поозерье; Западно-Белорусская провинция: V – Центральный округ Белорусской гряды, VI – Понеманье, VII – Юго-Западный округ Белорусской гряды; Предполесье: VIII – Западное Предполесье, IX – Восточное Предполесье; Восточно-Белорусская провинция: X – Поднепровье; Полесье: XI – Брестское Полесье, XII – Пинское Полесье, XIII – Мозырское Полесье, XIV – Гомельское Полесье

Типы земель: 1 – пахотные, 2 – луговые, 3 – лесные, 4 – под древесно-кустарниковой растительностью, 5 – под болотами, 6 – под водными объектами, 7 – под дорогами и иными транспортными коммуникациями, земли общего пользования, нарушенные земли, земли под застройкой, 8 – прочие

Рисунок 1 – Соотношение типов земель физико-географических округов Беларуси

Доля лесных земель максимальная на юго-востоке Беларуси (Гомельское, Мозырское, Пинское Полесье, Восточное Предполесье), а также на крайнем северо-востоке (Витебское Поозерье) – более 45 %. По доле луговых земель выделяется Брестское Полесье, Браславское и Нарочано-Ушачское Поозерье – более 15 %. Максимальная доля лесных земель в Мозырском Полесье (64,7 %), более 50 % лесных земель в Витебском Поозерье, от 40 до 50 % – в Гомельском и Припятском Полесье, Восточном Предполесье, Центральном округе Белорусской гряды, Подвинье и Нарочано-Ушачском Поозерье. Менее 35 % лесных земель в Брестском Полесье и Юго-Западном округе Белорусской гряды. Удельная площадь болот максимальна в Припятском Полесье, Браславском Поозерье и Пинском Полесье – более 6 %.

В таблице 1 показаны различные показатели осушения и орошения земель. Показатели антропогенного воздействия, экологического состояния и кадастровой оценки земель приведены в таблице 2. Статистический анализ показал наличие связи между плотностью сельского населения округов и значением общего балла кадастровой оценки земель (коэффициент Пирсона +0,57 при $p < 0,05$; коэффициент Спирмена +0,80 при $p < 0,05$).

Таблица 1 – Показатели осушения и орошения земель физико-географических районов, %

Показатель	Витебское Поозерье	Браславское Поозерье	Подвинье	Нарочано-Учашское Поозерье	Центральный округ Белорусской гряды	Понеманье	Юго-западный округ Белорусской гряды	Западное Проеполесье	Восточное Предполесье	Поднепровье	Брестское Полесье	Припятское Полесье	Мозырское Полесье	Гомельское Полесье
Осушенные земли	13,1	14,2	17,0	16,3	13,1	15,8	12,5	18,3	16,8	11,8	25,9	19,0	14,9	19,7
Осушенные сельскохозяйственные	10,2	11,1	14,1	13,9	11,2	13,3	11,5	16,8	13,9	9,5	24,1	16,2	10,8	15,0
Доля сельскохозяйственных среди осушенных	77,9	78,2	82,9	85,3	85,5	84,2	92,0	91,8	82,7	80,5	93,1	85,3	72,5	76,1
Доля осушенных земель среди сельскохозяйственных	34,9	28,5	40,3	34,5	27,2	27,1	21,5	34,9	33,2	19,5	51	50,2	49,5	41,9
Доля осушенных от площади пашни	42,3	37,8	49,0	35,2	15,6	10,7	8,8	23,1	21,6	14,0	38,9	41,1	37,4	34,1
Доля осушенных от площади лугов	22,2	16,0	28,4	34,4	53,1	65,3	57,0	64,5	62,8	34,6	72,8	64,8	72,4	60,6
Доля осушенных от площади под постоянными культурами	1,0	0,3	2,8	3,5	2,0	1,1	1,2	1,1	3,9	2,6	8,6	8,6	4,9	6,7
Орошаемые земли	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,4	0,3	0,0	0,2	0,0

Таблица 2 – Показатели антропогенной нагрузки на природную среду и кадастровой оценки сельскохозяйственных земель физико-географических районов

Показатель	Витебское Поозерье	Браславское Поозерье	Подвинье	Нарочано-Учашское Поозерье	Центральный округ Белорусской гряды	Понеманье	Юго-западный округ Белорусской гряды	Западное Проеполесье	Восточное Предполесье	Поднепровье	Брестское Полесье	Припятское Полесье	Мозырское Полесье	Гомельское Полесье
Население, чел./км ²	44,2	11,3	24,1	20,0	133,7	43,2	46,7	31,5	33,8	36,4	64,7	25,9	23,0	45,0
Сельское население, чел./км ²	6,5	6,3	6,1	8,4	19,5	11,4	11,6	10,6	9,4	7,8	14,9	9,6	5,4	9,0
K_0	0,7	0,3	0,5	1,1	1,1	0,8	1,1	0,9	1,4	1,1	0,5	0,7	0,6	0,8
K_f	1,46	0,91	1,10	1,10	1,10	1,13	0,72	1,15	1,36	0,89	0,89	1,48	1,63	1,31
Балл плодородия почв	26,3	24,2	24,2	25,7	28,6	32,5	34,7	32,2	28,5	28,6	30,5	28,2	26,9	27,2
Общий балл кадастровой оценки земель	23,9	20,8	21,9	24,0	27,5	31,8	34,5	32,3	28,2	27,0	31,1	27,7	25,4	27,0

Комплексный анализ рассчитанных показателей позволил ранжировать физико-географические округа по степени нарушенности природной среды и выделить группы округов, находящиеся в наиболее и наименее благоприятном экологическом состоянии.

К округам с наибольшей степенью антропогенной нарушенности природной среды можно отнести:

– Брестское Полесье (включает Высоковскую равнину, Малоритскую равнину, равнину Загородье): максимальная доля осушенных земель, высокая доля пашни, второе место по плотности населения, значение геоэкологического коэффициента соответствует кризисному экологическому состоянию, второе место по доле застроенных и нарушенных земель;

– Юго-Западный округ Белорусской гряды (включает Гродненскую возвышенность, Волковысскую возвышенность, Слонимскую возвышенную равнину, Новогрудскую возвышенность, Копыльскую гряду): максимальная доля пашни, минимальная доля лесов и, соответственно, значение геоэкологического коэффициента, максимальное значение коэффициента относительной экологической напряжённости, третье место по плотности населения, значение показателей кадастровой оценки земель максимально;

– Поднепровье (включает Оршанскую возвышенность, Горецко-Мстиславскую возвышенность, Оршано-Могилёвскую равнину, Костюковичскую равнину): второе место по удельной площади пашни, значение геоэкологического коэффициента соответствует кризисному экологическому состоянию, максимальное значение коэффициента относительной экологической напряжённости.

В эту же группу можно включить и Центральный округ Белорусской гряды (включает физико-географические районы: Вилейская равнина, Минская возвышенность, Ошмянская возвышенность, Верхнеберезинская низина, Борисовская возвышенная равнина), главным образом за счёт максимальной плотности всего и сельского населения среди всех округов и максимальной доли застроенных и нарушенных земель.

Минимальной нарушенностью характеризуются:

– Мозырское Полесье (включает Мозырско-Лельчицкую равнину и Хойникско-Брагинскую возвышенную равнину): минимальная плотность сельского населения, минимальная доля пашни, максимальное значение геоэкологического коэффициента, четвёртое по возрастанию место по коэффициенту относительной экологической напряжённости;

– Витебское Поозерье (включает Нещердо-Городокскую возвышенность, Суражскую низину, Витебскую возвышенность, Лучосскую низину): третье по возрастанию место по доле застроенных и нарушенных земель, второе по возрастанию место по доле пашни, третье место по значению геоэкологического коэффициента, низкие значения плотности сельского населения и коэффициента относительной экологической напряжённости, минимальная среди поозерских и полесских округов доля осушенных земель;

– Браславское Поозерье (включает Освейско-Браславские гряды): минимальная плотность населения, наиболее низкая доля застроенных и нарушенных земель, минимальное значение коэффициента относительной напряжённости и показателей кадастровой оценки.

Лишь немного уступает им по показателям нарушенности физико-географический округ Подвинье (включает Дисненскую низину, Полоцкую низину, Шумилинскую равнину), который отличается довольно низкими значениями коэффициента относительной экологической напряжённости, плотности сельского населения, доли застроенных и нарушенных земель при среднем значении геоэкологического коэффициента и сравнительно высокой доле пашни и осушенных земель.

Литература

1. Марцинкевич, Г.И. Физико-географическое районирование Беларуси в Европейской десятичной системе районирования / Г.И. Марцинкевич, Н.К. Клицунова, О.Ф. Якушко // Вестник БГУ. Сер. 2. Химия. Биология. География. – 2001. – № 1. – С. 85–90.
2. Реестр земельных ресурсов Республики Беларусь (по состоянию на 1 января 2017 года) / Гос. ком. по имуществу РБ. – Минск, 2017. – 57 с.
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 Нижневартовского региона) : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.36 ; Нижневартовский гос. гуман. ун-т / И.С. Аитов. – Барнаул, 2006. – 18 с.

Оценка содержания аскорбиновой кислоты в лекарственных растениях, выращенных в культуре

А.В. ХАДАНОВИЧ, О.В. ПЫРХ

Рассматриваются вопросы, посвященные оценке содержания аскорбиновой кислоты в лекарственных растениях, выращенных в культуре с использованием и без использования биостимулятора роста «Ростмомент». Выделен ряд исследуемых лекарственных растений по содержанию аскорбиновой кислоты. Показано, что количество витамина С в надземной части изучаемых видов растений зависит от принадлежности к различным ботаническим семействам и от фармакологических свойств. Применение биорегулятора и стимулятора жизнедеятельности растений «Росмомент» в целом не оказывает существенного влияния на содержание аскорбиновой кислоты в растительном материале.

Ключевые слова: растения, лекарственные, аскорбиновая, кислота, семейство, биостимулятор, выращивание, ряд, фотометрия, почвы.

In article the questions devoted to assessment of content of ascorbic acid in the medicinal plants which are grown up in culture with use and without use of a biogrowth factor of «Rostmoment» are considered. A number of the studied medicinal plants on the content of ascorbic acid are allocated. It is shown that the amount of vitamin C in an elevated part of the studied species of plants depends on botanical belonging to various families and on their pharmacological properties. Use of the bioregulator and a stimulator of activity of plants of «Rosmoment» in general has no significant effect on the content of ascorbic acid in plant material.

Keywords: plants, medicinal, ascorbic, acid, family, biostimulant, cultivation, row, photometry, soil.

Введение. Лекарственные растения стали неотъемлемым элементом антропогенного ландшафта, и их культивирование удовлетворяет эстетические потребности населения, а также позволяет решать экологические проблемы, связанные с уменьшением запасов лекарственных растений в их естественной среде. По данным многолетних исследований Центрального ботанического сада НАН Беларуси почвенно-климатические условия нашей страны позволяют культивировать в открытом грунте около 100 видов лекарственных растений мировой флоры. Лекарственные растения являются источником накопления множества веществ антиоксидантной природы (в том числе аскорбиновой кислоты). Основную массу антиоксидантов составляют вещества, содержащие подвижный атом водорода с ослабленной связью с атомом углерода, которые вступают в реакции с окислительными свободными радикалами и тем самым уменьшают их концентрацию в реакционной среде [1].

Аскорбиновая кислота (Витамин С) участвует в транспорте электронов в окислительно-восстановительных процессах, является восстановителем и легко переходит в дегидроаскорбиновую кислоту. Она участвует в регулировании окислительных и восстановительных процессов, влияет на обмен веществ, ускоряет заживление ран, повышает свертываемость крови и сопротивляемость к инфекциям, оказывает антиоксическое действие при отравлении многими ядами и бактериальными токсинами [2]. Аскорбиновая кислота играет ведущую роль в метаболизме железа в организме, восстанавливая Fe^{3+} в Fe^{2+} , усиливает действие витамина Е, преобразует его окисленную форму в антиоксидантную [3]. Соединение легко может переходить в дегидроформу – дегидроаскорбиновую кислоту, аскорбиновая кислота необходима для синтеза коллагена из проколлагена. Переход аскорбиновой кислоты в дегидроаскорбиновую кислоту осуществляется по схеме: аскорбиновая кислота $\rightarrow$ монодегидроаскорбиновая $\rightarrow$ дегидроаскорбиновая кислота. В растениях аскорбиновая кислота причастна к возникновению протонного градиента, используемого для транспорта через клеточную мембрану, и таким образом участвует в регуляции роста.

Цель исследований – оценка содержания аскорбиновой кислоты в лекарственных растениях, выращенных в культуре.

Для выполнения эксперимента были выбраны шесть видов растений, принадлежащих к трем семействам: сем. Сложноцветные (Compositae) – представители расторопша пятнистая (*Silybum marianum*), календула лекарственная (*Calendula officinalis*); сем. Яснотковые (Lamiaceae) – чабер садовый (*Satureja hortensis*), шалфей лекарственный (*Salvia officinalis*); сем. Зонтичные (Apiaceae) – тмин обыкновенный (*Galium carvi*), сельдерея душистый (*Apium graveolens*).

Травянистые растения срезались на уровне почвы в разных достаточно удаленных друг от друга точках пробной площади. Лекарственные травы собраны в фазе цветения. У травянистых растений исследовалась надземная часть.

Выбор растительных объектов обусловлен их фармакологическими особенностями.

Расторопша – высокоэффективный гепатопротектор. Семя расторопши имеет выраженный желчегонный эффект, т. е. усиливает образование и выведение желчи. Использование в лечебных целях семян расторопши предупреждает нарушения структуры и функции печени при различных патологиях, стимулирует образование новых клеток печени, снижает повреждающее действие на печень ряда лекарственных средств и токсинов. Семена расторопши оказывают противовоспалительное и ранозаживляющее действие, повышают защитные свойства печени по отношению к различным инфекциям и отравлениям.

Календула лекарственная. В листьях календулы лекарственной высокое содержание витамина С, органических кислот, в том числе салициловой. В цветочных корзинках содержатся каротиноиды и флавоноиды. В соцветиях календулы имеются полисахариды, полифенолы, смолы, органические кислоты. Препараты календулы ускоряют процессы регенерации тканей, способствуют регенерации слизистых оболочек желудка и кишечника, заживлению язв и эрозий.

Чабер садовый – источник эфирного масла, обладающего антиоксидантным, бактерицидным, закрепляющим и противоглистным действием, возбуждающим аппетит. *Satureja hortensis* является хорошим болеутоляющим, потогонным, противоглистным и кровоостанавливающим средством, очищает сосуды от холестерина.

Тмин обыкновенный применяют при атонии кишечника как мягкое слабительное средство при метеоризме, заболеваниях желудочно-кишечного тракта, особенно при гастрите с пониженной кислотностью, используют при желче- и мочекаменной болезнях, заболеваниях мочевыводящих путей. В комбинации с другими растительными средствами плоды тмина применяют при гепатитах, для лечения сердечно-сосудистых заболеваний, а также в качестве седативного средства. Эфирное масло тмина используется как антисептик и противоглистное средство.

Семена сельдерея душистого оказывают мочегонное действие, рекомендуется для лечения больных мочекаменной болезнью, для лечения сахарного диабета, ожирения, подагры, аллергического дерматита, крапивницы, как снотворное и для укрепления нервной системы.

Шалфей лекарственный применяют при воспалительных заболеваниях ротоглотки, носоглотки и верхних дыхательных путей, слизистой полости рта, при потере голоса, фарингите, бронхиальной астме, кашле, ангине и др. Настои шалфея используют при желудочно-кишечных и кожных заболеваниях, при легких ожогах и обморожениях [4], [5].

Закладка вегетационно-полевых опытов проводилась на микроделянках площадью 1 м² на территории приусадебного хозяйства Гомельского района. Растения выращивались без использования (контроль) и с использованием биостимулятора роста «Ростмомент». Удобрение «Ростмомент» вносили в почву при посеве, далее производилась внекорневая подкормка.

Ростмомент – экологически безопасный биорегулятор и стимулятор жизнедеятельности растений на основе дрожжей (хлебопекарных, пивных, винных, спиртовых). Произведен по специальной технологии в Республике Беларусь. Действие регулятора роста «Ростмомент» основано на нормализации биохимических процессов в живой клетке, улучшении обмена веществ. Широкий спектр аминокислот, содержащихся в регуляторе роста «Ростмомент», обладает повышенным биостимулирующим действием на рост и развитие растений, им свойственна высокая миграционная подвижность в почве, содержит биологически активные вещества: белковые вещества; моно- и полисахариды; макро- и микроэлементы: калий, магний, фосфор, марганец, железо, медь, кальций, натрий и другие производные витаминов В₁, В₂, В₃, В₆, РР [6].

Отбор проб почв и растительного материала и определение агрохимических показателей почв осуществлялся по стандартным методикам [7].

Количественное определение аскорбиновой кислоты проводили фотометрическим методом. В качестве органической фазы использовалось авиационное топливо (ГОСТ 10227-86). Измерение оптической плотности проводили на спектрофотометре pVC фирмы SOLAR при длине волны равной 480 нм.

Результаты и обсуждение. Основные агрохимические характеристики исследуемой почвы приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Агрохимические показатели образцов дерново-подзолистой почвы

Тип почвы	Основные агрохимические показатели данной почвы				
	Гумус, %	ЕКО, мг-кв/100 г	рН	К ₂ O	P ₂ O ₅
				мг/кг почвы	
Дерново-подзолистая супесчаная почва	2,35 ± 0,16	3,47 ± 0,23	5,40	31,0 ± 2,7	67,5 ± 6,9

Содержание гумуса в изучаемой почве составило 2,3 % (для данного типа почв показатель гумуса лежит в пределах от 1,5 % до 4 %); содержание обменного калия – 31,2 мг/кг почвы; значение рН почвенной вытяжки 5,4 единиц. Для дерново-подзолистых почв характерно низкое содержание гумуса, обменного калия и подвижного фосфора и резкое снижение их количества с глубиной профиля. Большинство дерново-подзолистых почв характеризуется сравнительно низким содержанием усвояемых (минеральных) форм азота и подвижного фосфора.

Средние значения содержания аскорбиновой кислоты в лекарственных растениях исследуемых семейств, выращенных в культуре без использования биостимулятора, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Содержание аскорбиновой кислоты в растениях (контроль) (n = 3, p = 0,95), мг%

Семейство	Вид растения	Содержание аскорбиновой кислоты	
		2016 г.	2017 г.
Астровые	Календула лекарственная	138,2 ± 12,1	141,5 ± 13,6
	Расторопша пятнистая	225,4 ± 19,3	219,4 ± 19,8
Зонтичные	Сельдерей душистый	118,5 ± 10,2	123,4 ± 11,1
	Тмин обыкновенный	68,7 ± 6,3	65,4 ± 5,7
Яснотковые	Чабер садовый	96,3 ± 8,4	93,7 ± 8,3
	Шалфей лекарственный	85,8 ± 7,6	88,7 ± 7,4

В период исследований максимальное содержание аскорбиновой кислоты отмечено у расторопши пятнистой (225,4 и 219,4 мг%), минимальное – у тмина обыкновенного (68,7 и 65,4 мг% в 2016 и 2017 гг. соответственно).

Исследовали растительный материал, выращенный на делянках с внесением биостимулятора роста «Ростмомент» на содержание витамина С. Результаты исследований представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Содержание аскорбиновой кислоты в растениях с применением удобрения «Ростмомент» (n = 3, p = 0,95), мг%

Семейство	Вид растения	Содержание аскорбиновой кислоты	
		2016 г.	2017 г.
Астровые	Календула лекарственная	149,7 ± 11,5	150,3 ± 13,2
	Расторопша пятнистая	239,5 ± 20,4	228,6 ± 19,8
Зонтичные	Сельдерей душистый	124,6 ± 11,7	132,4 ± 11,7
	Тмин обыкновенный	72,3 ± 6,8	71,8 ± 6,7
Яснотковые	Чабер садовый	105,4 ± 9,3	102,5 ± 8,6
	Шалфей лекарственный	97,3 ± 8,7	95,7 ± 8,5

Закономерности накопления исследуемого компонента растениями сохранились аналогичными, как в случае выращивания растений без применения удобрения. Максимальное содержание аскорбиновой кислоты отмечалось у расторопши пятнистой и составило 239,5 и 228,6 мг%, минимальное – 72,3 и 71,8 мг% у тмина обыкновенного (в 2016 и 2017 гг. соответственно).

Первичный анализ полученных результатов показал, что содержание аскорбиновой кислоты в растительном материале, выращенном с использованием биостимулятора роста, выше по сравнению с контрольными образцами: на 13,4 и 9,0 мг% – у представителей семейства Астровые; на 4,9 и 7,7 мг% – в растениях семейства Зонтичные; на 10,3 и 7,9 мг% – у представителей семейства Яснотковые (2016 и 2017 гг. соответственно).

По содержанию аскорбиновой кислоты исследуемые лекарственные растения располагались в следующий ряд: расторопша пятнистая > календула лекарственная > сельдерей душистый > чабер садовый > шалфей лекарственный > тмин обыкновенный.

С целью оценки достоверности различий результатов проведен однофакторный дисперсионный анализ (таблица 4).

Таблица 4 – Результаты однофакторного дисперсионного анализа

Семейства	F _{кр}	F _{пр}	F _{кр}	F _{пр}
	2016 г.		2017 г.	
Астровые	4,19	0,66	4,19	0,46
Зонтичные	4,19	0,40	4,19	1,49
Яснотковые	4,23	31,85	4,23	26,6

Статистический анализ данных показал, что для представителей семейств Астровых и Зонтичных, выращенных на почвах без внесения удобрения и с применением последнего, достоверность различий между содержанием аскорбиновой кислоты не установлена. Содержание витамина С в растениях семейства Яснотковых, выращенных с применением биостимулятора роста, выше и достоверно отличается от такового в растительном материале, отобранном на контрольных участках ($F_{пр} > F_{кр}$).

Выводы. Результаты микрополевых опытов показали, что содержание аскорбиновой кислоты в исследуемых лекарственных растениях варьировало в широком диапазоне: от 65,4 мг% (тмин обыкновенный) до 239,5 мг% (расторопша пятнистая).

Построен ряд лекарственных растений по содержанию исследуемого компонента: расторопша пятнистая > календула лекарственная > сельдерей душистый > чабер садовый > шалфей лекарственный > тмин обыкновенный.

Применение биостимулятора роста «Ростмомент» обусловило увеличение содержания витамина С в исследуемых лекарственных растениях. Данные проведенного статистического анализа свидетельствуют о достоверности различий между содержанием аскорбиновой кислоты у представителей семейства Яснотковые, выращенных на почвах без внесения удобрения и с применением «Ростмомента»; для представителей семейств Астровых и Зонтичных достоверность различий не установлена.

Содержание аскорбиновой кислоты в надземной части изучаемых видов лекарственных растений, вероятно, зависит от принадлежности к различным ботаническим семействам и от фармакологических свойств растений.

Литература

1. Дорошкевич, И.Н. Лекарственное растениеводство: тенденции и перспективы / И.Н. Дорошкевич // Вести Национальной академии наук Беларуси. Серия аграрных наук. – 2010. – № 1. – С. 71–76.
2. Физиология и биохимия сельскохозяйственных растений / Н.Н. Третьяков, Е.И. Кошкин, Н.М. Макрушин [и др.]. – М. : Колос, 2000. – 180 с.
3. Яковлева, Г.П. Лекарственное растительное сырьё. Фармакогнозия: учебное пособие / Г.П. Яковлева, К.Ф. Блинова. – СПб. : СпецЛит, 2004. – 765 с.
4. Гаммерман, А.Ф. Лекарственные растения / А.Ф. Гаммерман, Г.Н. Кадаев, А.А. Яценко-Хмелевский. – М. : Высшая школа, 1990. – 401 с.
5. Соколов, С.Я. Справочник по лекарственным растениям / С.Я. Соколов, А.А. Сорокина. – М. : Медицина, 1990. – 427 с.
6. Применение регулятора роста Ростмомент при возделывании сельскохозяйственных культур : рекомендации / В.В. Скорина [и др.]. – Горки : БГСХА, 2015. – 33 с.
7. Минеев, В.Г. Практикум по агрохимии / В.Г. Минеев [и др.]. – М. : МГУ, 1989. – С. 56–66.

Цитотоксическая активность ацетоновых экстрактов из лишайников в отношении линии кератиноцитов человека HaCAT

О.М. ХРАМЧЕНКОВА¹, М.В. МАТВЕЕНКОВ²

С помощью МТТ-теста оценена чувствительность стабильной клеточной линии кератиноцитов человека (HaCAT) к ацетоновым экстрактам из лишайников *Hypogymnia physodes*, *Evernia prunastri*, *Ramalina pollinaria* и *Cladonia arbuscula*. Установлено, что ацетоновые экстракты из *Hypogymnia physodes*, *Evernia prunastri* и *Cladonia arbuscula* токсичны для культуры клеток кератиноцитов человека. Экстракт из *Ramalina pollinaria* не токсичен для клеток HaCAT. Наиболее чувствительны клетки кератиноцитов человека к экстракту из *Cladonia arbuscula* и *Evernia prunastri*, наименее чувствительны – к экстракту из *Ramalina pollinaria*.

Ключевые слова: экстракты из лишайников; культуры клеток; жизнеспособность; полунингибирующая концентрация (IC₅₀); цитотоксичность.

Using the MTT test, the sensitivity of the stable human keratinocyte cell line (HaCAT) to acetone extracts from lichens *Hypogymnia physodes*, *Evernia prunastri*, *Ramalina pollinaria* and *Cladonia arbuscula* was evaluated. It has been established that acetone extracts from *Hypogymnia physodes*, *Evernia prunastri* and *Cladonia arbuscula* are toxic to human keratinocyte cell culture. The extract from *Ramalina pollinaria* is not toxic to HaCAT cells. The most sensitive cells are human keratinocytes to the extract from *Cladonia arbuscula* and *Evernia prunastri*, the least sensitive to the extract from *Ramalina pollinaria*.

Keywords: lichen extracts; cell lines; viability; half maximal inhibitory concentrations (IC₅₀); cytotoxicity.

Введение. Широкий скрининг биологической активности лишайниковых веществ позволил выявить различные пути их использования в различных областях, в том числе – в медицине. Исследования многих лабораторий во всем мире посвящены поиску возможностей практического применения как различных экстрактов из лишайников, так и выделенных из них вторичных метаболитов [1]–[3]. Индивидуальные лишайниковые вещества и полученные различным путем экстракты из лишайников никоим образом не могут заменить друг друга, так как их свойства существенно отличаются. В настоящее время получено множество экспериментальных данных, свидетельствующих о противоопухолевой, противовоспалительной, антиоксидантной и антибактериальной активности лишайниковых веществ, сводка которых представлена, например, в обзорах [4]–[7]. Среди опубликованных результатов исследований не редкими являются данные об аллергенных и цитотоксических свойствах лишайниковых веществ, в том числе – в отношении стабильных неопухолевых клеточных линий. Так, исследования, проведенные в Финляндии и Скандинавии [8]–[10], зарегистрировали немногочисленные положительные реакции в патч-тестах на косметические средства, содержащие экстракт лишайника *Evernia prunastri*, а также на собственно экстракт и некоторые входящие в его состав вещества. Существуют данные об аллергенных дерматитах у сборщиков лишайников рода *Cladonia* [11], однако, согласно тесту FCA, биомасса того же рода лишайников охарактеризована как умеренный раздражитель [12].

Кератиноциты – основные клетки эпидермиса кожи человека, составляющие около 90 % всех клеток эпидермиса. Они содержатся в базальном, шиповатом, зернистом, блестящем, роговом слоях эпидермиса. На данный момент существуют весьма разрозненные и сильно различающиеся данные (в силу применения различных методик и клеточных линий), описывающие воздействие отдельных лишайниковых веществ (атранорин, усниновая, леканоровая и другие кислоты) и экстрактов из лишайников родов *Usnea*, *Cladonia*, *Evernia* и других на линию кератиноцитов человека (HaCAT) и эпителиальную линию (Vero) [13]–[16]. Линия HaCAT зарекомендовала себя как валидная модель эпидермального слоя кожи человека при тестировании различного рода веществ [17]. Более того, образуя внешний роговой

слой и накапливая произведенный меланоцитами меланин, данные клетки являются эффективным физическим барьером, защищающим организм от воздействия внешних негативных факторов, повреждения которого может вызвать ряд нежелательных эффектов [18]. В связи с этим данная линия представляется наиболее пригодной при первичном скрининге дерматоксических свойств субстанций, выделенных из лишайников.

Настоящее исследование посвящено скринингу цитотоксического действия ацетоновых экстрактов из четырех наиболее распространенных лишайников юго-востока Беларуси на культуру клеток HaCAT.

Методы исследований. *Получение экстрактов вторичных метаболитов лишайников.* Для исследования были выбраны виды лишайников, часто встречающиеся на юго-востоке Беларуси, с описанным составом вторичных метаболитов, два из которых являются стандартными при аналитическом определении лишайниковых веществ [19]–[22] – *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., *Evernia prunastri* (L.) Ach., *Ramalina pollinaria* (Westr.) Ach. и *Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot. Биомассу лишайников отбирали на территории ГЛХУ «Гомельский лесхоз» на типичных для каждого вида субстратах. Слоевища эпифитных видов (*Hypogymnia physodes*, *Evernia prunastri* и *Ramalina pollinaria*) отбирали вместе с фрагментом субстрата (корки сосны обыкновенной, березы повислой и дуба черешчатого, соответственно); эпигейный вид *Cladonia arbuscula* собирали на почве в сухом средневозрастном сосняке. Массу лишайников отделяли от субстрата, у *Cladonia arbuscula* – отбрасывали нижнюю часть подециев, – около 5 мм, сушили до воздушно-сухого состояния, измельчали. Биомассу лишайников экстрагировали ацетоном в аппарате Сокслета, полноту экстракции контролировали стандартным способом [23]. Растворитель удаляли с помощью ротационного испарителя. Выход экстрактов в процентах воздушно-сухой массы лишайника составил: экстракт 1 – *Hypogymnia physodes* – $12,8 \pm 0,49$; экстракт 2 – *Evernia prunastri* – $11,5 \pm 0,57$; экстракт 3 – *Ramalina pollinaria* – $11,3 \pm 0,56$; экстракт 4 – *Cladonia arbuscula* – $3,7 \pm 0,21$. Сухие экстракты хранили при комнатной температуре. Присвоенная экстрактам нумерация в настоящей работе сохраняется при изложении экспериментальных данных.

Подготовка стабильных клеточных линий. Использовали эпителиальные клетки человека линии HaCAT (кератиноциты). Замороженные при минус 80°C образцы клеток размораживали в стакане с водой (37°C). Содержимое пробирки ресуспендировали, переносили в стерильные полипропиленовые пробирки (15 мл), содержащие 10 мл полной инкубационной среды (DMEM/F-12, 11039 GIBCO; 100 Ед/мл пенициллин; 100 мкг/мл стрептомицин; 0,25 мкг/мл амфотерицин-В; 10 % инактивированной эмбриональной телячьей сыворотки, HiCloneInc) [24]. После 5 мин центрифугирования (4°C, 200 g) жидкую фазу отбрасывали для удаления криоконсерванта, клеточный осадок ресуспендировали в 5 мл полной инкубационной среды и использовали для посева, концентрацию клеток определяли в камере Горяева. Культивирование производилось согласно рекомендациям американской коллекции типовых культур (ATCC) [24].

Инкубация клеток с экстрактами. В ячейки 96-луночного планшета вносили 100 мкл клеточной суспензии (5 тыс. клеток), инкубировали 24 часа при 37°C и 5 % CO₂. Навеску экстракта из лишайника массой 40 мг растворяли в 2 мл диметилсульфоксида (ДМСО), центрифугировали (21000 g, 5 мин.), после чего 40 мкл раствора вносили в 2 мл полной инкубационной среды. Серийное разведение экстракта раствором инкубационной среды позволило получить градиент концентраций (мкг/мл): 400; 200; 100; 50; 25; 12,5; 6,25; 3,125 и 1,5625. Полученные растворы экстракта в количестве 100 мкл вносили в лунки планшета, содержащие 100 мкл питательной среды. Конечный градиент концентраций экстрактов из лишайников составил: 200; 100; 50; 25; 12,5; 6,25; 3,125; 1,5625 и 0,78125 (мкг/мл), наиболее высокая концентрация ДМСО (1 %) была в разведении 200 мкг/мл. Контроль выращивали в идентичной питательной среде без добавления экстрактов из лишайников. Время инкубации клеток с экстрактами из лишайников – 48 часов, суммарное время культивирования клеток в планшете – 72 часа. Инкубация проводилась в соответствии с рекомендацией протокола [25].

Определение метаболической активности клеток проводили с использованием МТТ-теста на скорость восстановления 3-[4,5-диметилтиазол-2-ил]-2,5-дифенилтетразолия бромид (МТТ, M5655, Sigma) [26]. После инкубации клеток с испытуемым экстрактом из лишайников питатель-

ную среду удаляли, дважды промывали ячейки фосфатно-солевым буфером, добавляли раствор питательной среды, содержащий 0,05 % МТТ, после чего два часа инкубировали клетки при 37°C и 5 % CO₂. Инкубационную среду удаляли, вносили 200 мкл смеси этанол: ДМСО (1:1), содержащее перемешивали до полного растворения кристаллов формазана. Оптическую плотность раствора формазана измеряли при $\lambda = 570$ нм с использованием планшетного спектрофотометра TecanSafire II (США), для нормализации данных применяли измерения при $\lambda = 700$ нм.

Жизнеспособность клеток вычисляли по формуле:

$$\text{Жизнеспособность} = \left(\frac{OD_{570} \text{ контрольных лунок}}{OD_{570} \text{ опытной лунки}} \right) \times 100 \%;$$

где OD_{570} – оптическая плотность раствора формазана, измеренная при $\lambda = 570$ нм.

Анализ результатов исследования производили с помощью программных продуктов GraphPadPrismTrial (Version 5.02) и MicrosoftExcel.

Результаты и их обсуждение. В качестве критерия цитотоксичности экстрактов из лишайников использовали данные Национального института онкологии США (National cancer institute, NCI), согласно которым сырой экстракт считается активным при $IC_{50} < 30$ мкг/мл [27], [28]. Установлено, что ацетоновые экстракты из анализируемых видов лишайников токсичны для культуры кератиноцитов человека, за исключением экстракта 3 (таблица 1).

Таблица 1 – Цитотоксический эффект экстрактов из лишайников в отношении клеток линии HaCAT

Номер экстракта	В микрограммах на миллилитр		
	IC_{10}^*	IC_{50}	IC_{90}^*
1	18,6	$19,7 \pm 4,53$	20,8
2	9,2	$20,2 \pm 0,97$	31,6
3	67,4	$71,9 \pm 3,15$	75,6
4	2,3	$11,2 \pm 1,10$	20,4

Примечание: * – значения IC_{10} и IC_{90} вычислены по уравнениям аппроксимации динамики влияния концентрации экстрактов из лишайников на жизнеспособность культур клеток.

Диапазон цитотоксического действия экстрактов из лишайников весьма широк ($IC_{50} = 11\text{--}72$ мкг/мл). Наиболее токсичным для культуры клеток кератиноцитов был экстракт 4. Среднетоксичными были экстракты 1 и 2, наименее токсичным оказался экстракт 3. При сравнении полутоксичных доз в МТТ-тесте для известных раздражителей с дозами, полученными для экстрактов из лишайников, можно также сделать некоторые выводы относительно их дерматоксического действия вне модели *in vitro*. Установлена корреляция значений IC_{50} в цитотоксических тестах на культуре HaCAT и величин оценки эффекта действия вещества на кожу в тесте Дрейза [29]–[33]. Так, доза полуингибирования жизнеспособности кератиноцитов, установленная, например, для известного раздражителя, использующегося в косметике – лаурилсульфата (в тесте Дрейза ему присвоен ранг умеренного раздражителя [34]) – составляет 35 ± 5 мкг/мл. Экстракты 1 и 2, обладающие среднетоксичным действием, имели несколько более низкий показатель IC_{50} . Наименее токсичным оказался экстракт 3 – его полуживотная доза в два раза выше таковой у модельного вещества. Наиболее токсичным был экстракт 4 – его IC_{50} в три раза ниже такового у модельного вещества.

По показателю 10-процентного ингибирования жизнеспособности культур клеток можно выделить наибольшую чувствительность кератиноцитов к экстрактам 4 и 2, наименьшую – к экстракту 3.

Зависимости жизнеспособности клеток культуры HaCAT от концентрации экстрактов удовлетворительно описываются S-образными кривыми с коэффициентами аппроксимации около 0,9 (рисунок 1).

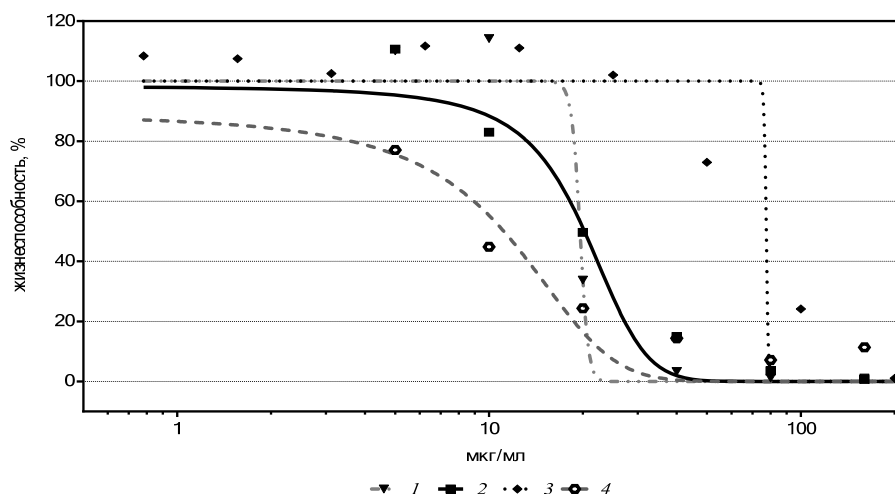


Рисунок 1 – Влияние концентрации экстрактов из лишайников на жизнеспособность клеток кератиноцитов человека

Рост концентрации экстрактов 1 и 3 избирательно влиял на гибель клеток культуры HaCAT. Здесь можно видеть двухфазное действие экстрактов: первая фаза (1-10 мкг/мл) характеризуется умеренной стимуляцией клеток, за ней идет фаза ингибирования роста (10-70 мкг/мл) вплоть до абсолютно летальных доз ($70 < \text{мкг/мл}$). Количественно это выразилось в близких значениях IC_{10} , IC_{50} , IC_{90} для экстрактов 1 и 3. Величины IC_{10} и IC_{90} экстракта 1 отличались от величины IC_{50} на $5,3 \div 5,9 \%$; для экстракта 3 диапазон отличий величин IC_{10} и IC_{90} от величины IC_{50} составил $4,9 \div 6,7 \%$. Характер кривых жизнеспособности клеток HaCAT в условиях нарастания концентраций экстрактов 3 и 1 может свидетельствовать о накоплении или появлении при определенной концентрации некоего минорного компонента, вызывающего энергонезависимую гибель клетки (путь онкоза). В популяцию попадают хемотоксичные продукты, вызывающие обширные кластеры клеточной гибели [35].

Можно предположить также наличие у кератиноцитов специфичной мишени по отношению к веществам, выделяющимся из экстракта 4, так как при малых дозах достигается клеточный ответ, постепенно вызывающий полную гибель клеточной популяции. Наличие плавного перехода в кривой для экстрактов 4 и 2 может свидетельствовать о процессах апоптоза, которые происходят в отдельных клетках, причем доля таких клеток возрастает по мере градиентного увеличения концентрации экстракта и, следовательно, действующего агента (-ов).

На рисунке 2 представлены фотографии состояния популяций клеток HaCAT под действием экстрактов 1 и 2. Фотографии выполнены на стадии инкубации с МТТ.

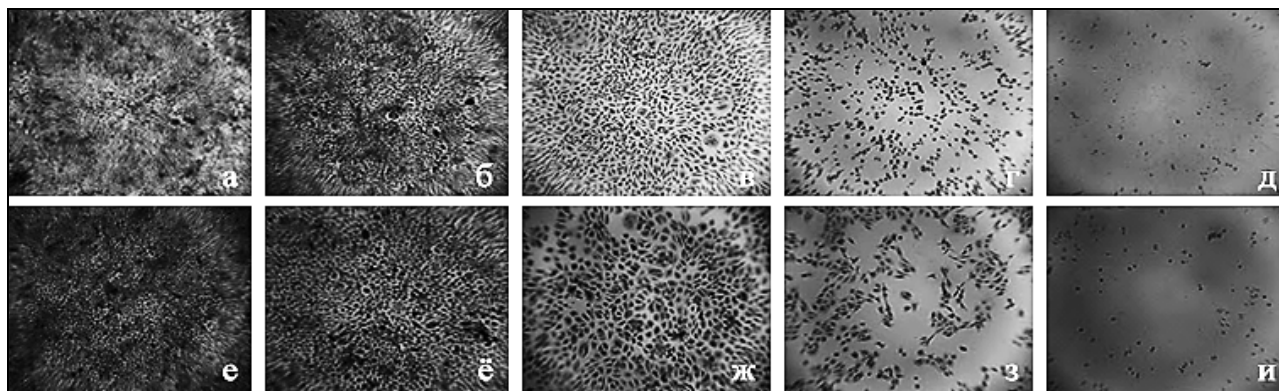


Рисунок 2 – Микрофотографии (кратность увеличения: $\times 4$) изменения состояния популяций клеток HaCAT, при действии экстракта 1 (а-д) и 2 (е-и); буквами обозначены соответственные дозы экстракта в питательной среде (а – контроль; б – 12,5 мкг/мл; в – 25 мкг/мл; г – 50 мкг/мл; д – 200 мкг/мл; е-и – аналогичный градиент концентраций)

Для экстракта 1 при концентрациях 12,5–25 мкг/мл наблюдается снижение плотности монослоя с образованием разбухших клеток (которые, вероятнее всего, претерпевают онкоз). Начиная с 50 мкг/мл (рисунок 2 г) выражен резкий переход (на графике он охарактеризован полным угнетением жизнеспособности клеточной линии), при котором в опытной лунке остаются видны лишь некоторые продукты деструкции клеток, практически исчезающие при концентрации 200 мкг/мл (рисунок 2 д). Схожее действие оказывает и экстракт 2. При концентрациях 12,5–25 мкг/мл так же наблюдается уменьшение монослоя, однако отсутствуют разбухшие клетки, вместо них можно увидеть, вероятно, апоптотические клетки в стадии пикноза. При концентрации 50 мкг/мл продолжается уменьшение количества живых клеток и увеличение количества апоптотических. При концентрации 200 мкг/мл можно видеть продукты деструкции клеток.

Заключение. Исследовали цитотоксическое действие ацетоновых экстрактов из лишайников *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., *Evernia prunastri* (L.) Ach., *Ramalina pollinaria* (Westr.) Ach. и *Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot. на культуру клеток кератиноцитов человека HaCAT. Установлено, что ацетоновые экстракты из *Hypogymnia physodes*, *Evernia prunastri* и *Cladonia arbuscula* токсичны для культуры клеток кератиноцитов человека. Экстракт из *Ramalina pollinaria* не токсичен для клеток HaCAT. Наиболее чувствительны клетки кератиноцитов человека к экстракту из *Cladonia arbuscula* и *Evernia prunastri*, наименее чувствительны – к экстракту из *Ramalina pollinaria*. Экстракт из *Ramalina pollinaria* может рассматриваться как наиболее перспективный при разработке субстанций для кожного применения у человека.

Литература

1. Recent advances in lichenology: in 2 vol. / ed. : D.K. Upreti [et al.]. – New Delhi : Springer, 2015. – Vol. 2. – XV, 265 p.
2. Ranković, B. Lichen secondary metabolites: bioactive properties and pharmaceutical potential / B. Ranković. – Cham : Springer International Publishing, 2015. – V, 202 p.
3. The multiple properties of some of the lichenized ascomycetes: biological activity and active metabolites / V. Shukla [et al.] // Plant adaptation strategies in changing environment. – 2017. – Ch. 8. – P. 201–234.
4. Shukla, V. Lichens as a potential natural source of bioactive compounds: a review / V. Shukla, G.P. Joshi, M.S. Rawat. – Netherlands : Springer: Phytochemistry Reviews, 2010. – Vol. 9. – № 2. – P. 303–314.
5. Secondary metabolites from cetrarioid lichens: chemotaxonomy, biological activities and pharmaceutical potential / M. Xu [et al.] // Phytomedicine. – 2016. – Vol. 23, № 5. – P. 441–459.
6. Boustie, J. Lichens – a promising source of bioactive secondary metabolites / J. Boustie, M. Grube. – Plant genetic resources. – 2005. – Vol. 3, № 2. – P. 273–287.
7. Shrestha, G. Lichens: a promising source of antibiotic and anticancer drugs / G. Shrestha, L.L.S. Clair. – Phytochemistry reviews. – 2013. – Vol. 12, № 1. – P. 229–244.
8. Johansen, J.D. Oak moss extracts in the diagnosis of fragrance contact allergy / J.D. Johansen, S. Heydorn, T. Menné. – Contact Dermatitis. – 2002. – T. 46, № 3. – P. 157–161.
9. The Scandinavian multicenter photopatch study 1980–1985 / P. Thune [et al.] // Photo-dermatology. – 1988. – T. 5, № 6. – C. 261–269.
10. Aalto-Korte, K. Occupational allergic contact dermatitis from lichens in present-day Finland / K. Aalto-Korte, A. Lauerma, K. Alanko. – Contact Dermatitis. – 2005. – T. 52, № 1. – C. 36–38.
11. Salo, H. Lichen picker's dermatitis (*Cladonia alpestris* (L) Rab.) / H. Salo, M. Hannuksela, B. Hausen. – Contact Dermatitis. – 1981. – T. 7, № 1. – C. 9–13.
12. Hausen, B.M. An investigation of the allergenic constituents of *Cladonia stellaris* (Opiz) Pous & Vežda ('silver moss', 'reindeer moss' or 'reindeer lichen') / B.M. Hausen, L. Emde, V. Marks. – Contact dermatitis. – 1993. – T. 28, № 2. – C. 70–76.
13. Antiproliferative effects on tumour cells and promotion of keratinocyte wound healing by different lichen compounds / B. Burlando [et al.]. – Planta medica. – 2009. – T. 75, № 06. – C. 607–613.
14. Depsides as non-redox inhibitors of leukotriene B₄ biosynthesis and HaCaT cell growth, 2. Novel analogues of obtusatic acid / S.K. KC, K. Müller. – European journal of medicinal chemistry. – 2000. – T. 35, № 4. – C. 405–411.
15. Usnea barbata extract prevents ultraviolet-B induced prostaglandin E₂ synthesis and COX-2 expression in HaCaT keratinocytes / K. Engel [et al.]. – Journal of photochemistry and photobiology B: Biology. – 2007. – T. 89, № 1. – C. 9–14.

16. Cytotoxic activity of some lichen extracts on murine and human cancer cell lines / C. Bézivin [et al.]. – *Phytomedicine*. – 2003. – Т. 10, № 6–7. – С. 499–503.
17. Normal keratinization in a spontaneously immortalized aneuploid human keratinocyte cell line / P. Boukamp [et al.]. – *The Journal of cell biology*. – 1988. – Vol. 106, № 3. – P. 761–771.
18. Proksch, E. The skin: an indispensable barrier / E. Proksch, J.M. Brandner, J.M. Jensen – *Experimental dermatology*. – 2008. – Vol. 17, № 12. – P. 1063–1072.
19. Цуриков, А.Г. Лишайники юго-востока Беларуси (опыт лишеномониторинга) / А.Г. Цуриков. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2013. – 276 с.
20. Elix, J.A. A catalogue of standardized thin layer chromatographic data and biosynthetic relationships for lichen substances / J.A. Elix. – Canberra : Australian National University, 2014. – 330 p.
21. Huneck, S. Identification of lichen substances / S. Huneck, I. Yoshimura. – Berlin : Springer, 1996. – 493 p.
22. The lichens of Great Britain and Ireland: 2nd ed. / Eds. : C.W. Smith [et al.]. – London : British Lichen Society, 2009. – 700 p.
23. Воскресенский, П.И. Техника лабораторных работ / П.И. Воскресенский. – М. : Химия, 1973. – 717 с.
24. American type culture collection [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.atcc.org/>. – Access date : 09.01.2018.
25. Cell sensitivity assays: the MTT assay / J van Meerloo [et al.] // *Cancer cell culture: methods and protocols*. – New York : Human Pressa, 2011. – Ch. 20. – P. 237–245.
26. Berridge, M.V. Tetrazolium dyes as tools in cell biology: new insights into their cellular reduction / M.V. Berridge, P.M. Herst, A.S. Tan // *Biotechnology annual review*. – 2005. – Vol. 11. – P. 127–152.
27. Antioxidant, antimicrobial and antiproliferative activities of five lichen species / T. Mitrović [et al.] // *International journal of molecular sciences*. – 2011. – Vol. 12, № 8. – P. 5428–5448.
28. In vitro cytotoxic activity of Thai medicinal plants used traditionally to treat cancer / A. Itharat [et al.] // *J. Ethnopharmacol.* – 2004. – Vol. 90. – P. 33–38.
29. Use of XTT-assay to assess the cytotoxicity of different surfactants and metal salts in human keratinocytes (HaCaT). A feasible method for in vitro testing of skin irritants / A. Brosin [et al.]. – *Acta dermato-venereologica*. – 1997. – Т. 77, № 1. – С. 26–28.
30. Evaluation of eye and skin irritation of arginine-derivative surfactants using different in vitro endpoints as alternatives to the in vivo assays / V. Martinez [et al.]. – *Toxicology letters*. – 2006. – Т. 164, № 3. – С. 259–267.
31. Potential irritation of lysine derivative surfactants by hemolysis and HaCaT cell viability / L. Sanchez [et al.]. – *Toxicology letters*. – 2006. – Т. 161, № 1. – С. 53–60.
32. Discrimination of the irritancy potential of surfactants in vitro by two cytotoxicity assays using normal human keratinocytes, HaCaT cells and 3T3 mouse fibroblasts: correlation with in vivo data from a soap chamber assay / H.C. Korting [et al.]. – *Journal of dermatological science*. – 1994. – Т. 7, № 2. – С. 119–129.
33. Assessment of primary eye and skin irritants by in vitro cytotoxicity and phototoxicity models: an in vitro approach of new arginine-based surfactant-induced irritation / T. Benavides [et al.]. – *Toxicology*. – 2004. – Т. 197, № 3. – С. 229–237.
34. Initial validation of an in vitro test for predicting skin irritancy / P.A. Duffy [et al.]. – *Food and chemical toxicology*. – 1986. – Т. 24, № 6–7. – С. 517–518.
35. Elmore, S. Apoptosis: a review of programmed cell death / S. Elmore. – *Toxicologic pathology*. – 2007. – Vol. 35, № 4. – P. 495–516.
36. Schoop, V.M. Epidermal organization and differentiation of HaCaT keratinocytes in organotypic-coculture with human dermal fibroblasts / V.M. Schoop, N.E. Fusenig, N. Mirancea. – *Journal of investigative dermatology*. – 1999. – Vol. 112, № 3. – P. 343–353.

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

²Институт радиобиологии
НАН Беларуси

УДК 535.231.16:546.296(476.2+476.4+476.5)

Определение годовых эффективных доз облучения населения от радона на территории Гомельской, Могилевской и Витебской областей

Л.А. Чунихин¹, А.Л. ЧЕХОВСКИЙ², Д.Н. Дроздов²

Рассматривается проблема облучения населения естественным радиоактивным газом радоном и его дочерними продуктами распада. Оценка годовых эффективных доз на территории Гомельской, Могилевской и Витебской областей проведена по моделям МКРЗ и НКДАР ООН. Значения годовых эффективных доз для Гомельской области находятся в пределах 0,68–1,17 мЗв, среднее 0,86 мЗв (МКРЗ) и 1,09–1,90 мЗв, среднее 1,39 мЗв (НКДАР ООН), для Могилевской области в пределах 0,88–2,99 мЗв, среднее 1,58 мЗв (МКРЗ) и 1,43–4,86 мЗв, среднее 2,57 мЗв (НКДАР ООН), для Витебской области 0,96–3,11 мЗв, среднее 1,77 мЗв (МКРЗ) и 1,46–5,06 мЗв, среднее 2,86 мЗв (НКДАР ООН).

Ключевые слова: радон, дочерние продукты распада, объемная активность, эффективная доза, комплексный радоновый показатель.

The problem of irradiating the population with natural radioactive gas radon and its daughter products of decay is considered. Evaluation of annual effective doses in the Gomel, Mogilev and Vitebsk regions was carried out on models ICRP and UNSCEAR. According to these models values of annual effective doses for Gomel region are in range 0,68–1,17 mSv, average 0,86 mSv (ICRP) and 1,09–1,90 mSv, average 1,39 mSv (UNSCEAR), Mogilev region in range 0,88–2,99 mSv, average 1,58 mSv (ICRP) and 1,43–4,86 mSv, average 2,57 mSv (UNSCEAR), Vitebsk region in range 0,96–3,11 mSv, average 1,77 mSv (ICRP) and 1,46–5,06 mSv, average 2,86 mSv (UNSCEAR).

Keywords: radon, decay daughter products, volume activity, effective dose, complex radon index.

Введение. Масштабные исследования различных мировых организаций напрямую указывают на важность и актуальность «радоновой проблемы». Так, согласно оценке Научного комитета по действию атомной радиации (НКДАР) ООН, радон и его дочерних продуктов распада (ДПР) определяют примерно 66 % годовой индивидуальной эффективной дозы облучения, получаемой населением от земных источников радиации и примерно половину дозы от всех источников радиации [1]. Наиболее значимым и распространенным дозовым фактором является воздействие радона, содержащегося в воздухе помещений жилых и общественных зданий, и на рабочих местах. Радон, являясь компонентом воздуха, попадает в легкие человека при дыхании. По данным ВОЗ, воздействие радона повышает риск возникновения и развития рака легкого [2], вследствие воздействия высокоэнергетического α -излучения при распаде радона и его ДПР на высокочувствительные клетки дыхательной системы. По оценкам экспертов Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) облучение населения за счет радона обуславливает до 15 % общего количества заболеваний раком легкого [3].

Воздействие на человека радона и его ДПР представляет определенные сложности для проведения дозиметрических оценок. Данное воздействие относится к внутреннему облучению и сложно поддается индивидуальному радиационному мониторингу, легко проводимому в случае внешнего радиационного облучения. Вследствие малого периода полураспада ДПР радона мониторинг доз облучения от радона не может быть выполнен стандартными методами, применяемыми при мониторинге внутренних доз облучения. При ингаляции ДПР радона происходит облучение исключительно тканей респираторного тракта, в то время как на остальные органы и ткани человека радиационное воздействие пренебрежимо мало. При этом основное облучение осуществляется короткопробежными, сильноионизирующими α -частицами. Перечисленные факторы приводят к тому, что все дозиметрические оценки облучения человека за счет ингаляционного поступления ДПР радона производятся исключительно косвенными методами.

Необходимо подчеркнуть, что дозы облучения от радона также важны при сравнительном анализе последствий радиационных аварий или штатной деятельности предприятий ядерно-топливного цикла. Это особенно актуально для территории Беларуси в связи с аварией на Чернобыльской АЭС и предстоящим введением в эксплуатацию первой для Республики Беларусь атомной электростанции. Такой учет позволяет определить приоритеты реабили-

литационных мероприятий, направленных на снижение радиационных нагрузок на население, и позволяет уточнить существующую радиационную обстановку с учетом всех источников радиационного воздействия.

Целью настоящей работы являлось определение годовых эффективных доз облучения населения от радона и его ДПР на территории Гомельской, Могилевской и Витебской областей.

Материалы и методика исследований. Определение средних годовых эффективных доз облучения от радона и его ДПР проводилось через объемную активность (ОА) радона. В настоящей работе использованы результаты измерения ОА радона в жилых зданиях, проведенных ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» (г. Минск) в течение 2005–2015 гг. на территории Гомельской, Могилевской и Витебской областей [4], [5]. Исследования выполнены согласно методике МВИ. МН. 1111-99: «Методика определения объемной активности радона в воздухе жилых и производственных помещений с использованием интегральных радонметров на основе твердотельных трековых детекторов альфа-частиц» [6]. Также использовались данные ОА радона, полученные по методу комплексного радонового показателя (КРП) [7]–[10]. В работах [8], [11], [12] показано, что экспериментальные данные ОА и данные, рассчитанные по модели КРП, согласуются ($F_{\text{эмп}} < F_{\text{крит}}$ при $p > 0,05$) и могут использоваться совместно.

Для оценки средних эффективных доз облучения населения от ингаляционного поступления радона и его ДПР использовались две модели перехода от ОА радона к эффективной дозе: модель МКРЗ и модель НКДАР ООН. В Публикации № 65 МКРЗ предложено использовать прямое сравнение ущерба, связанного с единицей эффективной дозы при внешнем облучении, с единицей экспозиции радона. Значение дозового коэффициента, рассчитанного по Публикации № 65 МКРЗ, составляет $0,017 \text{ мЗв год}^{-1}/\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ ОА радона или $6,1 \text{ нЗв}\cdot\text{ч}^{-1}/\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ ЭРОА радона на 7000 ч пребывания в жилище [13].

В последствии НКДАР ООН предложена аналогичная модель, в которой была сохранена последовательность расчета перехода от ОА к эффективной дозе. В этой модели учитывалась ОА радона, увеличен коэффициент равновесия ($F = 0,5$), введена доля времени нахождения в помещении (0,8) и на открытом воздухе (0,2) на 8800 ч/год. В результате дозовый коэффициент этой модели увеличился до $0,026 \text{ мЗв}\cdot\text{год}^{-1}/\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ ОА радона или $9,0 \text{ нЗв}\cdot\text{ч}^{-1}/\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ ЭРОА радона на 8800 ч [1].

В инструкции [14], являющейся нормативным документом для Республики Беларусь при оценке индивидуальных эффективных доз облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения, значение дозового коэффициента принято равным $9\cdot 10^{-6} \text{ мЗв}\cdot\text{ч}^{-1}/\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$, которое соответствует рекомендациям НКДАР-2000 [1]. Однако модель, предложенная в Публикации № 65 МКРЗ [13], до сих пор не потеряла актуальности и активно используется в научных исследованиях. В Публикации МКРЗ № 115 [3] не было предложено альтернативы данной модели. Обе модели могут использоваться для расчета эффективных доз облучения от радона и его ДПР.

Результаты исследований и их обсуждение. В качестве структурной единицы в исследовании использовалось административно-территориальное деление области на районы, которое позволяет учесть разнообразие факторов, обуславливающих формирование эффективной дозы облучения, и имеет достаточную статистическую мощность результатов измерений. Средние районные значения ОА радона, полученные по результатам исследований [4], [5], были пересчитаны в среднегодовые эффективные дозы с учетом дозовых коэффициентов представленных моделей. Средние годовые эффективные дозы облучения населения от радона и его ДПР на территории Гомельской области, рассчитанные по моделям МКРЗ и НКДАР ООН, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Средние годовые эффективные дозы облучения населения от радона и его ДПР на территории Гомельской области

Район / Область	Модель МКРЗ, мЗв	Модель НКДАР ООН, мЗв
Брагинский	0,68	1,09
Буда-Кошелевский	0,68	1,09
Ветковский	1,06	1,73
Гомельский	1,00	1,63
Добрушский	0,78	1,26

Окончание таблицы 1

Ельский	0,84	1,36
Житковичский	0,74	1,20
Жлобинский	0,70	1,13
Калинковичский	0,98	1,60
Кормянский	0,84	1,36
Лельчицкий	0,76	1,23
Лоевский	0,68	1,10
Мозырский	1,06	1,73
Наровлянский	1,02	1,66
Октябрьский	1,08	1,76
Петриковский	0,72	1,16
Речицкий	0,72	1,16
Рогачевский	1,17	1,90
Светлогорский	0,76	1,23
Хойникский	0,78	1,26
Чечерский	1,00	1,63

Из таблицы 1 видно, что на территории Гомельской области регистрируются значения годовых эффективных доз облучения населения радоном и его ДПР в пределах 0,68-1,17 мЗв, в среднем 0,86 мЗв по модели МКРЗ и в пределах 1,09–1,90 мЗв, в среднем 1,39 мЗв по модели НКДАР ООН. Учитывая последствия аварии на Чернобыльской АЭС и загрязнение техногенными радионуклидами Гомельской области, определение и уточнение эффективных доз от облучения радоном, как основного компонента естественного радиационного фона, имеет важное научное и практическое значение.

Расчет эффективных доз облучения проводился аналогичным образом для Могилевской области. Средние годовые эффективные дозы облучения населения от радона и его ДПР на территории Могилевской области представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Средние годовые эффективные дозы облучения населения от радона и его ДПР на территории Могилевской области

Район / Область	Модель МКРЗ, мЗв	Модель НКДАР ООН, мЗв
Бельничский	1,74	2,83
Бобруйский	0,88	1,43
Быховский	1,37	2,23
Глуцкий	1,39	2,26
Горецкий	2,64	4,29
Дрибинский	1,43	2,33
Кировский	1,23	2,00
Климовичский	1,23	2,00
Кличевский	1,23	2,00
Краснопольский	1,11	1,80
Кричевский	2,03	3,29
Круглянский	1,64	2,66
Костюковичский	1,19	1,93
Могилевский	2,21	3,59
Мстиславский	1,68	2,73
Осиповичский	1,29	2,10
Славгородский	1,31	2,13
Хотимский	1,54	2,49
Чаусский	1,35	2,20
Чериковский	1,74	2,83
Шкловский	2,99	4,86

Из таблицы 2 видно, что на территории Могилевской области регистрируются значения годовых эффективных доз облучения населения радоном и его ДПР в пределах 0,88–2,99 мЗв, в среднем 1,58 мЗв по модели МКРЗ и в пределах 1,43–4,86 мЗв, в среднем 2,57 мЗв по модели НКДАР ООН. Необходимо отметить и постепенное увеличение годовой эффективной дозы облучения от радона и его ДПР с юго-запада, юга области к северу. Это обусловлено спецификой изменения экологических и геологических факторов, оказывающих влияние на ОА радона [7]–[9]. При этом районы Могилевской области, наиболее пострадавшие от аварии на Чернобыльской АЭС (Быховский, Славгородский, Чериковский, Красно-

польский, Костюковичский), характеризуются годовыми эффективными дозами от радона и его ДПР несколько ниже среднего. С другой стороны, на севере области определяются высокие значения годовых эффективных доз облучения от радона, в особенности на территории Горецкого: 2,64 мЗв (МКРЗ) и 4,29 мЗв (НКДАР ООН) и Шкловского 2,99 мЗв (МКРЗ) и 4,86 мЗв (НКДАР ООН) районов. Таким образом, для данных районов характерно превышение средней годовой эффективной дозы облучения от радона и его ДПР: в 1,7 раза для Горецкого и в 1,9 раз для Шкловского района по сравнению со средним значением по области.

Согласно моделям МКРЗ и НКДАР ООН проведен расчет средних годовых эффективных доз облучения населения от радона для Витебской области. Средние годовые эффективные дозы облучения населения от радона и его ДПР на территории Витебской области представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Средние годовые эффективные дозы облучения населения от радона и его ДПР на территории Витебской области

Район / Область	Модель МКРЗ, мЗв/год	Модель НКДАР ООН, мЗв
Бешенковичский	0,96	1,46
Браславский	1,88	3,06
Верхнедвинский	1,39	2,26
Витебский	1,55	2,53
Глубокский	2,68	4,36
Городокский	1,15	1,86
Докшицкий	1,20	1,96
Дубровенский	1,11	1,80
Лепельский	1,72	2,79
Лиозненский	1,70	2,76
Миорский	1,90	3,09
Оршанский	1,51	2,46
Полоцкий	1,39	2,26
Поставский	1,78	2,89
Россонский	2,19	3,56
Сенненский	1,84	2,99
Толочинский	2,44	3,96
Ушачский	1,92	3,13
Чашникский	1,58	2,56
Шарковщинский	3,11	5,06
Шумилинский	2,07	3,36

Из таблицы 3 видно, что на территории Витебской области регистрируются значения годовых эффективных доз облучения радоном и его ДПР в пределах 0,96–3,11 мЗв, в среднем 1,77 мЗв по модели МКРЗ и в пределах 1,46–5,06 мЗв, в среднем 2,86 мЗв по модели НКДАР ООН. Характерной особенностью Витебской области является изменение значений средних годовых эффективных доз, обусловленных радоном и его ДПР, в широких пределах: от 0,96 мЗв (МКРЗ) и 1,46 (НКДАР ООН) в Бешенковичском районе до 3,11 мЗв (МКРЗ) и 5,06 (НКДАР ООН) в Шарковщинском районе. При этом отсутствует тенденция к закономерному изменению значений средних годовых эффективных доз с севера на юг (как, например, в Могилевской области) или с запада на восток. В целом, районы со значениями годовых эффективных доз выше средних располагаются хаотично, и только в западной части области наблюдается группа районов (Шарковщинский, Глубокский, Миорский, Ушачский) граничащих между собой и формирующих потенциальную зону радоноопасности.

Особый интерес вызывает тот факт, что Витебская область является наименее пострадавшей областью от аварии на Чернобыльской АЭС, при этом значения средних годовых эффективных доз облучения от радона и его ДПР являются одними из наибольших на территории Республики Беларусь.

Заключение. Таким образом, согласно моделям МКРЗ и НКДАР ООН значения средних годовых эффективных доз облучения населения от радона и его ДПР для Гомельской области находятся в пределах 0,68–1,17 мЗв (МКРЗ) и 1,09–1,90 мЗв (НКДАР ООН), для Могилевской области в пределах 0,88–2,99 мЗв (МКРЗ) и 1,43–4,86 мЗв (НКДАР ООН), для Витебской области 0,96–

3,11 мЗв (МКРЗ) и 1,46–5,06 мЗв (НКДАР ООН). В целом, средние значения годовых эффективных доз на территории Витебской области 1,77 мЗв (МКРЗ) и 2,86 (НКДАР ООН), что несколько выше значений Могилевской области 1,58 мЗв (МКРЗ) и 2,57 мЗв (НКДАР ООН), и значительно выше, чем на Гомельской области 0,86 мЗв (МКРЗ) и 1,39 мЗв (НКДАР ООН). Учитывая последствия аварии на Чернобыльской АЭС и загрязнение техногенными радионуклидами значительной части территории Республики Беларусь, определение и уточнение средних годовых эффективных доз от облучения радона и его ДПР имеет важное научное и практическое значение. Такие исследования необходимы как с целью расчета дозы облучения, получаемой населением от всех источников (естественных и искусственных), так и с целью сопоставления доз, формируемых чернобыльскими радионуклидами, в сравнении с естественным радиационным фоном.

Литература

1. Источники и эффекты ионизирующего излучения. Отчет НКДАР ООН 2000 года Генеральной Ассамблеи с научными приложениями / под ред. Л.А. Ильна, С.П. Ярмоненко. – М. : РАДЭЖОН, 2002. – Т. 2. – 319 с.
2. Радон и рак: информационный бюллетень. – Женева : ВОЗ, 2005. – № 291. – 4 с.
3. Риск возникновения рака легкого при облучении радоном и продуктами его распада. Заявление 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.
4. Радон и дочерние продукты распада в воздухе зданий на территории Беларуси / А.К. Карабанов, А.В. Матвеев, Л.А. Чунихин, Д.Н. Дроздов, А.Л. Чеховский, И.В. Жук, О.И. Ярошевич, М.В. Конопелько // Природопользование. – 2015. – Вып. 27. – С. 49–53.
5. Карта радонового риска Беларуси / А.К. Карабанов, Л.А. Чунихин, Д.Н. Дроздов, А.Л. Чеховский, И.В. Жук, О.И. Ярошевич, М.В. Конопелько // Природные ресурсы. – 2015. – № 2. – С. 73–78.
6. Методические указания / Методика определения объемной активности радона в воздухе жилых и производственных помещений с использованием интегральных радонометров на основе твердотельных трековых детекторов альфа-частиц: МВИ. МН 1111-99. – Минск : Белорусский государственный институт метрологии, 2002. – 19 с.
7. Чеховский, А.Л. Определение критических зон радоноопасности по методу комплексного радонового показателя и картированию радонового риска / А.Л. Чеховский // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2015. – № 6 (93). – С. 46–52.
8. Чеховский, А.Л. Картирование территории Гомельской, Могилевской и Витебской областей по комплексному радоновому показателю и объемной активности радона в жилых зданиях / А.Л. Чеховский, Д.Н. Дроздов // Радиация и риск. – 2016. – Т. 25. – № 4. – С. 126–136.
9. Чеховский, А.Л. Картирование и оценка радоновой обстановки Гомельской, Могилевской и Витебской областей / А.Л. Чеховский, Л.А. Чунихин, Д.Н. Дроздов // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2015. – № 3 (90). – С. 71–76.
10. Чеховский, А.Л. Методический подход по оценке радоновой опасности территории / А.Л. Чеховский, Л.А. Чунихин, Д.Н. Дроздов // АНРИ. – 2017. – № 1 (88). – С. 50–54.
11. Чеховский, А.Л. Оценка радоноопасности некоторых населенных пунктов Лиозненского района / А.Л. Чеховский // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – 2017. – № 1 (17). – С. 93–99.
12. Чеховский, А.Л. Оценка радоновой опасности на примере некоторых населенных пунктов Лиозненского района Витебской области / А.Л. Чеховский // Вестнік Мазырскага дзяржаўнага педагагічнага ўніверсітэта імя І.П. Шамякіна. – 2017. – № 2 (50). – С. 50–57.
13. Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах / Публикация № 65 МКРЗ. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 78 с.
14. Оценка индивидуальных эффективных доз облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения. Инструкция 2.6.1.10-12-22-2006. – Минск : Минздрав Республики Беларусь, 2008. – 20 с.

¹Институт радиобиологии
НАН Беларуси

²Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины»

Особенности произрастания *Crataegus Ucrainica* (Rosaceae) в долине р. Десна (Мезинский НПП)

О.В. ШЕВЧИК, В.А. СОЛОМАХА

Исследованы экологические и ценоотические особенности популяции *Crataegus ucrainica* A. Pojark. в пределах Мезинского национального природного парка. Установлены особенности произрастания *C. ucrainica* на склонах коренного берега р. Десна на выходах материнских меловых водонепроницаемых пород. Описанное местообитание на сегодняшний день является крупнейшей северной популяцией боярышника украинского. Отображены направления сохранения обнаруженной популяции и охраны этого редкого вида, занесенного в «Международный Красный список».

Ключевые слова: *Crataegus ucrainica*, редкий вид, охрана, Мезинский НПП, Черниговская обл., Украина.

Ecological and cenotic features of the population of *Crataegus ucrainica* A. Pojark have been studied within the Mezinsky National Nature Park. Specific features of growth of *C. ucrainica* on the slopes of the aboriginal bank of the Desna River at the outcrops of the Cretaceous water resistant rocks have been established. The described habitat for today is the largest northern population of hawthorn of Ukraine. The direction of conservation of the detected population and protection of this rare species listed in the «International Red List» is shown.

Keywords: *Crataegus ucrainica*, rare species, protection, Mezyn National Natural Park, Chernihiv region, Ukraine.

Введение. Необходимым условием для обеспечения сохранности редкой компоненты флоры Украины является изучение особенностей распространения и экологии местообитаний редких видов. К недостаточно исследованным в этом аспекте можно отнести также *Crataegus ucrainica* A. Pojark. Ограниченность распространения и отсутствие полноценных локальных популяций определяют и стимулируют интерес к изучению этого вида.

Совершенство растений боярышника с двумя косточками в плодах, которые были собраны с территории Левобережной Лесостепи, рассматривалась после описания его А. Пожарковой [1] как стабильный вид в одном из самых сложных в таксономическом аспекте родов в семействе *Rosaceae* Juss и после [2]. В системе рода он относится к типичной секции *Crataegus* (*Oxyacanthae* Loud.) ряда *Ambigua* Pojark., объединяющий девять видов [3], [4]. Кристенсен синонимизирует *C. ucrainica* в *C. meyeri* Pojark. вместе с несколькими родственными с ним видами: *C. eriantha* Pojark. и крымскими видами: *C. stankovii* Kossykh, *C. taurica* Pojark. В этот же ряд отнесено *C. volgensis* Pojark. и *C. helenae* Gryn' & Klokov как синонимы *C. ambigua* subsp. *ambigua* A.K. Becker, хотя *C. helenae* от *C. ambigua* A.K. Becker отличается более густо опушенными гипантиями, а от *C. ucrainica* более мелкими листьями с мелкозубчатыми долями [2]. *Crataegus ambigua* subsp. *ambigua* приводится для южного берега Крыма и юга Украины.

По литературным данным *C. ucrainica* был распространен среди кустарников, на опушках и в светлых лиственных лесах, на склонах речных берегов и террас [1], [2], [3]. Первое масштабное обследование этого вида в составе большой популяции (до 3 га) на бортовой террасе р. Днепр в окрестностях г. Киева [5] отразило весьма специфические экологические и ценоотические особенности *Crataegus ucrainica*. Обследование соснового леса вблизи с. Быковня в течение 2016–2017 гг. на предмет наличия там этого вида дало ограниченный результат.

К сожалению, после постройки линии киевского метро (станции «Красный хутор» и «Лесная») от этой популяции осталось лишь несколько экземпляров *C. ucrainica*. В 2017 г. на месте, где ранее была зафиксирована популяция, найдены два рядом расположенных местопроизрастания. Первое – два дерева, одно из которых дало поросль от срезанного в кустарниковых зарослях в сосновом лесу, второе – одиночное на освещенном месте вблизи тропы, очень жизнеспособное, при высоте 1,3 м. дало обильный урожай плодов в 2017 г.

Также нами были проанализированы особенности распространения *C. ucrainica* в Левобережной Лесостепи Украины по гербарным материалам и литературным данным [6]. Несмотря на большое внимание к этому виду отечественных ботаников, проблема недостаточ-

ной изученности экологии, биоморфологии и распространения его в Украине остается. Исходя из внесения *C. ucrainica* единственного из равнинных видов Украины в список охраняемых видов [7], ему необходимо уделить значительно больше внимания.

Дополнительные поиски данного вида в Среднем Приднепровье позволили обнаружить и обследовать новую прогрессирующую популяцию *C. ucrainica* в Правобережной Лесостепи в устье р. Рось в окрестностях Каневского природного заповедника [8]. Здесь нами впервые отмечено наличие двух экземпляров *C. ucrainica* в пойме р. Днепр на территории заповедника на острове Шелестов, которые произрастают разрозненно. Первое – на сухом лугу в возвышенном месте в центральной части острова, второе – поблизости предыдущего местообитания на периферии аморфников под старым деревом *Populus alba* L. в снижении старичного происхождения. Оба дерева генеративные со сравнительно большей жизнеспособностью и урожаем плодов на втором дереве [9].

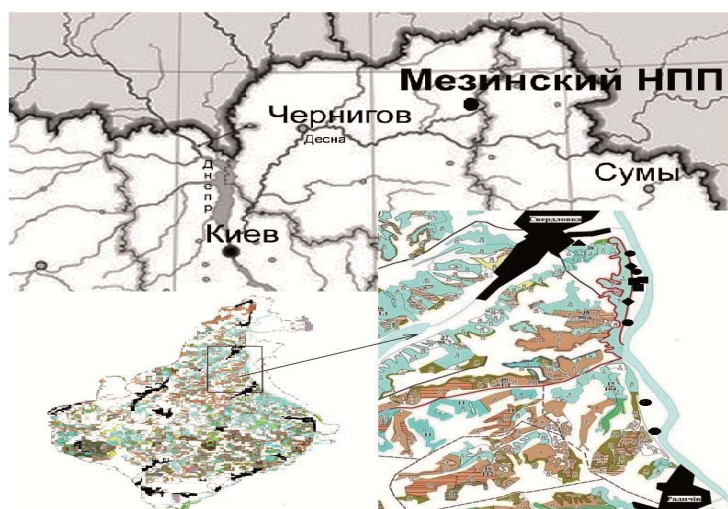
По данным Ю. Карпенко [10] на территории Мезинского парка отмечено произрастание *C. ucrainica*, но не приведены экологические и ценоотические особенности местообитаний. В материалах этой публикации мы предоставляем результаты изучения обнаруженной и обследованной популяции боярышника украинского в парке.

Материалы и методы исследований. Осенью 2016 г. нами проведены полевые маршрутные исследования ценопопуляций *C. ucrainica* на р. Десна в Мезинском НПП. Для их изучения были применены общепринятые полевые и камеральные методы.

Геоботанические описания выполнены в местообитаниях *C. ucrainica*, расположенных вдоль русла в пойме р. Десны и на ее утесе Пузырева гора. Названия видов приведены по чеклисту С.Л. Мосякин и Н.М. Федорончук [11]. Возрастное состояние найденных особей оценивали, руководствуясь методическими подходами, предложенными в литературе [12].

Гербарные образцы *C. ucrainica* из обнаруженных местонахождений переданы в гербарий Института ботаники им. Н.Г. Холодного НАН Украины (KW), гербарий Киевского национального университета имени Тараса Шевченко (KWU) и в фонды Каневского природного заповедника.

Результаты исследований и их обсуждение. Боярышник украинский обнаружен на участке поймы в пределах прибрежной полосы правого берега р. Десна на территории Мезинского НПП, где встречается одиночно и небольшими группами по 2–4 особи. Участок, где разрозненно растут особи *C. ucrainica*, простирается вдоль поймы на 4,5 км площадью около 4,5 га между селами Деснянское и Радичев. Как оказалось, на сегодняшний день это самая большая по площади популяция, к тому же расположена значительно севернее от других известных местообитаний (рисунок 1).



Условные обозначения: ● – луговые группировки с участием *C. ucrainica* между правым и левым коренным берегом р. Десна в пределах выпасаемого луга; ■ – утес Пузырева гора, склоны и вершина; ▲ – опушки ольшаника на берегу р. Хвостинка; ◆ – крутые, недостижимые для выпаса склоны правого коренного берега р. Десна, граничащие с опушкой смешанного леса

Рисунок 1 – Распространение популяции *C. ucrainica* в Мезинском НПП

По геоботаническому районированию [13] территория относится к Европейской широколиственно-лесной области, Восточной провинции, Левобережнополесского округа дубово-сосновых, дубовых, сосновых лесов, заливных лугов и эвтрофных болот. Территория НПП Мезинский находится в пределах Понорницкого лессового острова, крупнейшего вдоль р. Десны в пределах Украины. Это место относится к Новгород-Северскому физико-географическому району физико-географической области Новгород-Северского Полесья [14]. Особенностью этой территории является залегания меловых, палеогеновых и антропогеновых пород выше местного базиса эрозии, расчленения их речными долинами и выходы на донную поверхность. Большинство обнаруженных нами особей боярышника растут здесь на крутых (до 30°) задернованных склонах восточной экспозиции, сложенных перемешанными делювиальными отложениями указанных пород. Повсеместно в местах произрастания отдельных особей *C. ucrainica* на глубине от 30 до 50 см, а также в слое самого гумусного горизонта, встречаются включения материнских пород, представленные темно-серым мергелем, известняковыми глауконитовыми песками, белым мелом, зелеными глауконитовыми песками, желто-бурыми моренными суглинками.

Сама поверхность почвенного горизонта наиболее богата на фракцию антропогеновых лессовидных суглинков, попадающих сюда с привершинных участков склонов. Цокольной основой обследованного нами склона служит весь упомянутый выше профиль пород различного геологического возраста. Очевидно, отложения белого мела здесь служат местными водоупорными горизонтами, где на выходах их монолитных пластов дренируются размещенные выше их водоносные горизонты палеогеновых песчаников. В частности, одним из таких участков является подножие урочища Пузырева гора.

На территории парка преобладают зрелые широколиственные леса с преобладанием *Tilia cordata* Mill. и *Fraxinus excelsior* L., а также молодые лесопосадки в возрасте 30–60 лет. Вдоль правого коренного берега искусственные противозерозионные насаждения различного состава максимально приближены к естественным. Луга на правом берегу сосредоточены главным образом в болотистых долинах притоков р. Десна. Сухопутные луга располагаются на склонах правого коренного берега. Луга используются для выпаса скота. Левобережная часть парка более заболоченная.

Вдоль всего маршрута нами было обнаружено около 40 особей боярышника украинского со стабильными морфологическими признаками, характерными для данного вида. Все особи генеративного возраста имеют плоды с двумя косточками, соответствующее опушение листовой пластинки, черешка и молодых побегов. Также были найдены разрозненные локусы с экземплярами особей догенеративного возраста.

В этом местонахождении особи *C. ucrainica* произрастают в разных экологических и ценологических условиях. Довольно информативны легенды к геоботаническим описаниям, выполненные одним из авторов публикации (О.В. Шевчик). Исходя из интересной ценологической и особенно экологической информации, которая содержится в легендах, приводим их в полном объеме.

Первые четыре описания, где велись обследования – это опушечные участки, на которых ранее проводился регулярный выпас скота. Сейчас они значительно заросли насаждениями из *Robinia pseudoacacia* L. и лесами спонтанного происхождения с участием *Betula pendula* Roth. и других пород.

Из них первые три описания выполнены на утесе р. Десна (Пузырева гора). Первое при участии одной генеративной особи *C. ucrainica* осуществлено в верхней части горы (денудационного останца лессовидных грунтов р. Десна) на опушках когда-то широколиственного леса на определенном этапе демутации с высоким участием *Corylus avellana* L. Второе и третье описания – это два рядом расположенных местопроизрастания *C. ucrainica* на крутом склоне утеса с березовым редколесьем, почвы на лессовидных суглинках с двумя особями *C. ucrainica* виргинильного и генеративного возраста и двумя виргинидами соответственно. По словам местных жителей – до 90-х гг. прошлого века проводился выпас скота, поэтому сейчас наблюдается демутация лесной растительности.

Четвертое описание выполнено в местообитании одной старой генеративной особи *C. ucrainica* на опушке среди типичных для Левобережного Полесья ольшанников на сниженном участке в 100 м от подножия склона, на восточном отдаленном подножии в долине, собственно на берегу р. Хвостинка.

Основным типом группировок с участием около 20 растений *C. ucrainica* (4 описания) являются обнаруженные на опушках широколиственного леса. Главным образом это экотон между поймой Десны и подножием склона, участки сильноэродированных, разбитых линейной эрозией склонов в приверхушечных участках. Большинство экземпляров исследованного вида растет вдоль берега на участках, где проводится выпас скота. Молодые, догенеративного возраста растения боярышника в местах, где выпас очень интенсивный, характеризовались наличием большого количества колючек и низкорослостью.

В несколько ином типе местообитаний в составе лугово-степных растительных сообществ (3 описания при произрастании около 10 растений) встречались единичные экземпляры *C. ucrainica* разных возрастных состояний. Вероятно, типичным способом распространения семян боярышника является эндозоохория. Чаще всего встречаются особи генеративного и виргинильного состояния в самых крутых местах, недоступных для выпаса. Изредка встречались имматуры. Особи начальных возрастных состояний встречаются у подножия склонов интенсивно выпасаемого луга. В таких стациях происходит активное восстановление *C. ucrainica*. Особи такого возрастного состояния в этих условиях имеют внешний вид кустарников саванны. В частности, им характерно присутствие большого количества шипов, что защищает их от поедания скотом. В период созревания и осыпания плодов здесь выпасается скот, что способствует активному распространению семян.

Участки с высокорослыми генеративными особями *C. ucrainica* (3 растения) встречаются в редколесьях, представляющих начальный этап облесения крутых лессовых и меловых склонов.

В отличие от большинства из ныне описанных в литературе местообитаний *C. ucrainica*, приводимых для пойменных и боровотеррасных участков [5], [8], [9], [15], данная популяция локализуется на склоновых безлесных и редколесных участках коренного берега. В отдельных ее локалитетах проявляются признаки регенеративной активности этого вида, что свидетельствует о длительности существования этой популяции в прошлом и перспективе дальнейшего ее выживания при сохранении баланса действия факторов, стабилизирующих такого типа биотопы. Данная ландшафтная местность с описанной нами популяцией этого редкого вида, вероятно, представляет аналог динамического комплекса биотопов доисторического времени (вероятно, ранней голоцен) аналогичен тем первичным, в которых имел место оптимум развития, воспроизведение и распространение этого вида.

В ранее обнаруженных ценопопуляциях *C. ucrainica* растет в разнообразных ценоотических условиях. Так, в устье р. Рось популяция приурочена к лесам и редколесьям класса PUR Salicetea purpureae Moor 1958 (порядок PUR-01 Salicetalia purpureae Moor 1958, союз PUR-01B Salicion albae Soo 1951). Популяция на боровой террасе р. Днепр относится к синтаксонам союза PUB-01C Aceri tatarici-Quercion Zolyomi 1957 порядка PUB-01 Quercetalia pubescentipetraeae Klika 1933 класса PUB Quercetea pubescentis Doing-Kraft ex Scamoni et Passarge 1959. Одинокое дерево в долине р. Сула как производное союза FAG-03F Quercu roboris-Tilion cordatae Solomeshch et Laivins ex Bulokhov et Solomeshch in Bulokhov et Semenishchenkov 2015 порядке FAG-03 Carpinetalia betuli P. Fukarek 1968 класса FAG Carpino-Fagetea sylvaticae Jakucs ex Passarge 1968 (Соломаха, 2008; Никитчук, Смоляр, Соломаха, 2016; Mucina et al., 2016). В Мезинском НПП *C. ucrainica* растет в группировках, по комплексу диагностических видов в их составе принадлежащих к классам RHA Crataego-Prunetea Tx. 1962, MOL Molinio-Arrhenatheretea Tx. 1937 та FES Festuco-Brometea Br.-Bl. et Tx. ex Soo 1947 [16], [17].

Выводы. Таким образом, исследованный комплекс местообитаний *C. ucrainica* в Мезинском НПП подтверждает сделанный нами ранее вывод об экологическом своеобразии экотопов распространения вида. Специфика характерных комплексов биотопов исследованной территории состоит в отложениях белого мела, которые служат местными водоупорными горизонтами.

Вследствие обобщения полученных нами данных о новых местообитаниях *C. ucrainica* в долине р. Днепр может быть выстроен экологический ряд биотопов от подстилающих глинистых отложений на пойменных песчаных почвах в устье р. Рось и на о. Шелестов, от опесчаненных песков с подстилающими глинами на боровой террасе в окрестностях г. Киева до отложений белого мела на прибрежных участках поймы р. Десна.

С целью охраны этого редкого вида, занесенного в «Международный Красный список», необходимо уменьшение рекреационной нагрузки на участок прибрежной полосы поймы р. Десна, где обнаружено распространение *C. ucrainica*. Учитывая значимость влияния выпаса скота, как одного из основных факторов, способствующих формированию таких биотопов, необходимо сохранение использования этих участков в режиме прогонного выпаса, но с уменьшением пастбищной нагрузки.

Литература

1. Пояркова, А.И. *Crataegus* L / А.И. Пояркова // Флора СССР. – Л. : Изд-во АН СССР, 1939. – Т. 9. – С. 416–468.
2. Клоков, М.В. *Crataegus* L / М.В. Клоков // Флора УРСР. – Київ : Вид-во АН УРСР, 1954. – Т. 6. – С. 49–79.
3. Цвелев, Н.Н. *Crataegus* L / Н.Н. Цвелев // Флора Восточной Европы. – СПб. : Мир и семья, изд-во СПХФА, 2001. – Т. 10. – С. 557–586.
4. Christensen, K.I. Revision of *Crataegus* sect. *Crataegus* and nothosect. *Crataeguineae* (Rosaceae – *Maloideae*) in the Old World / K.I. Christensen // System. Bot. Monographs. – 1992. – Vol. 35. – Pp. 1–199.
5. Бортняк, М.М. Зростання рідкісних для флори УРСР видів *Crataegus ucrainica* Rojark. і *C. klokovii* Ivashin (Rosaceae) на Київщині / М.М. Бортняк, В.М. Любченко // Укр. ботан. журн. – 1987. – Т. 43, № 1. – С. 94–96.
6. Нікітчук, О.В. До поширення *Crataegus ucrainica* (Rosaceae) в Лівобережному Лісостепу / О.В. Нікітчук, Н.О. Смоляр, В.А. Соломаха // Чорн. ботан. журн. – 2016. – Т. 12, № 1. – С. 31–40.
7. IUCN Redlist of Threatened Plants / eds. K.S. Valter, H.G. Gilett. – UK : Gland (Switzerland) and Cambridge, 1998. – 862 p.
8. Шевчик, В.Л. Нове місцезнаходження *Crataegus ucrainica* (Rosaceae) в дельті р. Рось / В.Л. Шевчик, О.В. Нікітчук, Т.В. Шевчик, В.А. Соломаха // Укр. ботан. журн. – 2016. – Т. 73, № 2. – С. 158–162.
9. Шевчик, О.В. До поширення *Crataegus ucrainica* (Rosaceae) в заплаві р. Дніпро (о. Шелестів, Канівський природний заповідник) / О.В. Шевчик, В.А. Соломаха // Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Т. Шевченка. – 2017. – Т. 73, № 1. – С. 84–87.
10. Онищенко, В.А. Фіторізноманіття заповідників і національних природних парків України / В.А. Онищенко, Т.Л. Андрієнко. – К. : Фітосоціоцентр, 2012. – Ч. 2. Національні природні парки. – 580 с.
11. Mosyakin, S.L. Vascular plants of Ukraine. A nomenclatural checklist / S.L. Mosyakin, M.M. Fedoronchuk ; ed. S.L. Mosyakin. – Kiev : M.G. Kholodny Inst. of Botany, 1999. – 345 p.
12. Смирнова, О.В. Популяционная организация растительного покрова лесных территорий / О.В. Смирнова, А.А. Чистякова, Р.В. Попадюк [и др.]. – Пушино, 1990. – 91 с.
13. Національний атлас України / НАН України, Інститут географії, Державна служба геодезії, картографії та кадастру. – К. : ДНВП «Картографія», 2007. – 435 с.
14. Физико-географическое районирование Украинской ССР. – К. : Изд-во Киев. ун-та, 1968. – 683 с.
15. Нікітчук, О.В. Особливості поширення *Crataegus ucrainica* (Rosaceae) в Україні / О.В. Нікітчук // Рідкісні рослини і гриби України та прилеглих територій: реалізація природоохоронних стратегій : матеріали IV Міжнародної конференції, Київ, 16–20 травня 2016. – Київ : Паливода А.В., 2016. – 222 с.
16. Mucina, L. Vegetation of Europe: hierarchical floristic classification system of vascular plant, bryophyte, lichen, and algal communities / L. Mucina [et al.] // Applied Vegetation Science. – 2016. – 19 (Suppl. 1). – P. 3–264.
17. Соломаха, В.А. Синтаксономія рослинності України. Третє наближення / В.А. Соломаха. – Київ : Фітосоціоцентр, 2008. – 296 с.

Информатика

УДК 004.932

Оценка эффективности детекторов локальных признаков при обработке видеоэндоскопических изображений

Е.А. ГОЛОВАТАЯ¹, В.С. САДОВ¹, О.М. ДЕМИДЕНКО²

Рассматриваются алгоритмы извлечения локальных признаков на изображениях, полученных с использованием видеоэндоскопических систем. Для анализа эффективности работы таких алгоритмов предлагается метод оценки устойчивости результатов детектирования к различным преобразованиям изображения. Статистически оценивается смещение ожидаемого и реального положения ключевой точки до и после применения преобразования, а также количество ложноположительных и ложноотрицательных результатов детектирования после преобразования.

Ключевые слова: обработка изображений, детекторы локальных признаков, преобразования изображений.

The local feature extraction algorithms for images acquired using video endoscopic systems are discussed. In order to analyze the performance of such algorithms, a method is proposed to evaluate the stability of the detection result set to various image transform operations. The offset of expected and actual keypoint location before and after the transform, as well as the number of false-positive and false-negative detections after the transform, are analyzed statistically.

Keywords: image processing, local feature detectors, image transforms.

Введение. Алгоритмы детектирования и описания локальных признаков позволяют осуществить переход из пространства абсолютных значений яркостей индивидуальных пикселей в метрические пространства гистограммных или структурных описаний поведения функции яркости в окрестности каждого пикселя [1].

Использование такого подхода приводит к появлению избыточности в представлении каждого пикселя, позволяет полученную информацию трактовать как пространство признаков и применять к нему различные методы статистического анализа и машинного обучения для решения таких задач, как классификация, детектирование и локализация объектов на изображении, индексирование, поиск похожих изображений и др. Такое представление также даёт возможность подготавливать данные для более сложной дальнейшей обработки, например, для трехмерной реконструкции по нескольким изображениям [2].

Несмотря на высокую значимость детекторов и дескрипторов локальных признаков, лежащие в их основе алгоритмы основаны, как правило, на эмпирических зависимостях. В этой связи важной является задача проверки совместимости конкретных выбранных методов детектирования, описания и сравнения локальных признаков непосредственно в контексте решаемой задачи. В данной работе приводятся разработанные авторами статьи приёмы для оценки эффективности детекторов и дескрипторов локальных признаков применительно к задаче обработки медицинских изображений, полученных при помощи видеоэндоскопических систем.

Детекторы локальных признаков. Алгоритмы детектирования локальных признаков (также называемые детекторами или экстракторами) – алгоритмы нахождения на целевом изображении некоторого набора характерных точек, хорошо описывающих его уникальные особенности. Алгоритмы детектирования локальных признаков можно выразить в качестве предиката или бинарного классификатора от индивидуального пикселя на изображении, который для каждого пикселя определяет, является ли он характерной точкой этого изображения [1], [3].

Не существует формального достоверного критерия, по которому можно однозначно определить, является ли та или иная точка изображения характерной. Единственное требование, предъявляемое к алгоритмам детектирования – инвариантность результата классификации одной и той же точки относительно аффинных, дисторсионных и других видов преобразований исходного изображения. Это требование означает, что для идеального детектора локальных признаков одна и та же точка, окрестность которой подвержена любой комбинации преобразований смещения, поворота, масштабирования, дисторсии и т. п., должна после применения этих преобразований по-прежнему детектироваться как характерная.

Поскольку положение точки, скорее всего, будет изменено при применении каких-либо из указанных преобразований, детекторы локальных признаков основываются, в первую очередь, на яркостных характеристиках участков изображения. К основным элементам изображения, являющимся инвариантными относительно указанных преобразований, относятся в первую очередь углы и вершины объектов, границы и небольшие отдельные области равномерной яркости на изображении. Соответственно, в качестве детекторов границ обычно используются индивидуально или в совокупности различные алгоритмы детектирования углов (corner detector), детектирования границ (edge detector) и детектирования отдельных областей (blob detector).

Как правило, детекторы представляют собой совокупность операции свёртки с некоторым фиксированным ядром и пороговой фильтрации по полученным после операции свёртки значениям. Таким образом, можно приспособить к задаче детектирования локальных признаков такие распространённые алгоритмы, как операторы Кэнни и Собелла, Лапласиан-Гауссиан, разность Гауссианов и т. д. Другие распространённые детекторы, такие как детектор Харриса, Ши-Томаси, SUSAN и FAST, основываются преимущественно на эмпирически выведенных соотношениях для яркостей окрестности каждой точки. Кроме этого, существует группа алгоритмов, производящих одновременно не только детектирование, но и вычисление дескрипторов характерных точек (в других случаях алгоритм вычисления дескриптора характерной точки применяется после алгоритма детектирования и отличается от него). К таким алгоритмам относятся SIFT, SURF, BRISK, FREAK и другие [4].

Проблемы оценки эффективности детекторов локальных признаков. Как уже упоминалось, для любого детектора не существует формального критерия для того, чтобы определить, является ли та или иная точка характерной. Это делает тестирование, оценку эффективности и сравнение детекторов довольно сложной задачей. Поэтому существует необходимость оценки эффективности алгоритмов детектирования в контексте решаемой задачи, т. е. для конкретного класса изображений как, в частности, и для изображений, полученных с использованием видеоэндоскопических систем [3], [5].

Одной из особенностей видеоэндоскопических изображений является наличие бликов. Блики на изображении обусловлены отражением света источника освещения от поверхности внутренних органов. Блики вносят существенные искажения в работу детекторов, так как сами по себе они не несут или несут очень мало информации о взаимном расположении объектов на изображении; кроме того, изменение положения бликов при движении камеры имеет хаотический характер. Тем не менее, практически все детекторы локальных признаков укажут точки на самом блике, его непосредственной окрестности или границе как характерные. Это происходит из-за того, что сам блик – пятно с максимальным значением яркости – кардинально отличается от окружающих объектов и имеет, как правило, довольно чёткую границу [6].

Поэтому, прежде чем приступать к непосредственно оценке эффективности конкретных алгоритмов извлечения локальных признаков, необходимо произвести локализацию и устранение бликов. Так как все блики имеют схожую структуру и высокие, аномальные для изображения значения яркости, для их выделения можно использовать алгоритмы линейного поиска и рекурсивной точечной заливки. После обнаружения блика его и некоторую его окрестность можно либо исключить из дальнейшей обработки, либо заменить однородной текстурой, схожей с его непосредственной окрестностью. В данной работе характерные точки, идентифицированные алгоритмом извлечения локальных признаков в непосредственной окрестности блика, не считались характерными и исключались из дальнейшего анализа.

Оценка устойчивости детекторов локальных признаков к преобразованиям. Как было указано ранее, формального критерия того, является ли та или иная точка характерной, не существует для произвольно рассматриваемого дескриптора, поэтому тестированию и оценке будет подвергаться их устойчивость к различным видам преобразований. Поскольку сущность преобразования известна в момент его применения, всегда можно определить положение любой точки изображения после применения к нему преобразования.

Предложенный алгоритм оценки эффективности алгоритмов извлечения локальных признаков можно представить в виде следующих этапов:

1. К изображению I применяется детектор $d(I) = \{(x_i, y_i)\}$ и определяется множество координат характерных точек (x_i, y_i) .

2. Вводится некоторое преобразование $f(I) = I^*$, трансформирующее исходное изображение I в изображение I^* .

3. Этот же детектор применяется к преобразованному изображению: $d(f(I)) = d(I^*) = \{(x_i^*, y_i^*)\}$.

4. На основании преобразования f и соответствующей этому преобразованию процедуры пересчёта координат индивидуальной точки f_p определяются координаты характерных точек исходного изображения после преобразования: $f_p(d(I)) = \{f_p(x_i, y_i)\} = \{(x_i^*, y_i^*)\}$.

5. В окрестности ожидаемых координат каждой точки исходного изображения после преобразования (x_i^*, y_i^*) ищется соответствующая ей точка (x_f^*, y_f^*) , обнаруженная на преобразованном изображении детектором. Для сопоставления точек используется евклидово расстояние $E_d(x_1, y_1, x_2, y_2) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$ и некоторый порог t .

Структурная схема процедуры оценки устойчивости детекторов локальных признаков к различным видам преобразований представлена на рисунке 1.

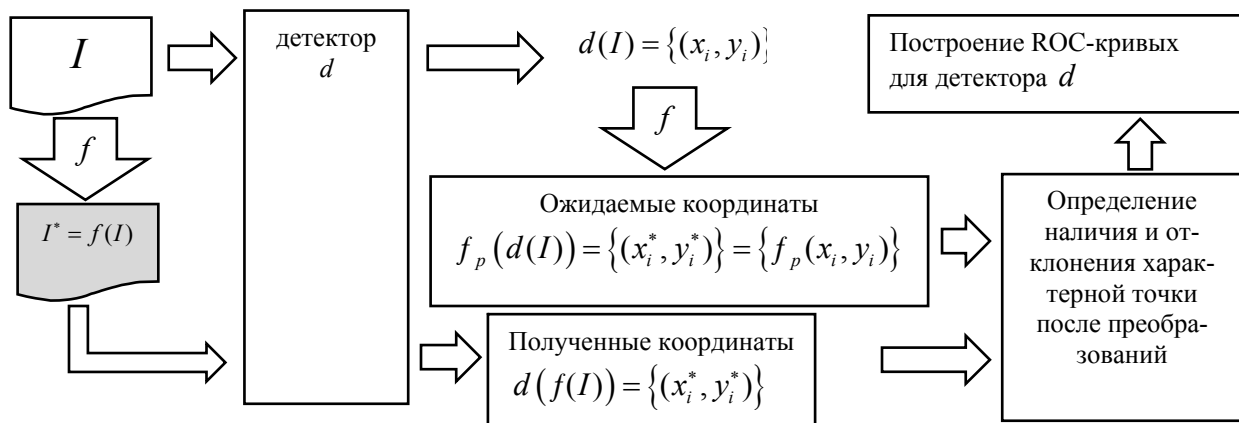


Рисунок 1 – Схема процедуры оценки устойчивости детектора локальных признаков d к преобразованию f на изображении I

Соответственно, если детектор d абсолютно устойчив относительно преобразования f , каждой точке, найденной до преобразования и трансформированной в соответствии с этим преобразованием, будет соответствовать одна и только одна точка, обнаруженная детектором на преобразованном изображении, причём евклидово расстояние между соответствующими точками будет нулевым.

В качестве преобразований используются аффинные, дискретизационные, дисторсионные, цветовые и гауссовы преобразования. Для каждого вида рассматриваемых преобразований экспериментально были получены граничные значения параметров преобразования, которые вводят приемлемый уровень искажения, и, в то же время, позволяют оценить устойчивость рассматриваемых алгоритмов (таблица 1).

Таблица 1 – Исследуемые виды преобразований и их ограничения

Преобразование	Параметры	Описание	Ограничения
Аффинное	3x3 матрица преобразования T Смещение $\Delta x, \Delta y$ Растяжение s Угол поворота γ	Линейные преобразования – смещение, растяжение, поворот	$\Delta x^2 + \Delta y^2 \leq 10$ $0.8 < s < 1.2$ $-\frac{\pi}{4} \leq \gamma \leq \frac{\pi}{4}$
Субдискретизация	Размер окна n	Замена каждой $n \times n$ окрестности одним значением	$n \in \mathbb{Z}$ $2 \leq n \leq 4$
Дисторсия	Линейное увеличение b_0 Коэффициент дисторсии 3 порядка F_3	«Бочкообразное» нелинейное искажение пространства $\vec{p} = b_0 \vec{p} + F_3 p^2 \vec{p}$	$0.8 < b_0 < 1.2$ $0.001 < F_3 \leq 0.1$
Преобразование цветового пространства	Функция преобразования $(r^*, q, b^{**}) = f(r, q, b)$	Замена цветовых составляющих каждого пикселя	$q = \frac{E[r + q + b]}{E[r^* + q^* + b^*]}$ $0.5 < q < 1.5$
Размытие	Стандартное отклонение σ	Наложение гауссовой функции $G(x, y) = \frac{\exp(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2})}{2\pi\sigma^2}$	$0.4 < \sigma < 3$

Оценка эффективности работы детектора осуществляется различными методами. Как уже упоминалось, зная конкретный вид преобразования, можно на трансформированном изображении найти ожидаемое положение характерной точки, и в её окрестности осуществить поиск характерной точки, детектированной на уже преобразованном изображении. В качестве области поиска используется окружность Брезенхема радиусом 5 пикселей вокруг точки, найденной до преобразования. Эта область также подвергается трансформации, чтобы учесть влияние некоторых трансформаций (масштабирование, смещение, субдискретизация, дисторсия) на её размер. Если после преобразования точка или часть её окрестности оказывается за пределами изображения, она не учитывается.

Чтобы учесть специфику рассматриваемой предметной области, в качестве исходных изображений для оценки эффективности работы детекторов использованы цветные изображения, полученные с помощью видеоэндоскопических систем, в различном разрешении и в режимах обычного и узкоспектрального динамического диапазона.

Для сравнения используются 3 алгоритма извлечения локальных признаков – SIFT, FAST и SUSAN. SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) – гистограммный дескриптор, в рамках которого осуществляется нахождение характерных точек на изображении путём поиска экстремумов разности гауссианов для последовательности, полученной из исходного изображения в масштабном пространстве. FAST (Features from Accelerated Segment Test) – эмпирически выведенный алгоритм быстрого (за линейное время) детектирования характерных точек с регулируемым порогом, основанный на анализе разностей яркостей 16 пикселей в окружности каждой точки. SUSAN (Smallest Univalued Segment Assimilating Nucleus) – алгоритм, основанный на применении к каждому пикселю экспоненциальной маски, алгоритма подавления немаксимумов и поиска минимума на результирующем участке. Для углов и резких перепадов это значение будет превышать определённый порог.

Для различных видов детекторов локальных признаков можно оценить смещение положения характерной точки от ожидаемого в пределах заданной окрестности для различных видов преобразований.

Гистограмма распределения отклонения положения характерной точки от ожидаемых координат в пределах рассматриваемой области представлена на рисунке 2.

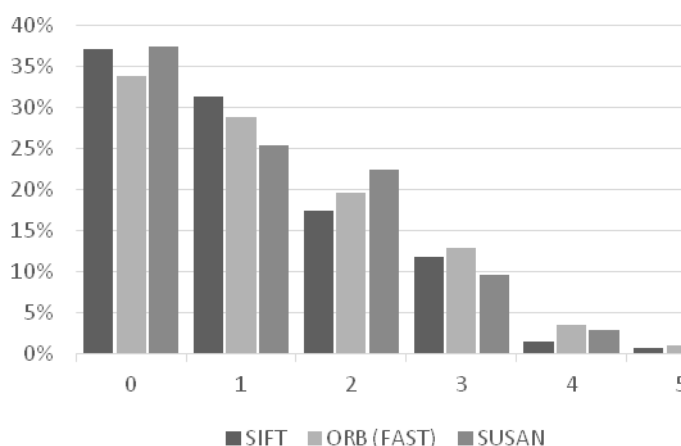


Рисунок 2 – Гистограмма распределения отклонения положения характерной точки после преобразования для детекторов SIFT, FAST и SUSAN

Как видно из гистограммы, отклонение положения характерной точки распределено нормально с нулевым матожиданием.

Для каждого класса преобразований или для случайно генерируемого набора преобразований можно оценить количество преобразований, после которых точка перестаёт обнаруживаться – т. е. преобразования применяются до тех пор, пока характерная точка обнаруживается в заданной окрестности. Количество преобразований, которые «выдерживает» детектор, может служить оценкой его устойчивости; однако такая оценка не учитывает тот факт, что какие-то из преобразований (например, дисторсия) будут вносить намного более значительные искажения, чем другие (преобразование цветового пространства). Поэтому её целесообразно применять только для одного и того же класса преобразований со схожими параметрами. С другой стороны, применяя один и тот же тип преобразования к изображению, эффекты этой трансформации будут только увеличиваться и через несколько шагов будут вносить намного более серьёзные искажения, чем совокупность разных видов преобразований.

Чтобы избежать перечисленных недостатков, следует оценивать работу алгоритма извлечения локальных признаков, рассматривая его как бинарный классификатор. За ложноположительный результат (false-positive, ошибка 1 рода) можно принять детектирование после преобразований характерной точки, которая не попала ни в одну из ожидаемых окрестностей, т. е. появление новой точки в том месте, где она не ожидалась. За ложноотрицательный результат (false-negative, ошибка 2 рода) принимается отсутствие в ожидаемой окрестности точки после детектирования характерных точек на преобразованном изображении, т. е. исчезновение точки из места, где она ожидалась. Соответственно, истинно положительный результат – детектирование после преобразования точки в ожидаемой окрестности, истинно отрицательный результат – отсутствие характерных точек в тех областях, где их не было до преобразования. Для упрощения оценки ложноотрицательных результатов и для накопления истинно отрицательных результатов в исходное изображение случайным образом вводятся окрестности, не содержащие характерную точку, в количестве порядка числа найденных характерных точек.

Основной способ оценки бинарных классификаторов – ROC-кривые (Receiver Operating Characteristic, операционные характеристики классификатора или кривые ошибок) [3]. Для их построения используется подсчёт числа истинно положительных (TP), истинно отрицательных (TN), ложноположительных (FP) и ложноотрицательных (FN) результатов работы классификатора с различными параметрами. Для бинарных классификаторов можно ввести 2 безразмерные величины P и S , ограниченные значениями, лежащими на отрезке $[0; 1]$:

1. Чувствительность (true positive rate) P отвечает за способность классификатора распознавать наличие признака:

$$P = \frac{TP}{TP + FN}. \quad (1)$$

2. Специфичность (false positive rate) S отвечает за способность классификатора не принимать отсутствие признака за его наличие:

$$S = \frac{TN}{TN + FP}. \quad (2)$$

ROC-кривые отображают зависимость чувствительности классификатора от его специфичности при различных параметрах порога классификации. Порог классификации применяется к значению, вычисленному по алгоритму детектирования, и используется для определения относится ли данная точка к характерным. Основная качественная характеристика – площадь под ROC-кривой. Вместо прямой оценки площади, как правило, используют визуальную оценку относительно случайной классификации, т. е. прямой $P = S$ для любых значений порога. Корректно работающие классификаторы имеют ROC-кривую, которая проходит выше прямой $P = S$; ROC-кривая идеального классификатора асимптотически стремится к функции Хевисайда (единичному скачку) [3], [4].

На рисунке 3 приведены ROC кривые трех различных алгоритмов извлечения локальных признаков – SIFT (как часть гистограммного дескриптора SIFT), FAST и SUSAN.

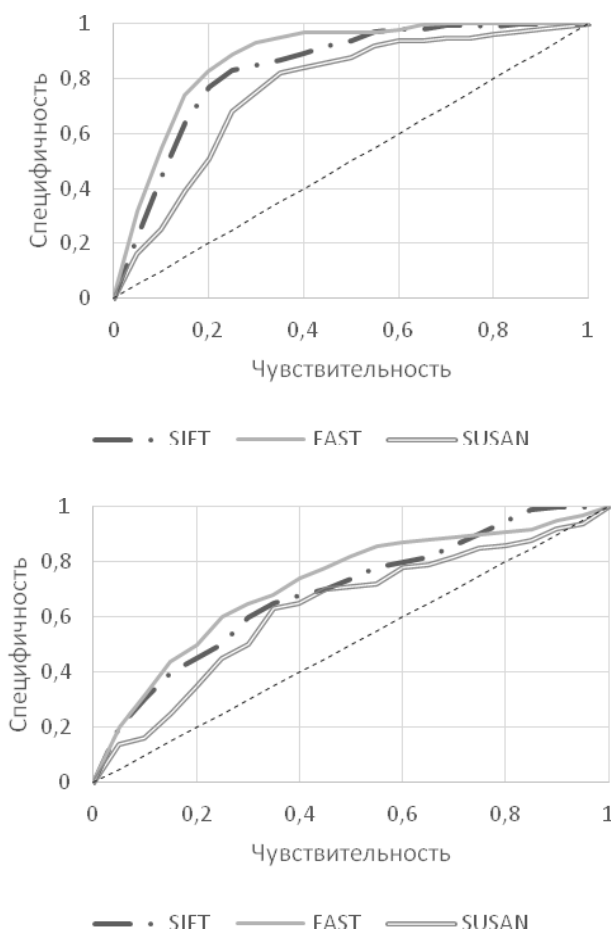


Рисунок 3 – ROC-кривые для детекторов SIFT, FAST и SUSAN на различных наборах данных:
а) разнородные изображения, б) изображения видеоэндоскопических систем

Как видно из рисунка, на разнородных изображениях (рисунок 3а), характеризующихся наличием большого числа перепадов яркости, границ и других мелких деталей, все рассмотренные алгоритмы извлечения локальных признаков в среднем устойчивы к преобразованиям. При этом на изображениях, полученных с использованием видеоэндоскопических систем, в силу низкой контрастности, большей однородности и отсутствия четкой структуры поверхности устойчивость рассматриваемых алгоритмов к преобразованиям значительно меньше, что обуславливает меньшую площадь под ROC кривой (рисунок 3б). Таким образом, особенности изображений и условий съемки вносят искажения в результаты работы де-

текторов. Для прикладных задач, в которых требуется большая точность классификации, особенно в системах обработки медицинских изображений, это обуславливает необходимость разработки специализированных алгоритмов, дающих более достоверные результаты на более узком классе изображений.

Заключение. В работе рассмотрена задача оценки эффективности алгоритмов извлечения локальных признаков. Предложенные подходы основаны на требовании инвариантности результатов извлечения относительно различных видов преобразований исходного изображения. Для оценки устойчивости рассмотрены основные виды преобразований, их основные параметры и накладываемые на эти параметры ограничения.

Для трех анализируемых детекторов (SIFT, FAST и SUSAN) рассмотрены относительные смещения характерных точек до и после преобразований, оценены пропадания изначальных и появления лишних характерных точек после преобразования с точки зрения бинарной классификации, построены ROC-кривые. Произведено сравнение результатов работы данных детекторов на изображениях видеоэндоскопических исследований и произвольного набора изображений.

В ходе анализа были выявлены следующие недостатки алгоритмов при их применении к изображениям видеоэндоскопических исследований: недостаточность количества характерных точек для дальнейшего анализа изображений, большая часть выделенных характерных точек не несет полезной информации, так как оказывается в пределах бликов и присутствующих искажений, более низкая степень устойчивости к преобразованиям по сравнению с результатами для произвольного набора изображений. В этой связи актуальной является задача разработки специализированного алгоритма извлечения признаков с возможностью адаптивной подстройки под видеоэндоскопические изображения.

Литература

1. Lindeberg, T. Scale-space / T. Lindeberg // Encyclopedia of computer science and engineering. – Hoboken, New Jersey, 2008. – 2495–2504 p.
2. Alpaydin, E. Introduction to machine learning / E. Alpaydin. – MIT Press, 2014. – 640 p.
3. Nikan, S. Performance evaluation of different feature extractors and classifiers for recognition of human faces with low resolution images / S. Nikan, M. Ahmadi // International journal of intelligent systems and applications in engineering. – 2015. – Vol. 3, № 2. – P. 72–77.
4. Medjahed, S.A. A comparative study of feature extraction / A.S. Medjahed // International journal of image, graphics and signal processing. – 2015. – Vol. 7, № 3. – P. 16–23.
5. Solomon, C.J. Fundamentals of digital image processing: a practical approach with examples in matlab / C.J. Solomon, T.P. Breckon. – New York : John Wiley & Sons, 2011. – 344 p.
6. Radke, R.J. Computer vision for visual effects / R.J. Radke. – Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2012. – 393 p.

¹Белорусский государственный университет

²Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

УДК 007.003; 007.008; 65.0; 681.3

Методика динамического ценообразования на основе использования нейросетевого моделирования

А.В. КЛИМЕНКО¹, М.В. ЯЦКОВЕЦ¹, Ю.С. КАРАСЬ²

Дано краткое определение нейронным сетям и динамическому ценообразованию. Рассматриваются преимущества использования нейронных сетей в решении таких задач, как анализ и прогнозирование данных. Приводится обоснование необходимости автоматизации ценообразования. Приведена математическая формула расчета ценообразования.

Ключевые слова: Нейронные сети, динамическое ценообразование, спрос.

A brief definition is given to neural networks and dynamic pricing. Advantages of using neural networks in the solution of such tasks as the analysis and prediction of data are considered. The justification of the need of automation pricing is presented. The mathematical formula of pricing calculation is given.

Keywords: neural network, dynamic pricing, demand.

Введение. Правильное ценообразование напрямую определяет успех компании. Определение цены всегда было чем-то из области интуиции. Цена определяет уровень спроса и объем продаж, рентабельность деятельности, играет важную роль в позиционировании услуги. Если у услуги будет слишком низкая цена, то заказчики начнут сомневаться в качестве ее исполнения. Стоит отметить, что цена услуги, не имеющей спроса вообще, равна нулю.

В цену услуги должны быть включены расходы на рекламу и продвижение, рабочую силу, аренду офисов и покупку оборудования. Также для каждого рынка должна разрабатываться своя ценовая стратегия. При разработке стратегии необходимо учитывать возможные изменения условий рынка.

Существует множество факторов, влияющих на изменение условий рынка, и ключевым является спрос. Если спрос эластичный, то стоит снизить цену. А если же неэластичный, то наоборот повысить. Из-за изменений спроса появилась стратегия динамического ценообразования. Её суть заключается в том, что компания моментально реагирует на увеличение или уменьшение спроса и изменяет цену. Часто для описания динамического ценообразования используется несколько альтернативных терминов: гибкая система ценообразования и индивидуальные цены. Такая ценовая политика уже давно используется в кинотеатрах, чем меньше времени до начала фильма и больше количество свободных мест, тем ниже цена на билет.

Для наибольшей прибыли компании необходимо учитывать данные, связанные не только со спросом, но и индивидуальными характеристиками заказчика. Динамическое ценообразование может осуществляться с помощью специальных алгоритмов, т. е. без участия человека. В этом случае оно контролируется ранее обученной нейронной сетью, которая производит сбор и анализ данных, а затем устанавливает цены с учетом расположения заказчика и его индивидуальных характеристик, времени суток и дня недели, доходов, уровня спроса на данный момент и цены конкурентов. Данные об уровне спроса, в зависимости от дня и времени, берутся за предыдущий период. В то же время интернет позволяет собирать подробные данные о привычках, предпочтениях и даже о финансовых возможностях заказчиков. Для обучения нейронной сети будут использоваться эволюционные алгоритмы. Они используют естественный отбор и изменения при эволюции, что позволяет отыскать наилучшее решение проблемы. Также нейронным сетям, как и головному мозгу человека, присущи такие качества, как анализ, обобщение, выбор необходимых данных из большого потока информации. По сути, нейронные сети основаны на примитивной биологической модели нервных систем. В будущем развитие таких нейробиологических моделей может привести к созданию самостоятельно мыслящих компьютеров [1].

Целью данной работы является изучение перспектив использования нейронных сетей в экономических процессах и оценке надёжности предприятия в IT-сфере.

Задачи данной работы:

- сформировать представление об использовании нейронных сетей в экономике;
- определить преимущества и недостатки нейронных сетей;
- обосновать выбор метода регрессии;
- дать определение динамическому ценообразованию.

Математическая постановка задачи. Метод регрессии – метод, использующийся для подсчёта прибыли, факторов, влияющих на снижение или увеличение объемов производства, один из наиболее точных и простых способов ценообразования. Он позволяет оценить весовые коэффициенты каждого параметра на основе эмпирических данных.

Выберем ряд подобных услуг. Составим уравнение регрессии. Коэффициенты уравнения получим методом наименьших квадратов, он обеспечивает достаточно точное представление линейной зависимости между переменными и, следовательно, наименьшее значение ошибок аппроксимации, называемых остатками. Суть метода наименьших квадратов заключается в нахождении коэффициентов линейной зависимости, при которых функция двух переменных a и b , $F(a, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i + b)^2$ принимает наименьшее значение [3]. То есть, при данных a и b сумма квадратов отклонений экспериментальных данных от найденной прямой будет наименьшей. Таким образом, решение примера сводится к нахождению экстремума функции двух переменных.

$$C = a_0 + k_i \times P_i + k_2 \times P_2 + \dots k_n \times P_n,$$

где C – цена услуги; a_0 – свободный член уравнения регрессии, показывающий минимальную цену (цену нулевого приближения), данная цена изменяется под действием факторов; $k_i, i = 1 \dots n$ – весовой коэффициент i -го параметра; $P_i, i = 1 \dots n$ – значения i -го параметра.

Имея качественные характеристики услуги и уравнение связи, определяют цену на неё, подставляя в уравнение регрессии значение данных показателей.

Этот метод успешно применяется в рыночной экономике, в частности для услуг, в связи с тем, что он позволяет определить факторы, влияющие на цену.

Спрос – это зависимость между ценой и количеством товара, которое покупатели способны и желают купить по определенной цене, в какой-либо промежуток времени. Длительный анализ зависимости спроса и предложения выявил общие направления изменения спроса и предложения под влиянием ценовых и неценовых факторов и сформулировать закон – закон спроса и предложения. Довольно часто недостаточно знать, что рост цены вызывает сокращение объема спроса, необходима более точная количественная оценка, так как данное сокращение может быть различным, например, быстрым или медленным, сильным или слабым. В нашем случае лучше подойдёт определение спроса по цене. Формула выглядит так:

$$E_p^d = \frac{\Delta q}{q} \div \frac{\Delta q \times p}{\Delta p \times q} = Q'(P) \frac{p}{q},$$

где E_p^d – эластичность спроса по цене; Δq – изменение величины спроса; Δp – изменение цены на услугу; q – величина спроса; p – цена на услугу; $Q'(P)$ – значение зависимости спроса от цены.

Получаем конкретное число.

– Если $E_p^d \rightarrow \infty$, то абсолютно эластичный спрос. В этом случае резкий рост цены приведёт к полному отказу от данной услуги, а уменьшение цены – к неограниченному увеличению спроса.

– Если $E_p^d = 0$, то абсолютно неэластичный спрос. В этом случае любое изменение цены никак не повлияет на спрос, т. е. спрос абсолютно не зависит от цены.

– Если $E_p^d > 1$, то эластичный спрос. Чем больше коэффициент, тем спрос эластичнее. В этом случае снижение стоимости приведёт к более быстрому росту спроса по сравнению с изменениями цены, а повышение – к резкому падению спроса.

– Если $E_p^d < 1$, то неэластичный спрос. В этом случае снижение цены приведёт к более медленному росту спроса по сравнению с изменением стоимости услуги, а повышение цены – к постепенному падению.

– Если $E_p^d = 1$, то это единичная эластичность. В этом случае изменение в цене ведет к такому же изменению в объеме спроса, но в противоположном направлении [2].

На графиках это будет выглядеть так (рисунок 1):

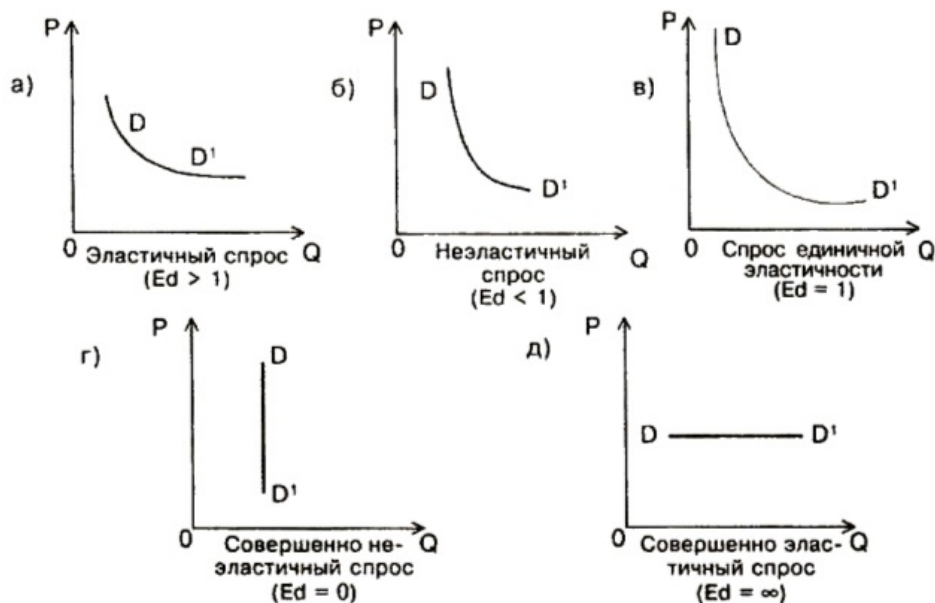


Рисунок 1 – Эластичность спроса

Эластичность спроса по цене показывает степень количественного изменения спроса при изменении цены на 1 %. В общем, понятие эластичности является базовой экономической концепцией для понимания соотношения «поведение покупателя – цена», которое выражается в процентном изменении объема продаж при изменении на один процент цены.

Потребительский спрос, его формирование и развитие является достаточно сложным экономическим процессом, актуальность исследования которого, несмотря на усилия многих экономических школ, не исчерпана до настоящего времени. Современный анализ потребительского спроса и институциональных факторов, лежащих в его основе, позволяет полноценнее реализовать присущие экономической науке познавательную, прогностическую и практическую функции.

Описание методики динамического ценообразования на основе использовании нейросетевого моделирования. Изначально берутся уже имеющиеся данные, найденные в сети Интернет или из опыта компании. Используя метод регрессии, определяем стартовую цену, спрос по цене, учитываем данные о привычках, предпочтениях и даже о финансовых возможностях заказчика, а также его опыт на рынке и требования (это все можно найти в сети Интернет). После этого не забываем о дне недели и времени суток (естественно, работа в выходные дни и позднее или очень раннее время будет стоить дороже). Получаем оптимальную цену, изучаем реакцию спроса на нашу оптимальную цену, ее мы будем использовать как часть данных, используемых при следующем ценообразовании [4].

Схема представлена на рисунке 2.

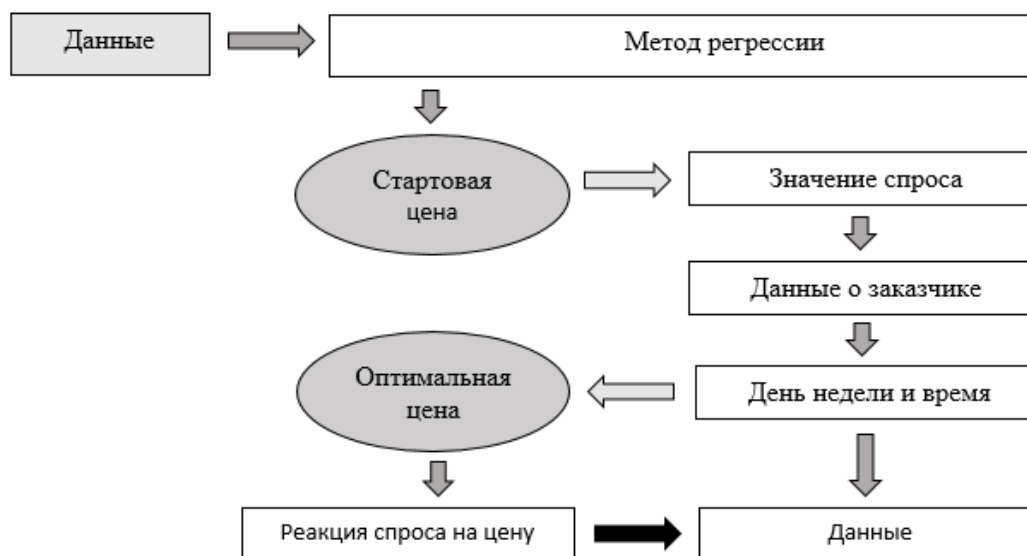


Рисунок 2 – Схема методики динамического ценообразования

Заключение. Нейронную сеть можно использовать для динамического ценообразования и регулировать цену на товар в зависимости от различных факторов. Нейронная сеть имеет множество преимуществ, в отличие от человека, она способна учитывать даже факторы, практически не имеющие никакой значимости в промежуточном результате.

Динамическое ценообразование может быть ценным инструментом для компании, чтобы максимизировать свой доход путем изменения цен в зависимости от предполагаемого спроса. Кроме того, оно также может быть использовано для управления потоком спроса.

Итак, динамическое ценообразование – это уникальный по своей сути подход к работе с ценой, он основан на гибком изменении стратегий и методов ценообразования в зависимости от ситуации на рынке, например, цены у конкурентов, и целей компании.

Без использования нейросетевого моделирования для динамического ценообразования компания уязвима перед действиями конкурентов, сильнее подвержена влиянию человеческого фактора и ошибочных решений.

Эффективное динамическое ценообразование представляет из себя систему, в которой взаимодействуют модели, тактики, стратегии и инструменты управления ценой.

Литература

1. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М. : Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
2. Экономика и управление на предприятии / А. Агарков, Р. Голов, В. Теплышев, Е. Ерохина. – М. : Дашков и К^о, 2013. – 400 с.
3. Бостынец, Н.Д. Основы экономики : учебное пособие / Н.Д. Бостынец. – Минск : БГУИР, 2015. – 324 с.
4. Юревич, А. Нейронные сети в экономике / А. Юревич. – М. : LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 80 с.

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Исследование речевых расстройств при помощи голосовой идентификации на основе нейронных сетей

П.А. МЕНЬШАКОВ, И.А. МУРАШКО

Предлагается рассмотреть способ анализа состояния голоса и выявления его проблем, таких как усталость голосовых связок, повреждения или воспаления речевого тракта при помощи ранее записанного голоса диктора и нейросетевого анализа голосовых изменений.

Ключевые слова: голосовая идентификация, биометрия, система контроля доступа, нейронная сеть, быстрое преобразование Фурье.

It is proposed to consider a method for analyzing the state of the voice and identifying its problems, such as fatigue of the vocal cords, damage or inflammation of the vocal tract with the help of the previously recorded voice of the speaker and neural network analysis of voice changes.

Keywords: voice recognition, biometrics, access control systems, neural network, fast Fourier transform.

Введение. Оценка нарушения голоса включает использование оценки множественных характеристик речи (степень дыхания, напряжение, шероховатость). Одна из проблем, связанных с использованием многомерных данных – их сравнение. Для выполнения сравнения и классификации предлагается использовать самоорганизующуюся карту Кохонена. Ввиду возможности обучения без учителя, она не нуждается в целевом векторе для выходов и, следовательно, не требует сравнения с predetermined идеальными ответами, а обучающее множество состоит лишь из входных векторов. Процесс обучения, следовательно, выделяет статистические свойства обучающего множества и группирует сходные векторы в классы. Предъявление на вход вектора из данного класса даст определенный выходной вектор.

Дисфония. Дисфония четко определяется как основное расстройство фонации, является следствием патологии голосовых связок. Есть два вида дисфонии – функциональная и повреждающая. Повреждающие дисфонии делятся на два вида: врожденная и приобретенная дисфония. Повреждающая дисфония в некоторых случаях может появиться после функциональной дисфонии.

Возможны функциональные дисфонии:

- хрипота;
- ларингит;
- воспаление гортани;
- гиперкинез;
- слизистая киста или киста оболочки;
- гипокинез;
- инфекция горла;
- глоссоплегия;
- ринофарингит.

Указанные заболевания имеют различные степени тяжести, что существенно отражается на качестве жизни человека. Таким образом, диагностирование нарушений фонации помогут определить уровень качества жизни. Шкала голосовых нарушений приведена в таблице 1.

На данный момент диагностика нарушения голосовой функции заключается в опросе и осмотре больного. При сборе анамнеза особое внимание обращают на длительность патологии, наличие сопутствующих болезней и факторов, способствующих развитию дисфонии.

Таблица 1 – Шкала голосовых нарушений

Градация нарушений	Степень нарушений	Описание	Рекомендации
Нет нарушений	0	—	—
Незначительные нарушения	1	Лингвистическое нарушение едва чувствуется или ощущается только самим пациентом	Рекомендуется речевая терапия
Умеренные нарушения	2	Снижение легкости и скорости говорения	Необходима речевая терапия
Тяжелые нарушения	3	Говорящий нуждается в помощи слушателя. Пациент часто не может быть понятым, но понимает сам	Необходима речевая терапия и помощь со стороны слушателя
Глубокие повреждения	4	Говорение фрагментарными выражениями. Слушатель должен о многом догадываться, задавать дополнительные вопросы	Необходима речевая терапия и изучение языка жестов, консультации или синтез голоса.

Основными способами диагностики дисфонии на данный момент являются физикальное и инструментальное обследование:

- исследование основных акустических параметров голоса;
- глоттография и электромиография;
- прямая или непрямая ларингоскопия;
- исследование ФВД (функции внешнего дыхания);
- эндоброларингоскопия;
- микроларингостробоскопия;
- трахеоскопия при необходимости;
- рентгенография гортани;
- КТ;
- бактериологическое исследование отделяемого ротоглотки;
- биопсия при подозрении на онкопатологию.

Частично данные способы обследования возможно заменить при помощи сравнительного анализа векторов голосовых характеристик больного. Первый вектор характеристик голоса выступает в качестве эталонного образца, взятого в момент отсутствия заболевания, второй вектор является текущим и сравнивается на предмет отклонений от нормы.

Главным плюсом данного подхода к анализу является возможность неинвазивной диагностики заболеваний артикуляторного тракта с использованием искусственных нейронных сетей, что позволяет провести диагностику удаленно и частично автоматизировать процесс.

Аппаратная реализация. Для аппаратной реализации необходимы микрофон, фильтр и аналого-цифровой преобразователь для дальнейшей работы с цифровой записью голоса.

С выхода микрофона сигнал подается на вход блока фильтрации. Следующим этапом является прохождение АЦП [1]. Далее оцифрованный сигнал попадает в блок цифровой обработки. В блоке цифровой обработки сигнал фильтруется и преобразуется в вектор, с которым в дальнейшем будет работать микропроцессор и нейросетевой обработчик. Для последующего сравнения с сохраненным ранее вектором мел-кепстральных коэффициентов полученный вектор заносится в энергонезависимую память. После сравнения вектора в памяти с полученным вектором микроконтроллер подает команду на блок управления внешним устройством, к примеру, на магнитный дверной замок [2].

Сам процесс голосовой идентификации не требователен к ресурсам и состоит из двух этапов. Первым этапом является получение речевых признаков диктора и преобразование к виду, в котором его можно будет сравнить с другими. Вторым шагом является их сравнение при помощи обученной нейронной сети [3].

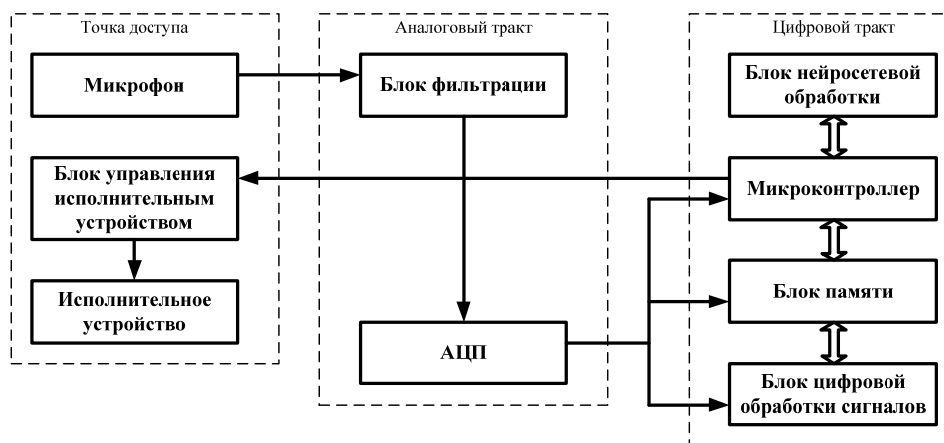
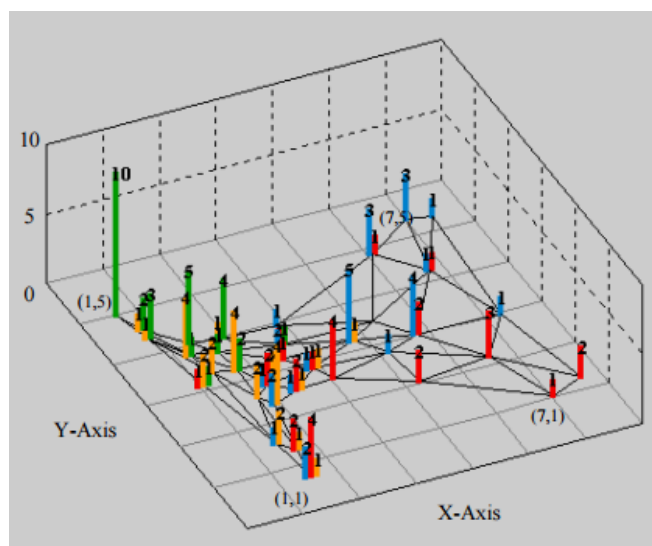


Рисунок 1 – Архитектура программно-аппаратных средств системы контроля доступа в помещение

Анализ нарушения речи. В исследовании, проведенном Leinonen [4], для замены непосредственного прослушивания голоса была создана шкала оценок различных степеней и форм дисфонии. Для сравнения критериев использовалась нейронная сеть без учителя, обучение которой было проведено с использованием перцепционной карты оценок нормального и дисфонического голоса [4]. Результаты эксперимента представлены на рисунке 2.



(зеленый – нормальный голос, желтый – гипотонусная, красный – гипертонусная, синий – спазматическая)

Рисунок 2 – Результаты определения дисфонии голоса

У данного подхода имеется несколько недостатков:

- Отсутствие сравнительной характеристики с предыдущим состоянием голоса. Ввиду данного недостатка невозможно отделить врожденные нарушения от приобретенных.
- Отсутствие возможности диагностирования нескольких расстройств одновременно.

Определение формы, сложности и степени нарушения речевого тракта может быть произведена не только оценкой явных факторов – ухудшение слышимости, шероховатости и прерывистости речи, но и сверкой вектора голосовых характеристик нарушенного голоса с оригинальными показателями путем включения голосового отпечатка с симуляцией той или иной степени заболевания в качестве входных параметров.

Таким образом, необходимо произвести следующий ряд действий:

- получить голосовую запись диктора;
- коррекция голоса в соответствии с таблицей оценок [5], [6];
- получение голосовых отпечатков из скорректированных голосовых записей;

- обучение нейронной сети с использованием модифицированных голосовых отпечатков [7];
- ввод текущего голоса и нейросетевое сравнение с имеющимися отпечатками [8].

Заключение. Голосовой отпечаток может быть использован не только для средств контроля доступа, но и для оценки голосовых отклонений диктора. Очевидное преимущество данного подхода заключается в отсутствии непосредственного контакта с диктором и возможность удаленной диагностики, включая использование электронных средств связи. Так же данная процедура имеет возможность полной автоматизации и нетребовательна к ресурсам.

Литература

1. Universal developing of persons identification based on RFID / G.I. Raho [et al.] // Journal of emerging trends in computing and information sciences. – 2015. – Vol. 6, № 10. – P. 592–597.
2. Меньшаков, П.А. Методика голосовой идентификации на основе нейронных сетей / П.А. Меньшаков, И.А. Мурашко // Доклады БГУИР. – 2017. – № 4 (106). – С. 12–18.
3. Adeyemo, Z.K. Development of hybrid radio frequency identification and biometric security attendance system / Z.K. Adeyemo, O.J. Oyeyemi, I.A Akanbi // International journal of applied science and technology. – 2014. – Vol. 4, № 5. – P. 190–197.
4. Leinonen, L. Dysphonia detected by pattern recognition of spectral composition / L. Leinonen // Journal of speech, language, and hearing research. – 1992. – Vol. 35. – P. 287–295.
5. Biometrics, computer security systems and artificial intelligence applications / Ed. : K. Saeed, J. Pejas, R. Mosdorf. – Springer, 2006. – 345 p.
6. You, Y. Audio coding: theory and applications / Y. You. – NY : Springer, 2010. – 349 p.
7. Herbig, T. Self-learning speaker identification: a system for enhanced speech recognition / T. Herbig, F. Gerl, W. Minker. – Berlin : Springer Verlag GmbH, 2011. – 185 p.
8. Al-Shayea, Q.K. Speaker identification: a novel fusion samples approach / Q.K. Al-Shayea, M.S. Al-Ani // International journal of computer science and information security (IJCSIS). – 2016. – Vol. 14, № 7. – P. 423–427.

Метод синтеза результатов психологических тестирований в задаче принятия стратегических решений на примере профориентации

Н.Б. ОСИПЕНКО¹, А.Н. ОСИПЕНКО², Ю.А. СЛЕПЕНОК³

Статья описывает одну из подсистем разрабатываемого авторами метода автоматизации принятия стратегических решений, связанную с психологическим тестированием. Предлагаются алгоритмы проекций результатов тестирований пользователя на итоговое распределение значимостей тем деятельности. Апробация метода осуществлена на примере принятия решений о профориентации человека с помощью соответствующего сайта.

Ключевые слова: психологические тесты, темы человеческой деятельности, автоматизация профориентации.

One of the subsystems developed by the authors of the method of automating of making strategic decision related to psychological testing is described. Algorithms for projecting the results of user tests for the final distribution of the significance of the topics of activities are proposed. Approbation of the method is carried out on the example of making decisions about the career guidance of a person using the appropriate site.

Keywords: psychological tests, human activities, automation guidance.

Введение. Одной из важнейших проблем для большинства людей в последнее время становится проблема обуздания того потока информации, который обрушивается на них из Интернета, телевизора и других источников. Как разобраться во всем этом? Кому и чему довериться? Как сосредоточиться на том, что важно и нужно именно тебе, а не тем, кто хочет воспользоваться твоим вниманием в своих корыстных целях? Для частичного решения этой задачи авторы создали сайт, доступный в Интернете по ссылке gsu-psychoanalysis.tk и помогающий человеку отбирать варианты важных стратегических решений, ориентируясь, прежде всего, на особенности своего предназначения, на примере профориентации [1]. Ключевым вопросом здесь является процедура выявления особенностей предназначения или миссии конкретного человека. В том, что предназначение как таковое существует, большинство профессиональных гуманитариев не сомневается. Люди по всей планете пользуются для этих целей методами нумерологии, астрологии, картами Таро, Дизайном человека и т.п. Психологами разработано множество диагностических тестов, включая вербальные, визуальные и антропометрические [2], [3]. Каждый из всех этих методов не может дать достаточно убедительную картину предназначения человека, а только небольшой набор наиболее вероятных направлений деятельности с малой достоверностью. Поэтому встает проблема повышения надежности прогноза. Авторы для этой цели воспользовались идеей академика В.Н. Глушкова о синтезе надежной системы из ненадежных элементов. В статье [2] предложена методология и методическая схема такого синтеза.

В настоящей статье описываются психологические тесты и алгоритм свертки результатов опроса пользователя в итоговое распределение значимостей деятельности человека [1].

Описание психологических тестов. Для выполнения профориентации были разработаны, имплементированы и интегрированы психологические тесты с целью выявления индивидуально-типологических особенностей по различным предпочтениям: 1) цвета; 2) школьных предметов; 3) структуры конструктивного рисунка человека из геометрических фигур; 4) аспектов темперамента; 5) образов дороги жизни; 6) органов чувств; 7) вкуса; 8) стихий; 9) платоновых тел; 10) аспектов деятельности; 11) уровней деятельности; 12) геометрических фигур; 13) жанров фильмов. Опишем некоторые из реализованных тестов.

В тесте «Предпочтения цвета» сначала необходимо выбрать один из предложенных вариантов ответов (нравится, не нравится, нейтрально) по всем 12 вариантам цвета, далее сначала для первых семи (красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый) и затем для оставшихся пяти (черный, белый, коричневый, розовый, серебристо-серый), а потом выделить по одному наиболее и наименее привлекательным в каждой из групп цвета.

При обработке данных строится вектор $T1(i)$ размерности 16, каждый элемент вектора $T1(i)$, $i = 1, 12$ принимает значения $\{-1, 0, 1\}$, $T1(13)$ – номер самого привлекательного цвета из первых семи, $T1(14)$ – номер самого привлекательного из последних пяти, $T1(15)$ – номер самого непривлекательного цвета из первых семи, $T1(16)$ – номер самого непривлекательного из последних пяти. Далее значения $T1$ для самых привлекательных и непривлекательных цветов изменяются на $+2$ и -2 соответственно.

В тесте «Предпочтения школьных предметов» необходимо для 17 школьных предметов (труд, математика, музыка, ИЗО, язык, литература, иностранный язык, биология, история, география, химия, физика, информатика, физкультура, МХК, обществознание, ритмика) по десятибальной шкале отметить, в какой степени нравился школьный предмет и учитель по этому предмету. Из полученных ответов формируется матрица $Disc(i, k)$, $i = 1, 17$, $k = 1, 2$, где $k = 1$ соответствует оценке школьного предмета и $k = 2$ – учителя.

Используя статичную матрицу $School(i, j)$, $i = 1, 17$, $j = 1, 18$ соотношения 17 школьных предметов с 18 сферами деятельности [1] и динамичную матрицу результатов тестирования $Disc(i, k)$, $i = 1, 17$, $k = 1, 2$ строится вектор $T2(j)$, $j = 1, 18$ для каждой из 18 сфер деятельности ($j = 1, 18$):

$$T2(j) = \sum_{i=1}^{17} \{ (0.75 \cdot Disc(i, 1) + 0.25 \cdot Disc(i, 2)) \cdot School(i, j) \} / \sum_{i=1}^{17} School(i, j)$$

В тесте «Конструктивный рисунок человека из геометрических фигур» (рисунок 1) предлагается нарисовать состоящую из 8–15 элементов фигуру человека и подсчитать полученное в изображении количество треугольников (Т), кругов (С), прямоугольников (R).

Вопрос 1 из 3

Возьмите карандаш (ручку) и бумагу. Нарисуйте фигуру человека, составленную из 8-15 элементов, среди которых могут быть треугольники (triangle), круги (circle), прямоугольники (rectangle). Подсчитайте полученное в изображении количество треугольников, кругов, прямоугольников и отметьте полученный результат ниже. Если при рисовании Вы использовали фигур больше 15, то нужно зачеркнуть лишние или, если же Вами использовано фигур меньше, чем 8, необходимо дорисовать недостающие.

Сколько кругов было использовано вами?

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----

Рисунок 1 – Пример ответов на тест «Конструктивный рисунок человека из геометрических фигур»

Алгоритм обработки данных результатов тестирования с целью построения результирующего вектора $T3(j)$, $j = 1, 7$ представлен шестью этапами.

Этап 1. Пусть верхний порог $up = 0,38$, нижний порог $dp = 0,28$, $c = C / (C + R + T)$, $r = R / (C + R + T)$, $t = T / (C + R + T)$.

Этап 2. Определение наиболее значимого уровня U :

$U = \{1, \text{если } (c \leq dp, r \leq dp, t \geq up) | (dp < c \leq up, dp < r \leq up, dp < t \leq up) \& (C + R + T < 12);$

иначе 2, *если* $c \leq dp, r > up, t \leq dp$, *иначе* 3, *если* $c \leq dp, r > up, t > up$;

иначе 4, *если* $c > up, r \leq dp, t \leq dp$; *иначе* 5, *если* $c > up, r \leq dp, t > up$;

иначе 6, *если* $c > up, r > up, t \leq dp$;

иначе 7, *если* $(dp < c \leq up, dp < r \leq up, dp < t \leq up) \& (C + R + T \geq 12)$; *иначе* 0}.

Этап 3. Если $U = 0$, то $up = up - 0,01$, $dp = dp + 0,01$ и перерасчет U (на шаг 2), пока $up > dp$ или $U = 0$.

Этап 4. Если $U > 0$, то $T3(U) = T3(U) + 3$.

Этап 5. Определение наименее значимого уровня U :

$U = \{6, \text{если } U = 1 \ \& \ (c \leq dp, r \leq dp, t \leq up); \text{иначе } 5, \text{если } U = 2;$
иначе 4, если $U = 3$ *иначе* 3, если $U = 4$ *иначе* 2, если $U = 5$;
 иначе 1, если $U = 6$ или 7, *иначе* 7}.

Этап 6. $T3(U) = T3(U) - 3$.

В тесте «Предпочтения органов чувств» необходимо выбрать один из предложенных вариантов ответов о развитии (среднее, слабое, сильное) по пяти вариантам органов чувств: слух, обоняние, осязание, вкус, зрение; далее необходимо выбрать самый сильный, а затем – самый слабый из них.

При обработке данных строится вектор $T6(i)$, $i = 1, 7$ размерности 7, каждый элемент вектора $T6(i)$, $i = 1, 5$ принимает значения $\{-1, 0, 1\}$, $T6(6)$ – номер самого сильного, $T6(7)$ – слабого органов чувств. Далее значения $T6$ для самого сильного и самого слабого органов чувств изменятся на +2 и -2 соответственно.

В тесте «Предпочтения вкуса» (см. рисунок 2) необходимо выбрать один из предложенных вариантов ответов (нравится, не нравится, нейтрально) по пяти вариантам вкуса: соленый, острый, сладкий, горький, кислый. Далее предлагается почувствовать самую первую подсознательную реакцию и выбрать ответ, отвечая на вопрос: какой привкус еды или напитка самый любимый и нелюбимый.

Вопрос 1 из 7	Вопрос 6 из 7
Как вы относитесь к соленому?	Какой вкус вам нравится больше всего?
Нравится Нейтрально Не нравится	Соленый Острый Сладкий Горький Кислый

Рисунок 2 – Примеры ответов на тест «Предпочтения вкуса»

При обработке данных строится вектор $T7(i)$ размерности 7 аналогично тесту 6.

В тесте «Предпочтения платоновых тел» (рисунок 3) необходимо выбрать один из предложенных вариантов ответов восприятия платоновых тел (позитивное, нейтральное, негативное) по пяти вариантам: икосаэдр, октаэдр, гексаэдр (куб), тетраэдр, додекаэдр.

При обработке данных строится вектор $T9(i)$ размерности 7 аналогично тесту 6.

В тесте «Предпочтения аспектов деятельности» необходимо выбрать один из предложенных вариантов ответов об естественности (тяжело, нейтрально, сложно) выполнения аспектов деятельности: ориентируюсь (принимая решение), верю в дело, желаю и переживаю эмоции, люблю и выстраиваю взаимоотношения, воспринимаю и действую.

При обработке данных строится вектор $T10(i)$ размерности 7 аналогично тесту 6.

Попытайтесь почувствовать самую первую подсознательную реакцию, отвечая на вопрос о привлекательности

Вопрос 6 из 7

Какая фигура вам нравится больше всего?

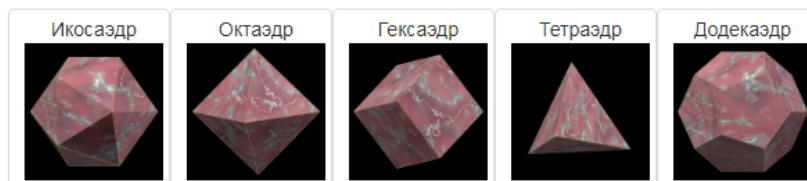


Рисунок 3 – Пример ответов на тест «Предпочтения платоновых тел»

В тесте «Предпочтения уровней деятельности» необходимо выбрать один из предложенных вариантов ответов об естественности (тяжело, нормально, легко) выполнения уровней деятельности: живу, общаюсь, думаю, вступаю в коллективные взаимодействия, лично развиваюсь, следуя своим ценностным установкам, одухотворяюсь (истиной, гармонией, красотой). Далее предлагается почувствовать самую первую подсознательную реакцию и выбрать ответ, отвечая на вопросы: какой из семи уровней деятельности наиболее и наименее естественен для Вас.

При обработке данных строится вектор $T11(i)$ размерности 9, каждый элемент вектора $T11(i)$, $i = 1, 7$ принимает значения $\{-1, 0, 1\}$, $T11(8)$ – номер самого привлекательного уровня деятельности, $T11(9)$ – самого непривлекательного уровня деятельности. Затем значения $T11$ для наиболее и наименее естественных уровней изменятся на $+2$ и -2 соответственно.

Аддитивная свертка результатов психологического тестирования. После проведения психологического тестирования осуществляется аддитивная свертка результатов психологического тестирования, проведенного на клиентской части приложения по тестам, описанным выше. Полученные результаты психологического тестирования хранятся в соответствующих массивах $T1, \dots, T13$ и далее осуществляется их проекция на ячейки таблицы тем деятельности [2].

Итоговые веса ячеек позволяют выделить наиболее, наименее значимые и нейтральные ячейки тем и сфер деятельности. Веса тестов в формуле свертки заданы априори. Предполагается, что по мере эксплуатации сайта и получения достаточного объема обучающей выборки людей, реализовавшихся в своей профессии, появится возможность оптимизировать набор тестовых весов в общей структуре модели прогноза.

Вначале подготовим промежуточную матрицу $SS(j, i)$, $j = 1, 8$, $i = 1, 5$ с результатами психологического тестирования. Пусть $SS(j, i) = 0$, $j = 1, 8$, $i = 1, 5$.

Тест 1. Пусть $Alf(1) = 1$. Цикл $j = 1, 7$; цикл $i = 1, 5$: $SS(j, i) = SS(j, i) + T1(j) \cdot Alf(1)$. Цикл $i = 1, 5$; цикл $j = 1, 7$ $SS(j, i) = SS(j, i) + T1(7 + i) \cdot Alf(1)$.

Тест 2. Пусть $Alf(2) = 1$; $ActCells(1, 1)$ – уровень 1-ой ячейки 1-ой сферы деятельности; $ActCells(1, 2)$ – ипостась 1-ой ячейки 1-ой сферы деятельности; $ActCells(1, 3)$ – уровень 2-ой ячейки 1-ой сферы деятельности; $ActCells(1, 4)$ – ипостась 2-ой ячейки 1-ой сферы деятельности. Приведем в таблице 1 их значения.

Таблица 1 – Значения $ActCells(l, k)$, $l = 1, 18$, $k = 1, 4$

№	k = 1	k = 2	k = 3	k = 4	№	k = 1	k = 2	k = 3	k = 4	№	k = 1	k = 2	k = 3	k = 4
1	8	1	7	3	7	6	4	2	5	13	3	2	2	1
2	7	2	7	4	8	1	4	4	5	14	4	2	5	3
3	4	1	5	5	9	2	3	2	2	15	6	3	1	3
4	6	5	7	5	10	5	4	6	2	16	5	1	3	4
5	3	5	3	3	11	6	1	2	4	17	1	1	4	4
6	3	1	5	2	12	7	1	1	5	18	4	3	1	2

Цикл $l = 1, 18$: $SS(ActCells(l, 1), ActCells(l, 2)) = SS(ActCells(l, 1), ActCells(l, 2)) + T2(l) \cdot Alf(2)$.
 $SS(ActCells(l, 3), ActCells(l, 4)) = SS(ActCells(l, 3), ActCells(l, 4)) + T2(l) \cdot Alf(2)$.

Тест 3. Пусть $Alf(3) = 1$. Цикл $j = 1, 7$; цикл $i = 1, 5$: $SS(j, i) = SS(j, i) + TT3(j, i) \cdot Alf(3)$.

Тест 4. Пусть $Alf(4) = 3$. Цикл $j = 1, 7$; цикл $i = 1, 5$: $SS(j, i) = SS(j, i) + TT4(j, i) \cdot Alf(4)$.

Тест 5. Пусть $Alf(5) = 0, 15$.

Цикл $l = 1, 18$: $SS(ActCells(l, 1), ActCells(l, 2)) = SS(ActCells(l, 1), ActCells(l, 2)) + TT5(l) \cdot Alf(5)$.
 $SS(ActCells(l, 3), ActCells(l, 4)) = SS(ActCells(l, 3), ActCells(l, 4)) + TT5(l) \cdot Alf(5)$.

Тест 6. Пусть $Alf(6) = 1$. Цикл $i = 1, 5$; цикл $j = 1, 7$: $SS(j, i) = SS(j, i) + TT6(j, i) \cdot Alf(6)$.

Тест 7. Пусть $Alf(7) = 0, 25$. Цикл $i = 1, 5$; цикл $j = 1, 7$: $SS(j, i) = SS(j, i) + TT7(j, i) \cdot Alf(7)$.

Тест 8. Пусть $Alf(8) = 1, 5$. Цикл $i = 1, 5$; цикл $j = 1, 7$: $SS(j, i) = SS(j, i) + TT8(j, i) \cdot Alf(8)$.

Тест 9. Пусть $Alf(9) = 0, 5$. Цикл $i = 1, 5$; цикл $j = 1, 7$: $SS(j, i) = SS(j, i) + TT9(j, i) \cdot Alf(9)$.

Тест 10. Пусть $Alf(10) = 1,5$. Цикл $i = 1,5$; цикл $j = 1,7$: $SS(j, i) = SS(j, i) + TT10(j, i) \cdot Alf(10)$.

Тест 11. Пусть $Alf(11) = 3$. Цикл $j = 1,7$; цикл $i = 1,5$: $SS(j, i) = SS(j, i) + TT11(j, i) \cdot Alf(11)$.

Тест 12. Пусть $Alf(12) = 0,15$. Цикл $i = 1,5$; цикл $j = 1,7$: $SS(j, i) = SS(j, i) + TT12(j, i) \cdot Alf(12)$.

Тест 13. Пусть $Alf(13) = 2$. Цикл $j = 1,7$; цикл $i = 1,5$: $SS(j, i) = SS(j, i) + TT13(j, i) \cdot Alf(13)$.

Итоговая аддитивная свертка результатов 13 тестов выполняется следующим образом. Пусть нормирующий множитель для $SS(8, I) = 8 \cdot SS(8, I)$. Пусть $KK(j, i)$, $j = 1,7$, $i = 1,5$; $KK(8, I)$ – матрица на базе обобщенного квадрата Пифагора, описанного в работе [1]. Пусть $Alf(14) = 15$.

Цикл $j = 1,7$; цикл $i = 1,5$:

$$SS(j, i) = SS(j, i) + Alf(14) \cdot (KK(j, i) \cdot 2) / (K_{max} - 2),$$

где $K_{max} = \overline{KPI}(i), i = \overline{1,9}$ – максимальное значение встречаемости для цифр обобщенного квадрата Пифагора.

Полученные результаты передаются на сервер для прогноза тем, сфер деятельности и профессий.

Заключение. Апробация сайта показала работоспособность предложенного метода синтеза результатов психологических тестирований в задаче принятия стратегических решений на примере профориентации. Дальнейшее развитие описываемой подсистемы видится в расширении спектра тестов и отбрасывании малоинформативных. Многим пользователям вообще не нужен адекватный совет, и они заходят на сайт из праздного любопытства, поэтому необходимо научиться фильтровать таких пользователей путем снижения веса их оценок выдаваемых сайтом решений.

Литература

1. Осипенко, А.Н. Автоматизация диагностики потенциальных качеств человека при выборе профессии / А.Н. Осипенко, Н.Б. Осипенко, Ю.А. Слепенко // Проблемы физики, математики и техники. – 2016. – № 3 (28). – С. 88–96.
2. Осипенко, Н.Б. Методологические аспекты автоматизации поддержки принятия стратегических решений / Н.Б. Осипенко, А.Н. Осипенко // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2016. – № 6 (99). – С. 59–64.
3. Осипенко, Н.Б. Пример применения метода корреляционно-регрессионного анализа в производственной проблеме / Н.Б. Осипенко [и др.] // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2011. – № 4 (67). – С. 59–64.

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

²Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого

ООО «ИВА-Гомель-Парк»

Поступила в редакцию 20.03.2018

Математика

УДК 519.854

Гарантированная оценка точности для задачи о рюкзаке с выпуклыми монотонными сепарабельными функциями

Н.С. БОГДАНОВА

Рассмотрена задача дискретной оптимизации – задача о рюкзаке с выпуклыми монотонными сепарабельными функциями. Представлены результаты вывода гарантированной оценки точности градиентного алгоритма, реализованного на аппроксимационной решетке.

Ключевые слова: гарантированная оценка, градиентный алгоритм, задача о рюкзаке, дискретная оптимизация.

The task of the discrete optimization – knapsack problem with convex separable monotonic functions is considered. The results of the finding of the guaranteed assessing the accuracy of the gradient algorithm implemented on the approximation lattice are presented.

Keywords: guaranteed assessing, gradient algorithm, knapsack problem, discrete optimization.

Введение. Модельная задача о рюкзаке относится к числу широко известных задач дискретной оптимизации. Были рассмотрены различные модификации задачи о рюкзаке. В частности, была изучена модель с дробимыми предметами и модель в многомерной постановке. Изучены модели, где булевозначные переменные были заменены переменными, которые принадлежат некоторому множеству неотрицательных целых чисел в ограниченном диапазоне [1]. Значимый вклад для расширения практической применимости рюкзаковых моделей дало исследование задачи о рюкзаке с нелинейными критериями, в частности, сепарабельными [2]. Актуальность исследования заключается в широкой распространенности и важности прикладных проблем, формулируемых в рамках задач рюкзачного типа.

Невозможность точного и эффективного решения широких классов задач дискретной оптимизации является одной из важнейших проблем. Достаточно хорошие результаты были получены в результате изучения небольшого класса задач, обладающих специальной структурой и построены более эффективные методы, основанные на изучении особенностей частных подклассов задач. Например, к задачам о покрытии были применимы методы отсечения, последовательностные схемы В.А. Емеличева хорошо применимы при решении задач о размещении, достаточно высокая эффективность метода ветвей и границ достигается при решении задач с ограничениями многократного выбора, градиентные алгоритмы хорошо применимы на матроидах [2].

Для приближенных алгоритмов основной проблемой является получение оценок точности. В работе [2] исследовалась эффективность субоптимальных алгоритмов решения различных случаев задачи рюкзачного типа: линейной $f_i(x_i) = c_i x_i$, с фиксированными доплатами $f_i(x_i) = c_i' x_i + c_i'' \text{sign} x_i$, выпуклой ($f_i(x_i)$ – дискретно-выпуклые функции). Полученные результаты исследования погрешности градиентных алгоритмов [2]–[5] показывают, что класс задач дискретной оптимизации, у которых градиентный экстремум совпадает с глобальным является не большим. Поэтому исследование оценок точности градиентных алгоритмов является весьма актуальным.

В данной статье выведена гарантированная оценка точности градиентного алгоритма, реализованного на аппроксимационной решетке, для задачи о рюкзаке с выпуклыми монотонными сепарабельными функциями.

Предварительные сведения.

Определение 1. [2] $(D, \prec)$ – множество D с заданным на нём частичным порядком $\prec$ (бинарное отношение) называется упорядоченным (сокращённо u -множеством).

Определение 2. [2] Пусть H – y -множество, функция $f : H \rightarrow R$ называется порядково-выпуклой на H , если

$$f(y) \leq \frac{f(x) + f(z)}{2} \quad \forall x, y, z \in H, x \prec y \prec z.$$

Определение 3. [2] Под гарантированной оценкой погрешности алгоритма A приближенного решения задач класса Ψ понимают такое число $\varepsilon \geq 0$, что

$$\frac{f(x^*) - f(x^A)}{f(x^*) - f(0)} \leq \varepsilon \quad (1)$$

или, если $f(0) = 0$, то

$$\frac{f(x^A)}{f(x^*)} \geq 1 - \varepsilon.$$

Здесь x^A – решение, полученное алгоритмом A .

Гарантированную оценку точности называют достижимой, если неравенство (1) обращается в равенство.

Можно вывести оценку качества градиентных решений, используя следующую методику [2, с. 108]. Пусть f^* – оптимальное значение целевой функции. Ввиду равенства

$$f(x^g) = \sum_{t=1}^k \Delta_t$$

нахождение гарантированной оценки точности сводится к вычислению $\min \sum_{t=1}^k \Delta_t'$, где

$$\Delta_t' = \frac{\Delta_t}{f^*}.$$

Величины Δ_t' относительных приращений целевой функции на каждом шаге алгоритма решения удовлетворяют некоторым условиям-неравенствам, которые становятся ограничениями в задаче.

Вывод гарантированной оценки точности.

Рассмотрим задачу о рюкзаке с монотонными сепарабельными функциями:

$$\sum_{i=1}^n f_i(x_i) \rightarrow \max, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n a_i(x_i) \leq b, \quad (3)$$

$$0 \leq x_i \leq h_i, \quad (4)$$

где $f_i(0) = 0$, $f_i(x_i)$ – неубывающие функции и $a_i(x_i)$ – линейные функции.

Суть подхода вывода гарантированной оценки точности состоит в том, что приближенное решение задачи (2) – (4) строится на аппроксимационной решетке $Z(\alpha^i)$, где:

$$a_{i+1} = \max \{[\alpha \cdot a_i], a_i + 1\}. \quad (5)$$

Узлами такой решетки являются числа $[\alpha^i]$, $\alpha \geq 1$, где $[x]$ обозначает целую часть числа x , i – целые неотрицательные степени числа α [6], [7]. В случае $\alpha = 1$ решетка $Z(\alpha^i)$ совпадает с решеткой Z^n и тогда гарантированная оценка точности равна $\frac{1}{2}$ [2].

Исследуем поведение градиентных алгоритмов для задачи (2)–(4) при $\alpha > 1$. Будем строить приближенное решение на решетке $Z(2^i)$. Градиенты в этом случае вычисляются только для значений x_i , которые являются степенями двойки. Алгоритм, строящий вектор градиентного типа, является полиномиальным.

Определим для каждой переменной $x_i = 1, 2, \dots, n$ все возможные значения:

$$s_i^{k_i} = \begin{cases} 0, & k_i = 0; \\ 2^{k_i-1}, & k_i = 1, 2, \dots, [\log_2 h_i]; \\ h_i, & k_i \geq [\log_2 h_i] + 1. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь $[\log_2 h_i]$ – наименьшее целое, не меньше $\log_2 h_i$.

Пусть x^* – оптимальное решение задачи (2)–(4). Для каждого i , $1 \leq i \leq m$ определим такое целое число p_i , что

$$s_i^{p_i-1} \leq x_i^* \leq s_i^{p_i}. \quad (7)$$

Если $x_i^* = 0$, то полагаем $p_i = 1$. Пусть

$$\Delta_i(y, x) = \frac{(f_i(y) - f_i(x))}{a_i(y - x)}.$$

В задаче (2)–(4) рассматриваются неубывающие функции, поэтому можно использовать следующую лемму.

Лемма 1. Для неубывающей функции $f_i(x_i)$ и $x^* > 0$ справедливо неравенство

$$\Delta_i(s_i^{p_i}, 0) \geq \frac{\Delta_i(x^*, 0)}{2}.$$

Доказательство: Исходя из соотношения (7) и монотонности функции f_i , выведем следующую цепочку:

$$\Delta_i(s_i^{p_i}, 0) = \frac{f_i(s_i^{p_i})}{a_i s_i^{p_i}} = \frac{1}{2} \frac{f_i(s_i^{p_i})}{a_i s_i^{p_i}} \frac{1}{\frac{1}{2}} \geq \frac{1}{2} \frac{f_i(x_i^*)}{a_i s_i^{p_i-1}} \geq \frac{1}{2} \frac{f_i(x_i^*)}{a_i x_i^*}.$$

Таким образом, получим:

$$\Delta_i(s_i^{p_i}, 0) \geq \frac{1}{2} \Delta_i(x^*, 0).$$

Лемма доказана.

Положим, что направление e_{i_r} движения на шаге r градиентного алгоритма выбирается следующим образом

$$i_r = \arg \max_{i \in \text{fes}^+(x^r, D)} \nabla_i^+ f(x^r) \beta(i, \lambda),$$

где $\beta(i, \lambda)$ – коэффициент растяжения градиента.

Введём обобщённый градиент:

$$\Delta_i(x) = \begin{cases} \nabla_i^+ f(x) / \beta_i, & \text{если } 1 \leq i \leq n, 0 \leq x_i \leq h_i, \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Алгоритм:

1. Пусть $b^0 = b$, $x^0 = (0, \dots, 0)$, $r = 1$, $i = 1, \dots, n$. Определяем индекс i_r , отвечающий максимальной величине $\Delta_i(x^r)$. Если $\Delta_{i_r}(x^r) \leq 0$, то переходим к п. 2. В противном случае полагаем,

$$x^r = x^{r-1} + e_{i_r},$$

$$b^r = b^{r-1} - a_{i_r}.$$

Если $b^r > 0$, то $r = r + 1$. Повторяем шаг r .

2. Если $b^{r-1} \geq 0$, то $x^A = x^{r-1}$. В противном случае в качестве x^A выбираем тот из векторов

$$x' = x^r - x^{r-1},$$

$$x'' = x^{r-1},$$

на котором достигается $\max\{f(x'), f(x'')\}$.

Суть алгоритма состоит в том, что на каждом шаге в силу (6) происходит расчет градиента для точек $s_i^{k_i}$ и выбирается направление, обеспечивающее максимальный градиент.

Лемма 2. Точка x^r , полученная на шаге r алгоритма, является решением в задаче (2)–(4) при условии, что

$$\sum_{i=1}^n a_i x_i^r = b.$$

Предположим, что r – последний шаг итерационного процесса п.1 алгоритма, тогда по лемме 2 либо в $\sum_{i=1}^n a_i x_i^A \leq \sum_{i=1}^n a_i x_i \leq b$ нет точек, удовлетворяющих (5) и (6), либо $\Delta_{i_r}(x^r) \leq 0$, то

x^A – решение задачи (2) – (4). Если эти условия не выполнены, то $\sum_{i=1}^n a_i x_i^r \geq b$, и поэтому x^r –

допустимый элемент в задаче (2) – (4) при $\sum_{i=1}^n a_i x_i^r = b$. Тогда в силу леммы 2 и (5) справедливо неравенство $f(x^r) \geq f(x^*)$, из которого следует, что

$$f(x') + f(x'') = f(x^r - x^{r-1}) + f(x^{r-1}) = \alpha \nabla_{i_r}^+ f(x^{r-1}) + f(x^{r-1}) \geq \alpha f(x^r) - f(x^{r-1}) + f(x^{r-1}) = \alpha f(x^r) \geq \alpha f(x^*).$$

Из полученных рассуждений, получим гарантированную оценку точности алгоритма

$$f(x^A) \geq \frac{(f(x') + f(x''))}{2} \geq \frac{\alpha}{2} f(x^*).$$

Заключение. В результате проведенных исследований найдена гарантированная оценка точности градиентного алгоритма, реализованного на решетке $Z(\alpha^i)$ при $\alpha > 1$, для задачи о рюкзаке с монотонными сепарабельными функциями. Принцип вывода гарантированной оценки точности может быть использован при построении и обосновании новых субоптимальных алгоритмов для модельных задач дискретной оптимизации.

Литература

1. Пападимитриу, Х.Х. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность / Х.Х. Пападимитриу, К. Стайглиц / пер. с англ. под ред. В. Б. Алексеева. – М. : Мир, 1985. – 510 с.
2. Ковалев, М.М. Матроиды в дискретной оптимизации / М.М. Ковалев. – Изд. 2-е. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 224 с.
3. Ковалев, М.М. Монотонные функции многозадачной логики и суперматроиды / М.М. Ковалев, П.Б. Миланов // Журнал вычисл. матем. и матем. физ. – 1984. – Т. 24, №5. – С. 786–790.
4. Емеличев, В.А. Оценки градиентных решений в специальных задачах максимизации выпуклых функций на целочисленной решетке / В.А. Емеличев, А.Б. Рамазанов // Известия АН БССР, Сер. физ.-мат. наук. – 1988. – № 6. – С. 20–25.
5. Ефимчик, Н.Е. О погрешности градиентного экстремума строго выпуклой функции дискретного аргумента / Н.Е. Ефимчик, А.Б. Рамазанов // Известия АН Беларуси, Сер. физ.-мат. наук. – 1996. – № 2. – С. 133.
6. Емельянченко, Н.С. Гарантированная оценка точности для модельной задачи о рюкзаке с выпуклыми монотонными сепарабельными функциями / Н.С. Емельянченко // Информационные технологии и системы 2012 (ИТС 2012) : материалы Междунар. науч. конф., Минск, 24 окт. 2012 г. : тез. докл. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол. : Л.Ю. Шилин (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2012. – С. 304–305.
7. Богданова, Н.С. Задача о рюкзаке с выпуклыми монотонными сепарабельными функциями / Н.С. Богданова // Информационные технологии и системы 2013 (ИТС 2013) : материалы Междунар. науч. конф., Минск, 23 окт. 2013 г. : тез. докл. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол. : Л.Ю. Шилин (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. – С. 244–245.

О пересечении A -допустимых Θ -подгрупп, не содержащих p -нильпотентный радикал

Е.Н. Бородич, Р.В. Бородич, Т.В. Бородич, А.В. Бузланов, М.В. Селькин

Исследовано строение подгруппы, равной пересечению ядер ненильпотентных максимальных A -допустимых Θ -подгрупп, не содержащих подгруппу Фиттинга. Установлено влияние соответствующей обобщенной подгруппы Фраттини на строение самой группы.

Ключевые слова: конечная группа, абнормальная подгруппа, подгруппа Фиттинга

The structure of a subgroup equal to the intersection of kernels Non-nilpotent Maximal A -admissible Θ -subgroups that do not contain Fitting subgroup. The influence of the corresponding generalized Frattini subgroup on the structure of the group itself is established.

Keywords: finite group, abnormal subgroup, Fitting subgroup.

1. Введение. Все рассматриваемые в статье группы предполагаются конечными. В теории конечных групп центральное место занимают объекты, экстремально расположенные в группе. К таким объектам в первую очередь относятся максимальные подгруппы. Одно из направлений теории пересечений максимальных подгрупп связано с задачей о свойствах пересечений заданных максимальных подгрупп и исследовании влияния этих свойств на подгрупповое и нормальное строение группы. Данное направление берет начало с работы Фраттини [1], установившего нильпотентность пересечения $\Phi(G)$ всех максимальных подгрупп конечной группы G . Полученные им результаты в дальнейшем развивались в работах многих авторов (см. монографии [2] и [3]).

В настоящее время одно из направлений развитие данной теории связано с исследованием пересечений максимальных подгрупп, не содержащих некоторую нормальную подгруппу конечной группы [4].

Данная работа посвящена развитию указанного направления в группах с операторами. Приведенные в статье определения, обозначения и некоторые следствия являются общепринятыми и их можно найти в монографиях [2] и [3].

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

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

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

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

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

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

Пусть даны группа G , множество A и отображение $f: A \rightarrow \text{End}(G)$, где $\text{End}(G)$ – гомоморфное отображение группы G в себя или эндоморфизм группы G . Подгруппа M на-

зывается A -допустимой, если M выдерживает действие всех операторов из A , то есть $M^\alpha \subseteq M$ для любого оператора $\alpha \in A$.

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

Пусть $\mathfrak{X}$ произвольный непустой класс групп. Сопоставим со всякой группой $G \in \mathfrak{X}$ некоторую систему подгрупп $\tau(G)$. Согласно [5] будем говорить, что τ – подгрупповой $\mathfrak{X}$ -функтор (подгрупповой функтор на $\mathfrak{X}$), если для всякого эпиморфизма $\phi: A \rightarrow B$, где $A, B \in \mathfrak{X}$, выполнены включения $(\tau(A))^\phi \subseteq \tau(B)$, $(\tau(B))^{\phi^{-1}} \subseteq \tau(A)$, и, кроме того, для любой группы $G \in \mathfrak{X}$ имеет место $G \in \tau(G)$.

Если $\mathfrak{X} = \mathfrak{G}$ – класс всех групп, то подгрупповой $\mathfrak{X}$ -функтор называют просто подгрупповым функтором.

В дальнейшем функтор θ будем называть абнормально полным, если для любой группы G среди множества $\theta(G)$ содержатся все абнормальные подгруппы группы G .

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

В дальнейшем для каждой группы G будем фиксировать некоторую ее группу операторов. Несложно заметить, что так как операторы действуют как соответствующие им автоморфизмы, то каждая характеристическая подгруппа является A -допустимой для произвольной группы операторов.

Подгруппа H группы G называется максимальной A -допустимой подгруппой в G , если H является A -допустимой и любая собственная A -допустимая подгруппа из G , содержащая H , совпадает с H .

Заметим, что максимальная A -допустимая подгруппа M либо целиком содержит p -нильпотентный радикал $F_p(G)$ группы G , либо $MF_p(G) = G$. Действительно. Так как произведение A -допустимых подгрупп A -допустимо и $F_p(G)$ – характеристическая подгруппа, а, следовательно, A -допустима, то $MF_p(G) = M$ или $MF_p(G) = G$. Аналогичные рассуждения верны и для p -нильпотентного корадикала.

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

1. $\overline{\Phi}_{\overline{F}_p}^p(G, A) = \cap \{M_G \mid M \not\supseteq F_p(G), M \not\supseteq G^\delta, M \notin \mathfrak{F}, M \in \theta(G), M \text{ – максимальная } A\text{-допустимая подгруппа}\};$
2. $\Phi_{\overline{F}_p}^p(G, A) = \cap \{M_G \mid M \not\supseteq F_p(G), M \not\supseteq G^\delta, M \in \theta(G), M \text{ – максимальная } A\text{-допустимая подгруппа}\};$
3. $\Phi_{\theta F_p}^p(G, A) = \cap \{M_G \mid M \supseteq F_p(G), M \not\supseteq G^\delta, M \in \theta(G), M \text{ – максимальная } A\text{-допустимая подгруппа}\};$
4. $\Phi_\theta^p(G, A) = \cap \{M_G \mid M \in \theta(G), M \not\supseteq G^\delta, M \text{ – максимальная } A\text{-допустимая подгруппа}\};$
5. $\Phi_\theta(G, A) = \cap \{M_G \mid M \in \theta(G), M \text{ – максимальная } A\text{-допустимая подгруппа}\}.$

Если A – единичная группа операторов, то будем использовать обозначения $\overline{\Phi}_{F_p}^p(G)$, $\Phi_{\overline{F}_p}^p(G)$, $\Phi_{\theta F_p}^p(G)$, $\Phi_\theta^p(G)$.

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

Введем следующие обозначения.

В случае, когда θ тривиальный функтор, то подгруппа $\Phi_\theta(G, A)$ совпадает с подгруппой $\Phi(G, A)$, некоторые свойства которой были описаны Л.Я. Поляковым в [6]. Если функтор θ абнормальный, то подгруппу $\Phi_\theta(G, A)$ будем обозначать $\Delta(G, A)$ (операторный аналог подгруппы Гашюца $\Delta(G)$, введенной в [7]). Напомним, что подгруппой Гашюца $\Delta(G)$ называют подгруппу, равную пересечению всех абнормальных максимальных подгрупп группы G .

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

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

Необходимо отметить, что не каждая максимальная подгруппа будет являться максимальной A -допустимой относительно некоторой группы операторов A , а так же не всякая максимальная A -допустимая подгруппа группы является максимальной подгруппой в этой же группе (см. [5]).

3. Вспомогательные результаты.

Лемма 3.1. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, Θ – абнормально полный подгрупповой функтор и $\Phi_\theta^p(G, A) \neq G$, тогда справедливы следующие утверждения:

1. $\Phi_\theta^p(G, A) \subseteq F_p(G)$, если G – разрешимая неединичная группа, то $\Phi_\theta^p(G, A) \subset F_p(G)$;
2. $F_p(G / \Phi_\theta^p(G, A)) = F_p(G) / \Phi_\theta^p(G, A)$.

Доказательство. Из работы [8] следует, что $\Phi_\theta^p(G, A)$ является p -нильпотентной подгруппой. Следовательно, $\Phi_\theta^p(G, A) \subseteq F_p(G)$. Пусть G – разрешимая неединичная группа. Тогда $G / \Phi_\theta^p(G, A)$ разрешима и неединична. Пусть $B / \Phi_\theta^p(G, A)$ – минимальная нормальная подгруппа в $G / \Phi_\theta^p(G, A)$. Так как $B / \Phi_\theta^p(G, A)$ – p -группа для некоторого простого p , а формация p -нильпотентных групп является нормально наследственной локальной формацией, содержащей все нильпотентные группы, то по теореме 3 из [8] B является p -нильпотентной, а это значит, что $B \subseteq F_p(G)$. Следовательно, $\Phi_\theta^p(G, A) \subset G$.

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

4. Основной результат.

Теорема 4.1. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, Θ – абнормально полный подгрупповой функтор, тогда справедливы следующие утверждения:

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

Доказательство. Подгруппы $\Phi_{\theta_{\overline{F}_p}}(G, A)$ и $\Phi_{\theta_{F_p}}(G, A)$ являются характеристическими в G и

$$\Phi_{\theta_{\overline{F}_p}}(G, A) \cap \Phi_{\theta_{F_p}}(G, A) = \Phi_\theta(G, A).$$

Для факторгруппы $G / \Phi_\theta(G, A)$ выполняется

$$F_p(G / \Phi_\theta(G, A)) = F_p(G) / \Phi_\theta(G, A),$$

поэтому

$$\Phi_{\theta_{\overline{F}_p}}(G/\Phi_\theta(G,A)) = \Phi_{\theta_{\overline{F}_p}}(G,A)/\Phi_\theta(G,A).$$

Предположим, что $\Phi_{\theta_{\overline{F}_p}}(G,A)/\Phi_\theta(G,A) \neq 1$ и пусть $K/\Phi_\theta(G,A)$ – минимальная нормальная подгруппа в $G/\Phi_\theta(G,A)$, содержащаяся в $\Phi_{\theta_{\overline{F}_p}}(G,A)/\Phi_\theta(G,A)$. Так как формация p -нильпотентных групп содержит формацию всех nilпотентных групп, то $K/\Phi_\theta(G,A)$ p -нильпотентна и по теореме 4.5 из [8] K является p -нильпотентной подгруппой. Следовательно, $K \subseteq F_p(G)$. Тогда

$$K \subseteq \Phi_{\theta_{\overline{F}_p}}(G,A) \cap \Phi_{\theta_{F_p}}(G,A),$$

получили противоречие. Значит, допущение не верно и $\Phi_{\theta_{\overline{F}_p}}(G,A)/\Phi_\theta(G,A) = 1$, а, значит, $\Phi_{\theta_{\overline{F}_p}}(G,A) = \Phi_\theta(G,A)$.

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

$$\Phi_{\theta_{F_p}}(G,A)/F_p(G) = \Phi_\theta(G/F_p(G),A),$$

следует, что подгруппа $\Phi_{\theta_{F_p}}(G,A) \in (\mathfrak{S}_p, \mathfrak{S}_p)^2$.

Следствие 4.1.1. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, Θ – абнормально полный подгрупповой функтор, тогда в разрешимой неединичной группе подгруппа $\Phi_{\theta_{\overline{F}_p}}(G,A)$ p -нильпотентна.

Если группа операторов A является тривиальной, то имеет место следующее:

Следствие 4.1.2. Пусть G – разрешимая группа, Θ – абнормально полный подгрупповой функтор. Тогда справедливы следующие утверждения:

1. если $G \neq 1$, то $\Phi_{\theta_{\overline{F}_p}}^p(G) = \Phi_\theta(G)$;
2. в любой не p -нильпотентной группе G подгруппа $\Phi_{\theta_{F_p}}(G) \in (\mathfrak{S}_p, \mathfrak{S}_p)^2$.

Следствие 4.1.3. Пусть Θ – абнормально полный подгрупповой функтор. В разрешимой неединичной группе подгруппа $\Phi_{\theta_{\overline{F}_p}}^p(G)$ p -нильпотентна.

Если группа операторов A является тривиальной и подгрупповой функтор Θ выделяет все максимальные подгруппы группы G , то имеет место следующее

Следствие 4.1.4. Пусть G – разрешимая группа. Тогда справедливы следующие утверждения:

1. если $G \neq 1$, то $\Phi_{\overline{F}_p}^p(G) = \Phi^p(G)$;
2. в любой не p -нильпотентной группе G подгруппа $\Phi_{\overline{F}_p}^p(G) \in (\mathfrak{S}_p, \mathfrak{S}_p)^2$.

Следствие 4.1.5. В разрешимой неединичной группе подгруппа $\Phi_{\overline{F}_p}^p(G)$ p -нильпотентна.

Если вместо формации p -нильпотентных групп выбрать формацию всех nilпотентных групп, то из следствия 4.1.4 вытекает результат из работы [4].

Теорема 4.2. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, Θ – абнормально полный подгрупповой функтор, G – разрешимая группа. Если $\overline{\Phi}_{\theta_{\overline{F}_p}}(G,A) \neq G$, то $\overline{\Phi}_{\theta_{\overline{F}_p}}(G,A) = \Phi_\theta(G,A)$.

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

$$\Phi_\theta(G, A) \subseteq \overline{\Phi}_\theta(G, A) \subseteq \overline{\Phi}_{\theta_{\overline{F}_p}}(G, A)$$

и согласно работе [8] $\Phi_\theta(G) = \overline{\Phi}_\theta(G, A)$.

Пусть подгруппа $\overline{\Phi}_{\theta_{\overline{F}_p}}(G, A)$ не совпадает с подгруппой $\overline{\Phi}_\theta(G, A)$, тогда $\overline{\Phi}_{\theta_{\overline{F}_p}}(G, A) / \overline{\Phi}_\theta(G, A) \neq 1$ и пусть $K / \overline{\Phi}_\theta(G, A)$ – минимальная нормальная подгруппа в $G / \overline{\Phi}_\theta(G, A)$, содержащаяся в $\overline{\Phi}_{\theta_{\overline{F}_p}}(G, A) / \overline{\Phi}_\theta(G, A)$. Так как формация p -нильпотентных групп содержит формацию всех nilпотентных групп, то $K / \overline{\Phi}_\theta(G, A)$ p -нильпотентна. Тогда на основании работы [8] следует, что K p -нильпотентная подгруппа. Следовательно, $K \subseteq F_p(G)$. Тогда

$$K \subseteq \overline{\Phi}_{\theta_{\overline{F}_p}}(G, A) \cap \overline{\Phi}_{\theta_{\overline{F}_p}}(G, A),$$

получили противоречие. Значит, допущение не верно и $\overline{\Phi}_{\theta_{\overline{F}_p}}(G, A) / \overline{\Phi}_\theta(G, A) = 1$, а, значит, $\overline{\Phi}_{\theta_{\overline{F}_p}}(G, A) = \Phi_\theta(G, A)$.

Применяя результат работы [8] и теорему 1 получаем следующее

Следствие 4.2.1. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, Θ – абнормально полный подгрупповой функтор, G – разрешимая группа. Если $\overline{\Phi}_{\theta_{\overline{F}_p}}(G, A) \neq G$, то $\overline{\Phi}_{\theta_{\overline{F}_p}}(G, A)$ p -нильпотентная подгруппа группы G .

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

Следствие 4.2.2. Пусть G – разрешимая группа, Θ – абнормально полный подгрупповой функтор. Если $\overline{\Phi}_{\theta_{\overline{F}_p}}(G) \neq G$, то $\overline{\Phi}_{\theta_{\overline{F}_p}}(G) = \Phi_\theta(G)$.

Следствие 4.2.3. Пусть G – разрешимая группа, Θ – абнормально полный подгрупповой функтор. Если $\overline{\Phi}_{\theta_{\overline{F}_p}}(G) \neq G$, то $\overline{\Phi}_{\theta_{\overline{F}_p}}(G)$ p -нильпотентная подгруппа группы G .

Если группа операторов A является тривиальной и подгрупповой функтор Θ выделяет все максимальные подгруппы группы G , то имеет место следующее

Следствие 4.2.4. Пусть G – разрешимая группа. Если $\overline{\Phi}_{\overline{F}_p}^p(G) \neq G$, то $\overline{\Phi}_{\overline{F}_p}^p(G) = \Phi^p(G)$.

Следствие 4.2.5. Пусть G – разрешимая группа. Если $\overline{\Phi}_{\overline{F}_p}^p(G) \neq G$, то $\overline{\Phi}_{\overline{F}_p}^p(G)$ p -нильпотентная подгруппа группы G .

Если вместо формации p -нильпотентных групп взять формацию nilпотентных групп, то из теоремы 4.4 получаем

Следствие 4.2.6. Пусть G – разрешимая группа. Если в группе G существуют ненильпотентные абнормальные максимальные подгруппы, не содержащие $F(G)$, то пересечение всех таких подгрупп совпадает с $\Delta(G)$.

Из следствия 4.2.6 вытекает соответствующий результат работы [4].

Литература

1. Frattini, G. Intorno alla generazione dei gruppi di operazioni / G. Frattini // Atti Acad. Dei lincei. – 1885. – Vol. 1. – P. 281–285.
2. Шеметков, Л.А. Формации конечных групп / Л.А. Шеметков. – М.: Наука, 1978. – 267 с.

3. Селькин, М.В. Максимальные подгруппы в теории классов конечных групп / М.В. Селькин. – Мн. : Беларуская навука, 1997. – 144 с.
4. Монахов, В.С. Замечания о максимальных подгруппах конечных групп / В.С. Монахов // Доклады НАН Беларуси. – 2003. – Т. 47, № 4. – С. 31–33.
5. Бородич, Р.В. Об $\mathfrak{F}$ -достижимых подгруппах в группах с операторами / Р.В. Бородич, Е.Н. Бородич, М.В. Селькин // Проблемы физики, математики и техники. – 2015. – № 2 (23). – С. 33–39.
5. Скиба, А.Н. Алгебра формаций / А.Н. Скиба. – Мн. : Беларуская навука, 1997. – 240 с.
6. Поляков, Л.Я. О конечных группах с заданной группой операторов / Л.Я. Поляков // Вопросы алгебры. – 1987. – Вып. 3. – С. 63–67.
7. Gaschütz, W. Über die Φ -Untergruppen endlicher Gruppen / W. Gaschütz // Math. Z. – 1953. – Bd. 58. – S. 160–170.
8. Бородич, Е.Н. О пересечении подгрупп в группах с операторами / Е.Н. Бородич, Р.В. Бородич, М.В. Селькин // Вестник БГУ. Сер.1. Физика. Математика. Информатика. – 2012. – № 1. – С. 54–62.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 27.04.2018

УДК 519.872.5:681.142.2

Симметричная маркерная кольцевая локальная сеть со случайным выбором дисциплины обслуживания с сокращением

В.В. БУРАКОВСКИЙ

Рассматривается симметричная кольцевая локальная сеть с протоколом маркерного доступа с N абонентскими станциями, на каждой из которых имеется буфер конечной емкости m . При поступлении маркера с вероятностью g_k включается дисциплина обслуживания с сокращением k , $1 \leq k \leq m$. Потоки поступающих сообщений предполагаются пуассоновскими, независимыми и одинаковой интенсивности λ для каждой станции. Получены матрично-векторная система, позволяющая вычислить стационарные вероятности, а также основные вероятностно-временные характеристики рассматриваемой локальной сети.

Ключевые слова: маркерная кольцевая локальная сеть, станция, сообщение, буфер конечной емкости, дисциплина обслуживания с сокращением k , стационарные вероятности состояний.

The symmetric token-passing ring local area network with N stations in which each station has a finite capacity m buffer is studied. When token arrives the service discipline decrementing k with the probability g_k , $1 \leq k \leq m$ is on. The message arrival streams at each station are assumed to be independent Poisson processes with the same rates λ . The matrix-vector system for the steady-state probabilities and main characteristics of the considered network are obtained.

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

Введение. Среди различных классов вычислительных сетей большой интерес для автоматизации производства, учрежденческой деятельности представляют локальные вычислительные сети (ЛВС). Применение ЛВС в настоящее время приобрело массовый характер во многих отраслях машиностроения, при подключении автоматизированных станций на заводах, в таких наукоемких отраслях как авиаприборостроение, ракетостроение и другие. Технология Token Ring (маркерное кольцо) получила распространение везде, где есть ответственные приложения, для которых важна не скорость, а надежность передачи информации. Поэтому представляет интерес проблема повышения эффективности их практического применения.

Протокол маркерного доступа Token Passing Ring [1, с. 101] – одна из самых эффективных схем, обеспечивающих связь между станциями в кольцевой сети передачи данных. Кольцевая ЛВС [2, с. 121] с маркерным доступом относится к протоколам детерминированного множественного доступа циклического типа. Она представляет собой совокупность абонентских станций (АС), соединенных последовательно двухточечными линиями. АС получают право на передачу данных при получении специального служебного кадра – маркера, циркулирующего по кольцу. Функционирование сети происходит в соответствии со стандартом ANSI/IEEE 802.5 [3, с. 24]. При поступлении маркера на АС может случайным образом подключаться дисциплина обслуживания сообщений с сокращением k (decrementing k) [4, с. 11]. Математическими моделями КЛВС с маркерным доступом являются циклические системы массового обслуживания [5, с. 64]. Адекватность математических моделей, описывающих КЛВС с дисциплиной обслуживания с сокращением k стоящих в буфере АС сообщений, проверялась при помощи разработанных имитационных моделей [6, с. 21]. Основные вероятностно-временные характеристики, полученные с помощью стационарных вероятностей состояний рассматриваемой сети, необходимы для анализа эффективности и оптимизации функционирования КЛВС [7, с. 9].

Описание математической модели. Рассматривается симметричная кольцевая локальная вычислительная сеть (КЛВС) с протоколом маркерного доступа (стандарт ANSI/IEEE 802.5). На каждой из абонентских станций кольца имеется конечный буфер емкости m ($m > 1$). Всего в сети N АС, связанных между собой моноканалом. АС занумерованы

таким образом, что номер станции увеличивается по направлению движения маркера по кольцу. При поступлении маркера на очередную АС случайным образом подключается одна из дисциплин обслуживания с сокращением k находящихся в буфере сообщений. С вероятностью g_k , $1 \leq k \leq m$, подключается соответствующая параметру k дисциплина обслуживания с сокращением. Данная дисциплина обслуживания сообщений предполагает, что маркер уходит из буфера АС после обслуживания r сообщений, где $r = \min(\zeta, k)$, ζ – число сообщений в буфере в момент поступления маркера на станцию, после чего маркер передается следующей станции. Дисциплина обслуживания с сокращением k обобщает ординарную (ordinary) и вентильную (gated) дисциплины обслуживания сообщений при $k = 1$ и $k = m$ соответственно.

Поступающие на каждую АС, независимо от номера, сообщения образуют простейший поток интенсивности λ . В момент поступления маркера на АС она может находиться в одном из $m + 1$ состояний в зависимости от числа сообщений, находящихся в буфере АС, с соответствующими вероятностями p_i , $0 \leq i \leq m$. Сообщения, поступающие на АС с полностью занятым буфером, теряются. После прихода маркера на АС начинается обслуживание имеющихся в буфере сообщений и полагается, что до ухода маркера со станции буфер блокируется для поступления новых сообщений.

Обозначим через δ время передачи сообщения между соседними АС. Для приема сообщения на АС – адресате необходимо время a . Время передачи (обслуживания) одного сообщения для любой станции $\Delta = N\delta + a$.

Будем считать, что если на рассматриваемой АС подключается дисциплина обслуживания с сокращением k , то и на всех АС до возвращения маркера на рассматриваемую станцию также происходит обслуживание согласно этой же дисциплине. При следующем поступлении маркера на рассматриваемую АС случайным образом опять для всех станций включается какая-то одна из дисциплин обслуживания с сокращением k стоящих в буферах сообщений.

Будем рассматривать состояния КЛВС в моменты поступления маркера на станции. Поскольку имеется очевидная симметрия процессов передачи сообщений в сети, исследуется произвольная АС кольца. Поведение рассматриваемой КЛВС в моменты поступления маркера на фиксированную АС описывается неприводимой, непериодической цепью Маркова.

Стационарные вероятности и вероятностно-временные характеристики функционирования сети. Процедура определения стационарных вероятностей состояний рассматриваемой КЛВС [8, с. 39]:

$$(p_0, p_1, \dots, p_m) = (p_0, p_1, \dots, p_m) \sum_{i=1}^k g_i Q_i,$$

$$\sum_{i=0}^m p_i = 1,$$

где Q_i – матрицы переходных вероятностей размерности $(m + 1) \times (m + 1)$ для дисциплины обслуживания с сокращением i , $1 \leq i \leq m$, соответственно.

Матрица переходных вероятностей для дисциплины обслуживания сообщений с сокращением i имеет вид:

$$Q_i = \begin{bmatrix} q_0 & q_1 & q_2 & \dots & q_{m-i} & q_{m-i+1} \dots q_{m-1} & q_m \\ q_0 & q_1 & q_2 & \dots & q_{m-i} & q_{m-1+1} \dots q_{m-1} & q_m \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_0 & q_1 & q_2 & \dots & q_{m-i} & q_{m-i+1} \dots q_{m-1} & q_m \\ 0 & q_0 & q_1 & \dots & q_{m-i+1} & q_{m-i+2} \dots q_{m-2} & q_{m-1} + q_m \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & q_0 & q_1 & \dots & q_i & \sum_{j=i+1}^m q_j \end{bmatrix},$$

а элементы ее вычисляются по формулам:

$$q_i = \sum_{k=0}^{(N-1)i} \frac{(\lambda(N\delta + k\Delta))^r}{r!} e^{-\lambda(N\delta + k\Delta)} \sum_{r_0=0}^{N-1} \dots \sum_{r_m=0}^{N-1} \frac{k!}{r_0! r_1! \dots r_m!} p_0^{r_0} p_1^{r_1} \dots p_m^{r_m}, 0 \leq i \leq m-1, q_m = 1 - \sum_{i=0}^{m-1} q_i.$$

Здесь должно также выполняться следующее условие:

$$\sum_{j=0}^m (jr_j I_{\{j \leq i\}} + ir_j I_{\{j > i\}}) = k.$$

Основными характеристиками, определяющими эффективность функционирования рассматриваемой КЛВС, являются следующие:

1. Коэффициент загрузки АС

$$KZ = 1 - p_0.$$

2. Средняя длина очереди на АС

$$L = \sum_{i=1}^m i p_i.$$

3. Средняя продолжительность обслуживания сообщений на АС

$$TM = \Delta \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m (p_i g_k k I_{\{i \geq k\}} + p_i g_k i I_{\{i < k\}}).$$

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

$$MS = \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^{Nk} g_k i \sum_{r_0=0}^N \dots \sum_{r_m=0}^N \frac{i!}{r_0! \dots r_m!} p_0^{r_0} \dots p_m^{r_m} I_{\{\sum_{j=0}^m (jr_j I_{\{j \leq k\}} + kr_j I_{\{j > k\}}) = i\}}.$$

5. Среднее время обращения маркера по кольцу

$$TL = N\delta + \Delta \times MS.$$

6. Среднее число поступивших на одну АС сообщений за время обращения маркера по кольцу

$$MNS = \lambda \times TL.$$

7. Среднее число сообщений, поступивших в КЛВС за время обращения маркера

$$MNR = N \times MNS.$$

8. Среднее число сообщений, оставшихся в буфере АС после обслуживания

$$MNM = \sum_{i=0}^m \sum_{k=1}^m p_i g_k (i - k) I_{\{i > k\}}.$$

9. Среднее число свободных мест в буфере АС после обслуживания

$$MNF = \sum_{i=0}^m \sum_{k=1}^m p_i g_k ((m - i + k) I_{\{i > k\}} + (m - i) I_{\{i \leq k\}}).$$

Заключение. В работе представлена математическая модель симметричной кольцевой локальной сети с протоколом маркерного доступа, на каждой станции которой имеется буфер конечной емкости. Обслуживание сообщений происходит по одной из k дисциплин с сокращением, которые подключаются к очереди случайным образом. Описанная модель основана на предположении о независимости процессов, протекающих на различных станциях. Она позволяет значительно сократить число состояний и упростить процедуру определения стационарных вероятностей сети по сравнению с несимметричной [9, с. 109], а также облегчить получение основных характеристик ее функционирования и построение имитационной модели. Локальные сети такого типа очень широко используются в настоящее время и проблемы их оптимизации, эффективности работы являются актуальными.

Литература

1. Takagi, H. Analysis of Polling Systems / H. Takagi. – Cambridge, M.A. : MIT Press, 1986. – 198 p.
2. Бакс, В. Кольцевые локальные сети с маркерным доступом и их производительность / В. Бакс // ТИИЭР. – 1989. – № 2. – С. 121–142.

3. ANSI/IEEE 802.5 Standard-1985. Token-passing ring access method and physical layer specification // IEEE Press. – 1985. – 89 p.
4. Бураковский, В.В. Локальные вычислительные сети: курс лекций / В.В. Бураковский, В.О. Родченко. – Гомель : УО «ГГУ им. Ф.Скорины», 2008. – 78 с.
5. Бураковский, В.В. Маркерная кольцевая локальная сеть с конечными буферами и ординарным обслуживанием сообщений / В.В. Бураковский // Сборник научных трудов. – 1998. – Вып. 1 : Аэрокосмическое приборостроение России. Сер. 2. Авионика. – С. 63–67.
6. Бураковский, В.В. Имитационная модель КЛВС с бесконечными буферами и вентильным обслуживанием / В.В. Бураковский // Efektivní nástroje moderních věd – 2013 : materiály IX mezinárodní vědecko-praktická conference, Praha, 27 dubna – 05 květn 2013 roku. – Díl 40 : Matematika. – Praha : Publishing House «Education and Science» s.r.o., 2013. – P. 19–22.
7. Бураковский, В.В. Кольцевая локальная сеть с протоколом маркерного доступа / В.В. Бураковский, Г.А. Медведев // Техника средств связи. Сер. Системы связи. – 1990. – Вып. 7. – С. 9–16.
8. Бураковский, В.В. Симметричная маркерная кольцевая локальная сеть со случайным выбором дисциплины обслуживания / В.В. Бураковский // Проблемы физики, математики и техники. – 2016. – № 2 (27). – С. 39–41.
9. Бураковский, В.В. Маркерная кольцевая локальная сеть со случайным выбором дисциплины обслуживания с сокращением / В.В. Бураковский // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2017. – № 3 (102). – С. 109–113.

Анализ сети с положительными заявками и сигналами различных типов в переходном режиме

Д.Я. Копать, М.А. МАТАЛЫЦКИЙ

Проведён анализ марковской G-сети с разнотипными положительными заявками и сигналами в переходном режиме. Сигнал при поступлении в систему уничтожает положительную заявку своего типа или перемещает заявку своего типа в другую систему. Потоки положительных заявок и сигналов, поступающих в каждую из систем сети, независимы. Выбор положительных заявок всех типов на обслуживание происходит случайным образом. Для нестационарных вероятностей состояний сети выведена система разностно-дифференциальных уравнений (РДУ) Колмогорова. Она решена с помощью модифицированного метода последовательных приближений, совмещённого с методом рядов. Доказана сходимость последовательных приближений с течением времени к стационарному распределению вероятностей, вид которого указан в статье, а сама последовательность приближений сходится к единственному решению системы РДУ. Любое последовательное приближение представимо в виде сходящегося степенного ряда с бесконечным радиусом сходимости, коэффициенты которого удовлетворяют рекуррентным соотношениям, что является удобным при расчётах на компьютерах.

Ключевые слова: G-сеть, переходный режим, метод последовательных приближений, совмещённый с методом рядов, разнотипные положительные заявки и сигналы.

An analysis of the Markov G-network with various positive applications and signals in a transient mode is carried out. A signal when entering the system destroys a positive application of its type or moves its application type to another system. Streams of positive applications and signals coming to each of the network systems are independent. The choice of positive applications for all types of service is random. For nonstationary probabilities of network states, a system of Kolmogorov's difference-differential equations (RDU) is derived. It is solved by a modified method of successive approximations, combined with the method of series. The convergence of successive approximations with time has been proved to the stationary distribution of probabilities, the form of which is indicated in the article, and the sequence of approximations converges to the unique solution of the RDU system. Any successive approximation is representable in the form of a convergent power series with an infinite radius of convergence, the coefficients of which satisfy recurrence relations, which is convenient for computer calculations.

Keywords: G-network, non-stationary regime, method of successive approximations, combined with the method of series, multiple positive customers and signals.

Введение. Впервые в рассмотрение G-сети ввёл Gelenbe в 1991 г. в статье [1]. В переходном режиме данная сеть рассмотрена в [2]. Данные сети имеют широкое практическое применение: в качестве модели нейронной сети [3], генных нормативных сетей [4], модели поведения компьютерных вирусов [5]. Понятие триггера было введено в рассмотрение Gelenbe в [6], в отличие от отрицательной заявки он не уничтожает одну положительную, а перемещает её в другую систему. Объединение триггера и отрицательной заявки в один объект – сигнал было введено в рассмотрение в стационарном режиме в статье [7], а в переходном – в [8]. В статьях [2] и [8] нестационарные вероятности состояний G-сети были найдены с помощью метода многомерных производящих функций. В статье [9] в рассмотрение были введены G-сети с положительными и отрицательными заявками многих классов, когда отрицательная заявка одного типа могла уничтожить с определённой вероятностью отрицательную заявку другого типа, были получены выражения в форме произведения для стационарных вероятностей состояния. В статье [10] была рассмотрена такая же сеть, но в переходном режиме в предположении, что отрицательная заявка может уничтожать положительную заявку только своего типа. С помощью модифицированного метода последовательных приближений, совмещённого с методом рядов, найдены нестационарные вероятности состояний. В статье [11] найдены стационарные вероятности состояний для сети с положительными заявками и сигналами многих типов.

Данная статья посвящена нахождению нестационарных вероятностей состояний сети, описанной в [11], модифицированным методом последовательных приближений, совмещённым с методом рядов.

Описание сети. Будем рассматривать открытую сеть массового обслуживания с n однолинейными системами массового обслуживания (СМО) и r типами положительных заявок и сигналов. В СМО S_i из внешней среды поступает простейший поток положительных заявок с интенсивностью λ^+ и дополнительный простейший поток сигналов с интенсивностью $\lambda^{(1)}$, $i = \overline{1, n}$. Все поступающие в сеть потоки заявок независимы. Каждая положительная заявка входного потока типа c независимо от других заявок направляется в СМО S_i с вероятностью p_{0ic}^+ , $\sum_{i=1}^n \sum_{c=1}^r p_{0ic}^+ = 1$. Длительности обслуживания положительных заявок типа c в этой СМО имеет экспоненциальное распределение с параметром μ_{ic} . Будем считать, что заявки на обслуживание выбираются случайно, а именно, если в i -той СМО находится k_{is} заявок класса s , то вероятность того, что на обслуживании в ней будет заявка класса c равна $\frac{k_{ic}}{\sum_{s=1}^r k_{is}}$, $i = \overline{1, n}$, $c = \overline{1, r}$.

После завершения обслуживания положительной заявки типа c в i -й СМО она с вероятностью $p_{ic0} = 1 - \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^r (p_{icjs}^+ + p_{icjs}^-)$ уходит из сети, а с вероятностью p_{icjs}^+ направляется в j -ю СМО опять в качестве положительной заявки типа s , и с вероятностью p_{icjs}^- в качестве сигнала типа s , $i, j = \overline{1, n}$.

Сигнал типа c , поступающий в i -ю СМО, в которой нет положительных заявок типа c , не оказывает на сеть никакого влияния и сразу исчезает из нее. В противном случае, когда в эту СМО поступает сигнал, может произойти следующее: поступающий сигнал мгновенно перемещает положительную заявку типа c из данной системы СМО в j -ю СМО в качестве положительной заявки типа s с вероятностью q_{icjs} , данное действие сигнала называют триггером; или сигнал срабатывает как отрицательная заявка типа c с вероятностью $q_{ic0} = 1 - \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^r q_{icjs}$ и уничтожает одну положительную заявку типа c .

Под состоянием нашей сети в момент времени t будем понимать вектор $(\vec{k}, t) = (k_{11}, k_{12}, \dots, k_{1r}, k_{21}, k_{22}, \dots, k_{2r}, \dots, k_{n1}, k_{n2}, \dots, k_{nr}, t)$, где k_{ic} – число положительных заявок типа c в i -той СМО, который образует цепь Маркова с непрерывным временем и счётным числом состояний. Нужно найти зависящие от времени вероятности состояний сети в переходном режиме.

Система разностно-дифференциальных уравнений Колмогорова для вероятностей состояний сети. Обозначим через I_{ic} вектор размерности $n \times r$, состоящий из нулей, кроме компоненты с номером $r(i-1) + c$, равной единице, I_{00} – нулевой $n \times r$ вектор, а $P(\vec{k}, t)$ – вероятность состояния $\vec{k}(t)$; $u(x) = \begin{cases} 1, x > 0 \\ 0, x \leq 0 \end{cases}$ – функцию Хевисайда.

Возможны следующие переходы нашей цепи Маркова в состояние $(\vec{k}, t + \Delta t)$ за время Δt :

- 1) из состояния $(\vec{k} - I_{js}, t)$, в этом случае в j -ю СМО за время Δt поступит положительная заявка типа s с вероятностью $\lambda^+ p_{0js}^+ u(k_{js}) \Delta t + o(\Delta t)$, $j = \overline{1, n}$, $s = \overline{1, r}$;
- 2) из состояния $(\vec{k} + I_{ic}, t)$, в данном случае в i -ю СМО за время Δt поступит сигнал типа c , который срабатывает как отрицательная заявка и уничтожит в ней положительную заявку

своего типа или после завершения обслуживания положительная заявка типа c уйдёт из сети, или переходит в j -тую СМО как сигнал типа s , но не обнаружит там положительных заявок данного типа с вероятностью

$$\left(\lambda^{(1)} p_{0ic}^- q_{ic0} + \mu_{ic} \frac{k_{ic} + 1}{\sum_{s=1}^r k_{is} + 1} p_{ic0} + \mu_{ic} \frac{k_{ic} + 1}{\sum_{s=1}^r k_{is} + 1} p_{icjs}^- (1 - u(k_{ic})) \right) \Delta t + o(\Delta t), i = \overline{1, n}, c = \overline{1, r};$$

3) из состояния $(\vec{k} + I_{ic} - I_{js}, t)$, при этом положительная заявка типа c после обслуживания в i -той СМО перейдёт в j -ю СМО в качестве положительной заявки типа s или сигнала типа c , который действует как триггер и сразу переместит положительную заявку из системы S_i в систему S_j в качестве положительной заявки типа s ; вероятность такого события равна

$$\left(\mu_{ic} \frac{k_{ic} + 1}{\sum_{s=1}^r k_{is} + 1} p_{icjs}^+ + \lambda^{(1)} p_{0ic} q_{icjs} \right) u(k_{js}) \Delta t + o(\Delta t), i, j = \overline{1, n};$$

4) из состояния $(\vec{k} + I_{ic} + I_{js}, t)$, при этом после окончания обслуживания положительной заявки типа c в СМО S_i она направится в СМО S_j в качестве сигнала типа c , который сработает в ней как отрицательная заявка типа s , уничтожит в S_j положительную заявку своего типа; вероятность такого события равна $\mu_{ic} \frac{k_{ic} + 1}{\sum_{s=1}^r k_{is} + 1} p_{icjs}^- q_{js0} \Delta t + o(\Delta t)$;

5) из состояния $(\vec{k} + I_{ic} + I_{js} - I_{ml}, t)$, в этом случае после окончания обслуживания заявки типа c в СМО S_i , она направится в СМО S_j как сигнал типа s , который мгновенно переместит положительную заявку своего типа из системы S_j в систему S_m как положительную заявку типа l ; вероятность такого события равна $\mu_{ic} \frac{k_{ic} + 1}{\sum_{s=1}^r k_{is} + 1} p_{icjs}^- q_{jm} u(k_{ml}) \Delta t + o(\Delta t)$;

6) из состояния $(\vec{k}, t)$, при этом в каждую СМО S_i , $i = \overline{1, n}$, не поступают ни положительные заявки любых типов, ни сигналы, или сигналы при поступлении не будут обнаруживать заявок своего типа и в них за время Δt не обслужилось ни одной заявки; вероятность такого события равна $1 - \sum_{i=1}^n \sum_{c=1}^r [\lambda_{0ic}^+ p_{0ic}^+ + \lambda_{0ic}^- p_{0ic}^- + \mu_{ic}] \Delta t + o(\Delta t)$, $i = \overline{1, n}$;

7) из остальных состояний с вероятностью $o(\Delta t)$.

Тогда, используя формулу полной вероятности и переходя к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$, можно получить систему разностно-дифференциальных уравнений (РДУ) для вероятностей состояний сети:

$$\begin{aligned} \frac{dP(\vec{k}, t)}{dt} = & - \sum_{i=1}^n \sum_{c=1}^r [\lambda_{0ic}^+ + \lambda_{0ic}^- + \mu_{ic}] P(\vec{k}, t) + \sum_{i=1}^n \sum_{c=1}^r \{ \lambda_{0ic}^+ u(k_{ic}) P(\vec{k} - I_{ic}, t) + \\ & + \left(\mu_{ic} \frac{k_{ic} + 1}{\sum_{s=1}^r k_{is} + 1} p_{ic0} + \lambda_{0ic}^- q_{ic0} \right) P(\vec{k} + I_{ic}, t) + \sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^r \left[\mu_{ic} \frac{k_{ic} + 1}{\sum_{s=1}^r k_{is} + 1} (1 - u(k_{js})) p_{icjs}^- P(\vec{k} + I_{ic}, t) + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left(\mu_{ic} \frac{k_{ic} + 1}{\sum_{s=1}^r k_{is} + 1} p_{icjs}^+ + \lambda_{0ic}^- q_{icjs} \right) u(k_{js}) P(\vec{k} + I_{ic} - I_{js}, t) + \mu_{ic} \frac{k_{ic} + 1}{\sum_{s=1}^r k_{is} + 1} p_{icjs}^- q_{js0} P(\vec{k} + I_{ic} + I_{js}, t) + \\
& + \sum_{m=1}^n \sum_{l=1}^r \mu_{ic} \frac{k_{ic} + 1}{\sum_{s=1}^r k_{is} + 1} p_{icjs}^- q_{ml} u(k_{ml}) P(\vec{k} + I_{ic} + I_{js} - I_{ml}, t) \Bigg\}. \quad (1)
\end{aligned}$$

Нахождение вероятностей состояний G-сети методом последовательных приближений. Систему РДУ (1) можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
\frac{dP(\vec{k}, t)}{dt} = & -\Lambda(\vec{k}) P(\vec{k}, t) + \sum_{i,j=1}^n \sum_{c,s=1}^r \Phi_{icjs}^{+-}(\vec{k}) P(\vec{k} + I_{ic} - I_{js}, t) + \\
& + \sum_{i,j=1}^n \sum_{c,s=1}^r \Phi_{icjs}^{++}(\vec{k}) P(\vec{k} + I_{ic} + I_{js}, t) + \sum_{i,j,m=1}^n \sum_{c,s,l=1}^r \Phi_{icjsml}^{++}(\vec{k}) P(\vec{k} + I_{ic} + I_{js} - I_{ml}, t), \quad (2)
\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
\Lambda(\vec{k}) = & \sum_{i=1}^n \sum_{c=1}^r [\lambda_{0ic}^+ + \lambda_{0ic}^- + \mu_{ic}], \quad \Phi_{icjs}^{+-}(\vec{k}) = \delta_{0i} \delta_{0c} \lambda_{0js}^+ u(k_{js}) + \delta_{0j} \delta_{0s} \left(\mu_{ic} \frac{k_{ic} + 1}{\sum_{s=1}^r k_{is} + 1} p_{ic0} + \lambda_{0ic}^- q_{ic0} \right) + \\
& + \mu_{ic} \frac{k_{ic} + 1}{\sum_{s=1}^r k_{is} + 1} (1 - u(k_{js})) p_{icjs}^- + \left(\mu_{ic} \frac{k_{ic} + 1}{\sum_{s=1}^r k_{is} + 1} p_{icjs}^+ + \lambda_{0ic}^- q_{icjs} \right) u(k_{js}), \quad \Phi_{icjs}^{++}(\vec{k}) = \mu_{ic} \frac{k_{ic} + 1}{\sum_{s=1}^r k_{is} + 1} p_{icjs}^- q_{js0}, \\
& \Phi_{icjsml}^{++}(\vec{k}) = \mu_{ic} \frac{k_{ic} + 1}{\sum_{s=1}^r k_{is} + 1} p_{icjs}^- q_{ml} u(k_{ml}), \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1, i = j \\ 0, i \neq j \end{cases}.
\end{aligned}$$

Решение системы (2) имеет вид

$$\begin{aligned}
P(\vec{k}, t) = & e^{-\Lambda(\vec{k})t} \left(P(\vec{k}, 0) + \int_0^t e^{\Lambda(\vec{k})x} \left(\sum_{i,j=1}^n \sum_{c,s=1}^r \Phi_{icjs}^{+-}(\vec{k}) P(\vec{k} + I_{ic} - I_{js}, x) + \right. \right. \\
& \left. \left. + \sum_{i,j=1}^n \sum_{c,s=1}^r \Phi_{icjs}^{++}(\vec{k}) P(\vec{k} + I_{ic} + I_{js}, x) + \sum_{i,j,m=1}^n \sum_{c,s,l=1}^r \Phi_{icjsml}^{++}(\vec{k}) P(\vec{k} + I_{ic} + I_{js} - I_{ml}, x) \right) dx \right). \quad (3)
\end{aligned}$$

Пусть $P_q(\vec{k}, t)$ – приближение $P(\vec{k}, t)$ на q -й итерации, $P_{q+1}(\vec{k}, t)$ – решение системы (2), полученное методом последовательных приближений. Тогда из (3) следует, что

$$\begin{aligned}
P_{q+1}(\vec{k}, t) = & e^{-\Lambda(\vec{k})t} \left(P(\vec{k}, 0) + \int_0^t e^{\Lambda(\vec{k})x} \left(\sum_{i,j=1}^n \sum_{c,s=1}^r \Phi_{icjs}^{+-}(\vec{k}) P_q(\vec{k} + I_{ic} - I_{js}, x) + \right. \right. \\
& \left. \left. + \sum_{i,j=1}^n \sum_{c,s=1}^r \Phi_{icjs}^{++}(\vec{k}) P_q(\vec{k} + I_{ic} + I_{js}, x) + \sum_{i,j,m=1}^n \sum_{c,s,l=1}^r \Phi_{icjsml}^{++}(\vec{k}) P_q(\vec{k} + I_{ic} + I_{js} - I_{ml}, x) \right) dx \right). \quad (4)
\end{aligned}$$

В качестве начального приближения для вероятности состояния $(\vec{k}, t)$ возьмём стационарную вероятность $P_0(\vec{k}, t) = P(\vec{k}) = \lim_{t \rightarrow \infty} P(\vec{k}, t)$, которая удовлетворяет соотношению

$$\Lambda(\vec{k}) P(\vec{k}) = \sum_{i,j=1}^n \sum_{c,s=1}^r \Phi_{icjs}^{+-}(\vec{k}) P(\vec{k} + I_{ic} - I_{js}) +$$

$$+ \sum_{i,j=1}^n \sum_{c,s=1}^r \Phi_{icjs}^{++}(\vec{k}) P_q(\vec{k} + I_{ic} + I_{js}) + \sum_{i,j,m=1}^n \sum_{c,s,l=1}^r \Phi_{icjsml}^{++}(\vec{k}) P_q(\vec{k} + I_{ic} + I_{js} - I_{ml}). \quad (5)$$

Для последовательных приближений справедливы следующие теоремы.

Теорема 1. Последовательные приближения $P_q(\vec{k}, t)$, $q = 0, 1, 2, \dots$, сходятся при $t \rightarrow \infty$ к стационарному решению системы уравнений (2), а сама последовательность $\{P_q(\vec{k}, t)\}$, $q = 0, 1, 2, \dots$, построенная по схеме (4), при любом ограниченном по t нулевом приближении $P_0(\vec{k}, t)$, $0 \leq P_0(\vec{k}, t) \leq 1$, сходится при $q \rightarrow \infty$ к единственному решению системы (2).

Теорема 1 доказываются аналогично как в [10] для сети с разнотипными положительными и отрицательными заявками.

Теорема 2. Любое приближение $P_q(\vec{k}, t)$, $q \geq 1$, представимо в виде сходящегося степенного ряда

$$P_q(\vec{k}, t) = \sum_{l=0}^{\infty} d_{ql}^{+-}(\vec{k}) t^l, \quad (6)$$

коэффициенты которого удовлетворяют рекуррентным соотношениям:

$$d_{q+l}^{+-}(\vec{k}) = \frac{-\Lambda(\vec{k})^l}{l!} \left\{ P(\vec{k}, 0) + \sum_{u=0}^{l-1} \frac{(-1)^{u+1} u!}{\Lambda(\vec{k})^{u+1}} D_{qu}^{+-}(\vec{k}) \right\}, l \geq 0, \\ d_{q0}^{+-}(\vec{k}) = P(\vec{k}, 0), d_{0l}^{+-}(\vec{k}) = P(\vec{k}, 0) \delta_{l0}, \quad (7)$$

$$D_{ql}^{+-}(\vec{k}) = \sum_{i,j=1}^n \sum_{c,s=1}^r \Phi_{icjs}^{+-}(\vec{k}) d_{ql}^{+-}(\vec{k} + I_{ic} - I_{js}) + \Phi_{icjs}^{++}(\vec{k}) d_{ql}^{+-}(\vec{k} + I_{ic} + I_{js}) + \\ + \sum_{i,j,m=1}^n \sum_{c,s,l=1}^r \Phi_{icjsml}^{++}(\vec{k}) d_{ql}^{+-}(\vec{k} + I_{ic} + I_{js} - I_{ml}).$$

Доказательство. Покажем, что коэффициенты степенного ряда (6) удовлетворяют рекуррентным соотношениям (7). Подставим последовательные приближения (6) в формулу (4). Тогда, учитывая, что

$$e^{-\Lambda(\vec{k})t} \int_0^t e^{\Lambda(\vec{k})x} x^l dx = \left[\frac{1}{\Lambda(\vec{k})} \right]^{l+1} l! \sum_{j=l+1}^{\infty} \frac{[-\Lambda(\vec{k})]^j}{j!}, l = 0, 1, 2, \dots,$$

будем иметь

$$\sum_{l=0}^{\infty} d_{ql}^{+-}(\vec{k}) t^l = e^{-\Lambda(\vec{k})t} P(\vec{k}, 0) + \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{i,j=1}^n \left[\sum_{c,s=1}^r \Phi_{icjs}^{+-}(\vec{k}) d_{ql}^{+-}(\vec{k} + I_{ic} - I_{js}) + \right. \\ \left. + \Phi_{icjs}^{++}(\vec{k}) d_{ql}^{+-}(\vec{k} + I_{ic} + I_{js}) + \sum_{i,j,m=1}^n \sum_{c,s,l=1}^r \Phi_{icjsml}^{++}(\vec{k}) d_{ql}^{+-}(\vec{k} + I_{ic} + I_{js} - I_{ml}) \right] t^l.$$

Используя обозначения (7), последний ряд можно записать в виде

$$\sum_{l=0}^{\infty} d_{ql}^{+-}(\vec{k}) t^l = e^{-\Lambda(\vec{k})t} P(\vec{k}, 0) + \sum_{l=0}^{\infty} D_{ql}^{+-}(\vec{k}) \left[\frac{1}{\Lambda(\vec{k})} \right]^{l+1} l! \sum_{u=l+1}^{\infty} \frac{[-\Lambda(\vec{k})]^u}{u!} t^u.$$

Поменяв местами индексы суммирования и разлагая $e^{-\Lambda(\vec{k})t}$ в ряд по степеням t , получим

$$\sum_{l=0}^{\infty} d_{ql}^{+-}(\vec{k}) t^l = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{[-\Lambda(\vec{k})]^l}{l!} \left\{ P(\vec{k}, 0) + \sum_{u=0}^{l-1} \frac{(-1)^{u+1} u!}{\Lambda(\vec{k})^{u+1}} D_{qu}^{+-}(\vec{k}) \right\} t^l. \quad (8)$$

Приравнявая в левой и правой части выражения (8) коэффициенты при t^l , получим соотношения (7) для коэффициентов ряда (6).

Для нахождения радиуса сходимости степенного ряда (6) нужно использовать формулу

Коши-Адамара: $\frac{1}{R(\vec{k})} = \lim_{l \rightarrow \infty} \sqrt[l]{|d_{ql}^{+-}(\vec{k})|}$. Аналогично как в [10] можно доказать, что радиус сходимости степенного ряда (6) равен $+\infty$.

Литература

1. Gelenbe, E. Product form queueing networks with negative and positive customers / E. Gelenbe // Journal of applied probability. – 1991. – Vol. 28, Is.1. – P. 656–663.
2. Matalytski, M. Non-stationary analysis of queueing network with positive and negative messages / M. Matalytski, V. Naumenko // Journal of applied mathematics and computational mechanics. – 2013. – Vol. 12, № 2. – P. 61–71.
3. Gelenbe, E. G-networks: a unifying model for neural and queueing networks / E. Gelenbe // Annals of operations research. – 1994. – Vol. 48. – P. 433–461.
4. Kim, H. G-networks towards synthetic biology / H. Kim, E. Gelenbe // A brief review. Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. – 2013. – Vol. 1. – P. 579–583.
5. Маталыцкий, М.А. Стохастические сети с нестандартными перемещениями заявок : монография / М.А. Маталыцкий, В.В. Наumenko. – Гродно : ГрГУ, 2016. – 348 с.
6. Gelenbe, E. G-networks with triggered customer movement / E. Gelenbe // Journal of applied probability. – 1993. – V. 30, is. 1. – P. 742–748.
7. Gelenbe, E. G-networks with signals and batch removal / E. Gelenbe // Probability in the engineering and informational sciences. – 1993. – Vol. 7. – P. 335–342.
8. Matalytski, M. Investigation of G-network with signals at transient behavior / M. Matalytski, V. Naumenko // Journal of applied mathematics and computational mechanics. – 2014. – Vol. 13, is. 1. – P. 75–86.
9. Fourneau, J.M. G-networks with multiple classes of negative and positive customers / J.M. Fourneau, E. Gelenbe, R. Suros // Theoretical computer science. – 1996. – Vol. 155. – P. 141–156.
10. Копать, Д.Я. Анализ сети с положительными и отрицательными заявками разных типов в переходном режиме / Д.Я. Копать, М.А. Маталыцкий // Вестник ГрГУ. Сер.2. – 2017. – № 3. – С. 150–161.
11. Gelenbe, E. G-networks with multiple classes of signals and positive customers / E. Gelenbe, A. Labed // European journal of operational research. – 1998. – Vol. 108. – P. 293–305.

Гродненский государственный
университет им. Я. Купалы

Поступила в редакцию 29.01.2018

Нередукивные однородные пространства и нормальные связности на них

Н.П. МОЖЕЙ

Приведено локальное описание трехмерных нередукивных однородных пространств с неразрешимой группой преобразований, допускающих нормальную связность. Локальное изучение однородных пространств равносильно исследованию пар, состоящих из алгебры Ли и ее подалгебры. Описаны в явном виде все инвариантные аффинные связности на найденных однородных пространствах, а также тензоры кривизны и кручения указанных связностей. Исследованы алгебры голономии и определено, когда инвариантная связность нормальна.

Ключевые слова: нормальная связность, однородное пространство, группа преобразований, алгебра Ли, редукивное пространство.

A local description of three-dimensional nonreducible homogeneous spaces with an unsolvable group of transformations admitting a normal connection is given. A local study of homogeneous spaces is equivalent to the investigation of pairs consisting of Lie algebra and its subalgebra. All explicit invariant affine connections on the homogeneous spaces found are explicitly described, as well as the curvature and torsion tensors of the indicated connections. The holonomy algebras are studied and determined when the invariant connection is normal.

Keywords: normal connection, homogeneous space, transformation group, Lie algebra, reductive space.

Введение. Теория связностей играет важную роль во многих областях математики и физики, например, в физических моделях связность позволяет определить ковариантную производную, которая используется для записи ковариантных уравнений; поля Янга-Миллса (калибровочные поля), лежащие в основе моделей математической физики, представляют собой компоненты локальной формы связности. Связность является нормальной, если каждый элемент группы преобразований отображает расслоение голономии в себя, тогда любое тензорное поле на многообразии инвариантно под действием этой группы. Исследование нормальной связности, наряду с другими условиями, позволяет получить далеко идущие результаты об изучаемых многообразиях (см., например, работы К. Яно, Ш. Исихара, Ж. Эрбахера, Б. Чена и др., обзор исследований этого направления дан в [1]). Нормальные связности эрмитовых и келеровых многообразий, их операторы кривизны и группы голономии рассматривали С. Акиба, И. Исихара, К. Сакамото и другие, изучением плоской нормальной связности занимались, например, Т. Оцуки, Х. Рекцигель, А.И. Фирсов, Б. Чен, Л. Верстрелен, Г. Врэнчану, подробнее с обзором работ по теории связностей можно ознакомиться в [2].

Если однородное пространство является редукивным, то оно всегда допускает инвариантную связность (см., например, [3]). Трехмерные нередукивные однородные пространства изучались автором в работах [4], [5], где приведен более подробный тематический обзор, а также дано обоснование применяемых методов; при изложении сохранены обозначения, введенные ранее. В данной работе также изучаются нередукивные пространства, но внимание сосредоточено на пространствах, допускающих нормальную связность.

Основные определения. Пусть M – дифференцируемое многообразие, на котором транзитивно действует группа $\bar{G}$, $G = \bar{G}_x$ – стабилизатор произвольной точки $x \in M$. Необходимое условие существования аффинной связности – представление изотропии для G должно быть точным, если $\bar{G}$ эффективна на $\bar{G}/G$ [3]. Опишем локально однородные пространства и связности на них. Пусть $\bar{\mathfrak{g}}$ – алгебра Ли группы Ли $\bar{G}$, а $\mathfrak{g}$ – подалгебра, соответствующая подгруппе G . Пара $(\bar{\mathfrak{g}}, \mathfrak{g})$ называется *изотропно-точной*, если точно изотропное представление подалгебры $\mathfrak{g}$. Однородное пространство *редуктивно*, если существует разложение $\bar{\mathfrak{g}} = \mathfrak{g} + \mathfrak{m}$, $\mathfrak{g} \cap \mathfrak{m} = 0$, $[\mathfrak{g}, \mathfrak{m}] \subset \mathfrak{m}$, в противном случае пространство не является редукивным. Там, где это не будет вызывать разночтения, будем отождествлять подпространство, дополнительное к $\mathfrak{g}$ в $\bar{\mathfrak{g}}$, и факторпространство $\mathfrak{m} = \bar{\mathfrak{g}}/\mathfrak{g}$. *Аффинной связностью* на паре $(\bar{\mathfrak{g}}, \mathfrak{g})$ называется такое отображение $\Lambda: \bar{\mathfrak{g}} \rightarrow \mathfrak{gl}(\mathfrak{m})$, что его ограничение на $\mathfrak{g}$ есть

изотропное представление подалгебры, а все отображение является $\mathfrak{g}$ -инвариантным. Тензор кручения $T \in \text{Inv}T_2^1(\mathfrak{m})$ и тензор кривизны $R \in \text{Inv}T_3^1(\mathfrak{m})$ для всех $x, y \in \bar{\mathfrak{g}}$ имеют вид: $T(x_m, y_m) = \Lambda(x)y_m - \Lambda(y)x_m - [x, y]_m$, $R(x_m, y_m) = [\Lambda(x), \Lambda(y)] - \Lambda([x, y])$. Тензоры кривизны и кручения играют важную роль в геометрии, их обращение в ноль является критерием локальной тривиальности связности и существования такой системы координат, в которой репер совпадает с координатным базисом касательного пространства.

Одной из важнейших характеристик связности является группа голономии. Алгебра Ли $\mathfrak{h}^*$ группы голономии инвариантной связности $\Lambda: \bar{\mathfrak{g}} \rightarrow \mathfrak{gl}(3, \mathbb{R})$ на паре $(\bar{\mathfrak{g}}, \mathfrak{g})$ – это подалгебра алгебры Ли $\mathfrak{gl}(3, \mathbb{R})$ вида $V + [\Lambda(\bar{\mathfrak{g}}), V] + [\Lambda(\bar{\mathfrak{g}}), [\Lambda(\bar{\mathfrak{g}}), V]] + \dots$, где V – подпространство, порожденное множеством $\{[\Lambda(x), \Lambda(y)] - \Lambda([x, y]) \mid x, y \in \bar{\mathfrak{g}}\}$. Положим $\mathfrak{a}$ равной подалгебре в $\mathfrak{gl}(3, \mathbb{R})$, порожденной $\{\Lambda(x) \mid x \in \bar{\mathfrak{g}}\}$. Связность нормальна, если $\mathfrak{h}^* = \mathfrak{a}$ (например, [3]).

Классификация нередуктивных пространств, допускающих нормальные связности. Будем описывать пару $(\bar{\mathfrak{g}}, \mathfrak{g})$ при помощи таблицы умножения алгебры Ли $\bar{\mathfrak{g}}$ с базисом $\{e_1, \dots, e_n\}$ ($n = \dim \bar{\mathfrak{g}}$), причем $\{e_1, \dots, e_{n-3}\}$ – базис $\mathfrak{g}$, а $\{u_1 = e_{n-2}, u_2 = e_{n-1}, u_3 = e_n\}$ – базис $\mathfrak{m}$. Для нумерации подалгебр используем запись $d.n$, а для нумерации пар – запись $d.n.m$, здесь d – размерность подалгебры, n – номер подалгебры в $\mathfrak{gl}(3, \mathbb{R})$, а m – номер пары $(\bar{\mathfrak{g}}, \mathfrak{g})$. В дальнейшем, если на параметры, появляющиеся в процессе классификации, накладываются дополнительные условия, то они записываются после таблицы умножения, в противном случае предполагается, что параметры пробегает все $\mathbb{R}$.

Теорема 1. Любое трехмерное нередуктивное однородное пространство, допускающее нормальную связность, такое, что $\bar{\mathfrak{g}}$ и $\mathfrak{g}$ неразрешимы, локально имеет вид

5.3.2.	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	u_1	u_2	u_3
e_1	0	0	e_2	0	e_1	$-3e_1$	$-(1/2)e_5 + (1/2)u_1$	$-e_4$
e_2	0	0	0	e_1	$-e_2$	$-3e_2$	$-e_3$	$(1/2)e_5 + (1/2)u_1$
e_3	$-e_2$	0	0	e_5	$-2e_3$	0	0	u_2
e_4	0	$-e_1$	$-e_5$	0	$2e_4$	0	u_3	0
e_5	$-e_1$	e_2	$2e_3$	$-2e_4$	0	0	u_2	$-u_3$
u_1	$3e_1$	$3e_2$	0	0	0	0	$-3u_2$	$-3u_3$
u_2	$(1/2)e_5 - (1/2)u_1$	e_3	0	$-u_3$	$-u_2$	$3u_2$	0	0
u_3	e_4	$-(1/2)e_5 - (1/2)u_1$	$-u_2$	0	u_3	$3u_3$	0	0

Для получения указанного результата найдены все трехмерные нередуктивные пары с неразрешимыми $\bar{\mathfrak{g}}$ и $\mathfrak{g}$ (с подробным описанием можно ознакомиться в [4]) и определена пара, допускающая нормальную связность.

Действительно, пусть $\mathfrak{g}$ имеет вид 5.3, т. е.

$$\begin{bmatrix} 0 & x & y \\ 0 & u & z \\ 0 & t & -u \end{bmatrix}.$$

Переменные обозначены латинскими буквами и принадлежат $\mathbb{R}$. Базис подалгебры выберем, придав одной из латинских переменных значение 1, а остальным 0, нумерация базисных векторов соответствует алфавиту. Нильпотентная подалгебра $\mathfrak{h}$ порождена вектором e_5 . Имеем $\mathfrak{g}^{(-1)}(\mathfrak{h}) = \mathbb{R}e_1$, $\mathfrak{g}^{(1)}(\mathfrak{h}) = \mathbb{R}e_2$, $\mathfrak{g}^{(2)}(\mathfrak{h}) = \mathbb{R}e_3$, $\mathfrak{g}^{(-2)}(\mathfrak{h}) = \mathbb{R}e_4$, $\mathfrak{g}^{(0)}(\mathfrak{h}) = \mathbb{R}e_5$, $U^{(0)}(\mathfrak{h}) = \mathbb{R}u_1$, $U^{(1)}(\mathfrak{h}) = \mathbb{R}u_2$, $U^{(-1)}(\mathfrak{h}) = \mathbb{R}u_3$. Тогда $[u_1, u_2] = a_2e_2 + \alpha_2u_2$, $[u_1, u_3] = b_1e_1 + \beta_3u_3$, $[u_2, u_3] = c_5e_5 + \gamma_1u_1$. Пусть $[e_1, u_3] = pe_4$, в силу тождества Якоби $a_2 = -3p\gamma_1/2$, $\alpha_2 = 0$, $b_1 = 3p\gamma_1/2$, $\beta_3 = 3p$, $c_5 = 3p\gamma_1/2$. При $p=0$ отображение $\pi: \bar{\mathfrak{g}}_1 \rightarrow \bar{\mathfrak{g}}$, $\pi(e_i) = e_i$, $i=1,5$, $\pi(u_1) = u_1$, $\pi(u_2) = u_2 - \gamma_1e_2$, $\pi(u_3) = u_3 + \gamma_1e_1$, покажет, что пара является редуктивной и не входит в рассматриваемый в работе класс, при $p \neq 0$ пара $(\bar{\mathfrak{g}}, \mathfrak{g})$ эквивалентна паре 5.3.2 посредством $\pi: \bar{\mathfrak{g}}_2 \rightarrow \bar{\mathfrak{g}}$, $\pi(e_1) = (1/3)e_1$, $\pi(u_1) = (p/2)u_1 - (3p/2)e_5$, $\pi(e_2) = (1/3)e_2$, $\pi(u_2) = 3pu_2 + (1/3)e_2$, $\pi(e_3) = e_3$, $\pi(u_3) = 3pu_3 - (p/6)e_1$, $\pi(e_4) = e_4$, $\pi(e_5) = e_5$. Поскольку $\bar{\mathfrak{g}}_2$ проста, а $\bar{\mathfrak{g}}_1$ нет, найденные пары не эквивалентны. В случае 5.3.2 найдем инвариантные аффинные связности. Пусть здесь и далее

$$\Lambda(u_1) = \begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & p_{1,3} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & p_{2,3} \\ p_{3,1} & p_{3,2} & p_{3,3} \end{pmatrix}, \Lambda(u_2) = \begin{pmatrix} q_{1,1} & q_{1,2} & q_{1,3} \\ q_{2,1} & q_{2,2} & q_{2,3} \\ q_{3,1} & q_{3,2} & q_{3,3} \end{pmatrix}, \Lambda(u_3) = \begin{pmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} \\ r_{3,1} & r_{3,2} & r_{3,3} \end{pmatrix}$$

для некоторых $p_{i,j}, q_{i,j}, r_{i,j} \in \mathbb{R}$ (при $i, j = \overline{1,3}$). Так как $[\Lambda(e_1), \Lambda(u_1)] = \Lambda([e_1, u_1]) \Rightarrow [\Lambda(e_1), \Lambda(u_1)] = -3\Lambda(e_1)$, имеем $p_{2,2} = p_{1,1} - 3$, $p_{2,3} = p_{2,1} = p_{3,1} = 0$. Поскольку $[\Lambda(e_2), \Lambda(u_1)] = \Lambda([e_2, u_1]) \Rightarrow [\Lambda(e_2), \Lambda(u_1)] = -3\Lambda(e_2)$, $p_{3,3} = p_{1,1} - 3$, $p_{3,2} = 0$. Так как $[\Lambda(e_3), \Lambda(u_1)] = 0$, то $p_{1,2} = 0$. Если $[\Lambda(e_4), \Lambda(u_1)] = 0$, то $p_{1,3} = 0$. Поскольку $[\Lambda(e_2), \Lambda(u_2)] = -\Lambda(e_3)$, $q_{3,1} = q_{3,2} = 0$, $q_{3,3} = q_{1,1}$, $q_{2,1} = 2$. Так как $[\Lambda(e_1), \Lambda(u_2)] = (1/2)\Lambda(u_1) - (1/2)\Lambda(e_5)$, $q_{1,1} = 2$, $q_{2,2} = q_{1,1}$, $q_{2,3} = 0$. Если $[\Lambda(e_3), \Lambda(u_2)] = 0$, то $q_{1,2} = 0$. Поскольку $[\Lambda(e_4), \Lambda(u_2)] = \Lambda(u_3)$, $r_{1,1} = 0$, $r_{1,2} = q_{1,3}$, $r_{1,3} = r_{2,1} = r_{2,2} = r_{2,3} = 0$, $r_{3,1} = 2$, $r_{3,2} = r_{3,3} = 0$. Так как $[\Lambda(e_5), \Lambda(u_2)] = \Lambda(u_2)$, $p_{1,1} = 0$. Получим, что аффинная связность имеет вид

$$\Lambda(u_1) = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}, \Lambda(u_2) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -r_{1,2} \\ 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \Lambda(u_3) = \begin{pmatrix} 0 & r_{1,2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

для любого $r_{1,2} \in \mathbb{R}$ (для остальных базисных векторов условия выполняются). Тензор кривизны —

$$R(u_1, u_2) = [\Lambda(u_1), \Lambda(u_2)] - \Lambda([u_1, u_2]) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -6r_{1,2} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$R(u_1, u_3) = [\Lambda(u_1), \Lambda(u_3)] - \Lambda([u_1, u_3]) = \begin{pmatrix} 0 & 6r_{1,2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$R(u_2, u_3) = [\Lambda(u_2), \Lambda(u_3)] - \Lambda([u_2, u_3]) = \begin{pmatrix} -4r_{1,2} & 0 & 0 \\ 0 & 2r_{1,2} & 0 \\ 0 & 0 & 2r_{1,2} \end{pmatrix}.$$

Тензор

кривизны

—

 $T(u_1, u_2) = T(u_1, u_3) = 0$,

$T(u_2, u_3) = \Lambda(u_2)(u_3)_{\mathfrak{m}} - \Lambda(u_3)(u_2)_{\mathfrak{m}} - [u_2, u_3]_{\mathfrak{m}} = (-2r_{1,2}, 0, 0)$. При $r_{1,2} \neq 0$ алгебра, порожденная мно-

жеством $V = \{[\Lambda(x), \Lambda(y)] - \Lambda([x, y]) \mid x, y \in \bar{\mathfrak{g}}\}$, т. е. $R(u_i, u_j)$, имеет вид $\begin{pmatrix} 2p_1 & p_2 & p_3 \\ 0 & -p_1 & 0 \\ 0 & 0 & -p_1 \end{pmatrix}$,

она не совпадает с алгеброй голономии (не является совершенной), так как алгебра голономии — $\mathfrak{sl}(3, \mathbb{R})$. В данном случае $\mathfrak{a}_{\bar{\mathfrak{g}}} = \Lambda(\bar{\mathfrak{g}})$ и $\mathfrak{h}^* = \mathfrak{a}_{\bar{\mathfrak{g}}}$, т. е. связность нормальна (при $r_{1,2} \neq 0$). При $r_{1,2} = 0$ алгебра голономии нулевая и связность не является нормальной. Прямыми вычислениями получаем, что других трехмерных нередуцируемых неразрешимых пар, допускающих нормальную связность, не существует.

Теорема 2. Все трехмерные нередуцируемые однородные пространства, допускающие нормальную связность, такие, что $\bar{\mathfrak{g}}$ неразрешима, а $\mathfrak{g}$ разрешима, локально имеют следующий вид:

1.5.19.	e_1	u_1	u_2	u_3	,		e_1	u_1	u_2	u_3	
e_1	0	e_1	0	u_1			0	e_1	0	$2e_1$	e_2
u_1	$-e_1$	0	0	u_3			0	0	$2e_1$	e_2	u_1
u_2	0	0	0	0			0	0	$2e_1$	e_2	u_1
u_3	$-u_1$	$-u_3$	0	0			0	0	$2e_1$	e_2	u_1

Далее тензоры кривизны R описаны через $R(u_1, u_2)$, $R(u_1, u_3)$, $R(u_2, u_3)$, а тензоры кручения T – через $T(u_1, u_2)$, $T(u_1, u_3)$, $T(u_2, u_3)$. В случаях 3.25.30, 2.17.27, 1.5.19 $\bar{g}$ не является полупростой, ее радикал коммутативен, в случаях 4.21.11 ($\mu=0$), 3.13.6 ($\mu=0, -1$), 2.8.7 ($\lambda=0$) $\bar{g}$ также не является полупростой, ее радикал некоммутативен, в этих случаях тензоры кривизны и кручения имеют вид, приведенный в таблицах 2 и 3 соответственно.

Таблица 2 – Тензоры кривизны

Пара	Тензор кривизны
3.25.30	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & p_{1,3} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & -p_{1,3} & p_{1,3}^2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -2r_{1,1} & 0 & 2q_{1,3}p_{1,3}-3r_{1,3} \\ 0 & -p_{1,3}-2r_{1,1} & p_{1,3}^2 \\ 0 & 0 & -p_{1,3}-2r_{1,1} \end{pmatrix}$
2.17.27	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -3q_{1,3} \\ 0 & 0 & p_{1,3}-2q_{2,3} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -p_{1,3}-2r_{1,1} & 3q_{1,3} & -4r_{1,3}+p_{1,3}^2+q_{1,3}p_{2,3} \\ 0 & -2r_{1,1}-2p_{1,3}+2q_{2,3} & p_{2,3}p_{1,3}+p_{2,3}q_{2,3}-3r_{2,3} \\ 0 & 0 & -p_{1,3}-2r_{1,1} \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} -2q_{1,3} & 0 & q_{1,3}p_{1,3}+q_{1,3}q_{2,3} \\ p_{1,3}-2q_{2,3} & q_{1,3} & -r_{1,3}+q_{1,3}p_{2,3}+q_{2,3}^2 \\ 0 & 0 & q_{1,3} \end{pmatrix}$
1.5.19	$\begin{pmatrix} 0 & -q_{1,2}/2+p_{1,2}q_{2,2}-q_{1,1}p_{1,2} & -q_{1,3}+p_{1,2}q_{2,3}-q_{1,2}p_{2,3} \\ 0 & 0 & p_{2,3}q_{1,1}-q_{2,2}p_{2,3}-q_{2,3}/2 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$ $\begin{pmatrix} -p_{1,2}p_{2,3}-p_{1,3}/2-r_{1,1} & -3r_{1,2}/2+p_{1,2}r_{2,2}+p_{1,3}p_{1,2}-r_{1,1}p_{1,2} & A \\ 0 & 2p_{1,2}p_{2,3}-r_{2,2} & B \\ 0 & 0 & C \end{pmatrix},$ $A = -2r_{1,3} + p_{1,2}r_{2,3} + p_{1,3}^2 - r_{1,2}p_{2,3}, B = p_{2,3}r_{1,1} + 2p_{2,3}p_{1,3} - r_{2,2}p_{2,3} - 3r_{2,3}/2,$ $C = -p_{1,2}p_{2,3} - p_{1,3}/2 - r_{1,1},$ $\begin{pmatrix} -q_{1,2}p_{2,3}-q_{1,3}/2 & q_{1,1}r_{1,2}+q_{1,2}r_{2,2}+ & D \\ & +q_{1,3}p_{1,2}-r_{1,1}q_{1,2}-r_{1,2}q_{2,2} & \\ p_{2,3}q_{1,1}-q_{2,2}p_{2,3}-q_{2,3}/2 & p_{1,2}q_{2,3}+q_{1,2}p_{2,3} & H \\ 0 & q_{1,1}p_{1,2}+q_{1,2}/2-p_{1,2}q_{2,2} & q_{1,3}/2-p_{1,2}q_{2,3} \end{pmatrix},$ $D = q_{1,2}r_{2,3} + q_{1,3}p_{1,3} - r_{1,2}q_{2,3}, H = q_{2,2}r_{2,3} + q_{2,3}r_{1,1} + q_{2,3}p_{1,3} + p_{2,3}q_{1,3} - r_{2,2}q_{2,3} - r_{2,3}q_{1,1}$
4.21.11, $\mu=0$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -p_{1,3} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & p_{1,3} & p_{1,3}^2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2r_{1,1} & 0 & 0 \\ 0 & p_{1,3}+2r_{1,1} & p_{1,3}^2 \\ 0 & 0 & p_{1,3}+2r_{1,1} \end{pmatrix}$
3.13.6, $\mu=0$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -q_{2,3}+2p_{1,3} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & -2p_{1,3}+q_{2,3} & -r_{2,3}+p_{1,3}^2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$ $\begin{pmatrix} -2r_{1,1} & 0 & 0 \\ 0 & q_{2,3}-2r_{1,1}-2p_{1,3} & -4r_{2,3}+q_{2,3}^2 \\ 0 & 0 & q_{2,3}-2r_{1,1}-2p_{1,3} \end{pmatrix}$
3.13.6, $\mu=-1$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3p_{2,3} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} p_{2,3} & 0 & 0 \\ 0 & -2p_{2,3} & 0 \\ 0 & 0 & p_{2,3} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 3p_{2,3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

Окончание таблицы 2

2.8.7, $\lambda=0$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -q_{2,3}/2 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -p_{1,3}/2-r_{1,1} & 0 & -2r_{1,3}+p_{1,3}^2 \\ 0 & -r_{2,2} & 0 \\ 0 & 0 & -p_{1,3}/2-r_{1,1} \end{pmatrix},$ $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -q_{2,3}/2 & 0 & q_{2,3}r_{1,1}+q_{2,3}p_{1,3}-r_{2,2}q_{2,3} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
--------------------	---

Таблица 3 – Тензоры кручения

Пара	Тензор кручения
3.25.30	$(0,0,0), (p_{1,3}-r_{1,1}, 0, 0), (2q_{1,3}, p_{1,3}-r_{1,1}, 0)$
2.17.27	$(0,0,0), (p_{1,3}-r_{1,1}, 2p_{2,3}, 0), (2q_{1,3}, 2q_{2,3}-r_{1,1}-p_{1,3}, 0)$
1.5.19	$(p_{1,2}-q_{1,1}, 0, 0), (p_{1,3}-r_{1,1}, 2p_{2,3}, 0), (q_{1,3}-r_{1,2}-q_{2,3}-r_{2,2}q_{1,1}-p_{1,2})$
4.21.11, $\mu=0$	$(0,0,0), (p_{1,3}-r_{1,1}, 0, 0), (0, p_{1,3}-r_{1,1}, 0)$
3.13.6, $\mu=0$	$(0,0,0), (p_{1,3}-r_{1,1}, 0, 0), (0, 2q_{2,3}-r_{1,1}-p_{1,3}, 0)$
3.13.6, $\mu=-1$	$(0,0,0), (0, 2p_{2,3}, 0), (0,0,0)$
2.8.7, $\lambda=0$	$(0,0,0), (p_{1,3}-r_{1,1}, 0, 0), (0, q_{2,3}-r_{2,2}, 0)$

Для пары 4.21.11 ($\mu=0$) связность нормальна, если $p_{1,3} \neq 2r_{1,1} \neq 0$, тогда алгебра голоно-

мии $\begin{pmatrix} p_1 & p_2 & p_3 \\ 0 & p_4 & p_5 \\ 0 & p_6 & -p_4 \end{pmatrix}$. У пары 3.13.6 ($\mu=0$) связность является нормальной при

$q_{2,3} = 2r_{1,1} + 2p_{1,3}$, $r_{1,1} \neq 0$, $r_{2,3} \neq (q_{2,3}^2 + q_{1,3}^2)/4$, тогда алгебра голономии $\begin{pmatrix} p_1 & p_2 & p_3 \\ 0 & p_4 & p_5 \\ 0 & p_6 & -p_4 \end{pmatrix}$, при $\mu=-1$

связность нормальна, если $p_{2,3} \neq 0$, алгебра голономии – $\mathfrak{sl}(3, \mathbb{R})$. У пары 3.25.30 связность

нормальна, если $p_{1,3} \neq 0$, $\gamma = 2r_{1,1}/p_{1,3}$, алгебра голономии – $\begin{pmatrix} \gamma p_6 & p_2 & p_1 \\ 0 & p_4 + (1+\gamma)p_6 & p_3 \\ 0 & p_5 & -p_4 + (1+\gamma)p_6 \end{pmatrix}$.

В случае 2.8.7 связность является нормальной при $p_{1,3} = -2r_{1,1}$, $r_{2,2} \neq 0$, $r_{1,3} \neq 1/2 p_{1,3}^2$, $q_{2,3} = 0$,

тогда алгебра голономии $\begin{pmatrix} p_1 & 0 & p_2 \\ 0 & p_3 & 0 \\ p_4 & 0 & -p_1 \end{pmatrix}$, либо при $p_{1,3} = -2r_{1,1}$, $r_{2,2} \neq 0$, $r_{1,3} \neq 1/2 p_{1,3}^2$,

$q_{2,3} \neq 0$, тогда алгебра голономии $\begin{pmatrix} p_1 & 0 & p_2 \\ p_4 & p_5 & p_6 \\ p_3 & 0 & -p_1 \end{pmatrix}$. Для пары 2.17.27 связность нормальна

при $q_{1,3} \neq 0$, $q_{2,3} = 2p_{1,3} + 3r_{1,1}$, тогда алгебра голономии – $\mathfrak{sl}(3, \mathbb{R})$; либо при $q_{1,3} \neq 0$, $q_{2,3} \neq 2p_{1,3} + 3r_{1,1}$,

алгебра голономии – $\mathfrak{gl}(3, \mathbb{R})$; либо при $q_{1,3} = 0$, $r_{1,3} \neq p_{1,3}^2/4$, $r_{1,1} = -q_{2,3}$, $p_{1,3} = -2r_{1,1}$, алгебра голоно-

мий – $\begin{pmatrix} p_1 & 0 & p_2 \\ p_3 & 0 & p_4 \\ p_5 & 0 & -p_1 \end{pmatrix}$; либо при $q_{1,3}=0$, $r_{1,3} \neq p_{1,3}^2/4$, $r_{1,1} \neq -q_{2,3}$, $p_{1,3} = -2r_{1,1}$, алгебра голономии – $\begin{pmatrix} p_1 & 0 & p_2 \\ p_3 & 0 & p_4 \\ p_5 & 0 & p_6 \end{pmatrix}$; либо при $q_{1,3}=0$, $\gamma = (p_{1,3}+2r_{1,1})/(2r_{1,1}+2p_{1,3}-2q_{2,3})$, $r_{1,3} \neq p_{1,3}^2/4$, $r_{1,1}+p_{1,3}-q_{2,3} \neq 0$, алгебра голономии – $\begin{pmatrix} p_5+\gamma p_6 & 0 & p_1 \\ p_3 & p_6 & p_2 \\ p_4 & 0 & -p_5+\gamma p_6 \end{pmatrix}$.

Прямыми вычислениями получаем, что других трехмерных нередуцируемых пар с неразрешимой $\bar{\mathfrak{g}}$ и разрешимой $\mathfrak{g}$, допускающих нормальную связность, не существует.

Заключение. Приведено локальное описание всех трехмерных нередуцируемых однородных пространств с неразрешимой группой преобразований, допускающих нормальную связность. Локальное изучение однородных пространств равносильно исследованию пар, состоящих из алгебры Ли и ее подалгебры. Описаны в явном виде все инвариантные аффинные связности на найденных однородных пространствах, а также тензоры кривизны и кручения указанных связностей. Исследованы алгебры голономии и определено, когда инвариантная связность нормальна. Полученные результаты могут быть использованы при решении математических и физических задач, требующих изучения инвариантных объектов на однородных пространствах.

Литература

1. Лумисте, Ю.Г. Дифференциальная геометрия подмногообразий / Ю.Г. Лумисте // Итоги науки и техники. Сер. Алгебра. Топология. Геометрия. – 1975. – Т. 13. – С. 273–340.
2. Евтушик, Л.Е. Дифференциально-геометрические структуры на многообразиях / Л.Е. Евтушик, Ю.Г. Лумисте, Н.М. Остиану, А.П. Широков // Итоги науки и техники. Сер. Проблемы геометрии. – 1979. – Т. 9. – С. 5–247.
3. Кобаяси, Ш. Основы дифференциальной геометрии: в 2 т. / Ш. Кобаяси, К. Номидзу. – М.: Наука, 1981. – 2 т. – 416 с.
4. Можей, Н.П. Трехмерные нередуцируемые однородные пространства неразрешимых групп Ли / Н.П. Можей // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 4. – С. 20–26.
5. Можей, Н.П. Связности на нередуцируемых однородных пространствах с неразрешимой группой преобразований / Н.П. Можей // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 5. – С. 7–16.

Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

Поступила в редакцию 01.02.2018

Анализ модели Хита, Джарроу и Мортон (HJM)

Д.А. ПАВЛИВ

Представлен анализ модели Хита, Джарроу и Мортон (HJM), используемой для построения временной структуры доходности процентных ставок. Данная модель является представителем альтернативного подхода, составляющего некоторую конкуренцию классическим идеям, положенным в основу моделей процентных ставок. Вместо моделирования динамики краткосрочных процентных ставок с целью дальнейшего вывода на их основе временной структуры доходности, предлагается моделировать временную структуру напрямую. Теоретически, это позволяет более точно описать поведение кривых на всей числовой оси. В работе так же проанализированы аспекты практического применения модели.

Ключевые слова: временная структура доходности, форвардная кривая, волатильность, модель Васичека, модель Хо-Ли.

The paper presents an analysis of the Heath, Jarrow and Morton model (HJM) used to construct the term structure of interest rate yields. This model represents an alternative approach, which forms some competition to the classical ideas that are the basis of interest rate models. Instead of simulating the dynamics of short-term interest rates to further deriving the time structure on their basis, it is proposed to model the term structure directly. Theoretically, this allows more accurate description of the behavior of the curves on the entire numerical axis. In the same way, aspects of the practical application of the model are analyzed.

Keywords: term structure of interest rate yields, forward curve, volatility, Vasicek model, Ho-Lee model.

Введение. Традиционный подход к изучению временной структуры доходности, в частности, форвардной кривой, заключается в выборе наиболее правдоподобной математической модели поведения процентных ставок, оценки параметров по рыночным данным и построению с помощью такой модели временной структуры доходности в текущий и будущие периоды. Данный подход широко изучен в литературе на примере известных аффинных и неаффинных моделей. Хит, Джарроу и Мортон предложили альтернативный подход [1]. В модели HJM вместо моделирования краткосрочной процентной ставки и получения на ее основе форвардной кривой моделируется сама форвардная кривая. Ключевым моментом в таком подходе является то, что моделируется динамика форвардной кривой целиком, а не только ее краткосрочная часть.

Определение модели HJM. Рассмотрим стоимость бескупонной облигации, $P(t; T)$, в момент t , при фиксированном моменте погашения, $T \geq t$, когда по облигации выплачивается 1. Обозначим форвардную кривую в момент t как $F(t; T)$. Тогда можно записать связь между этими двумя величинами

$$P(t; T) = \exp \left(- \int_t^T F(t; u) du \right)$$

откуда следует

$$F(t; T) = - \frac{\partial}{\partial T} \log P(t; T) \quad (1)$$

Предположим, что динамика стоимости бескупонной облигации описывается одномерным стохастическим дифференциальным уравнением

$$dP(t; T) = \mu(t, T)P(t; T)dt + \sigma(t, T)P(t; T)dW \quad (2)$$

с функциями дрейфа $\mu(t, T)$ и волатильности $\sigma(t, T)$, $W(t)$ – винеровский процесс. Заметим, что из начального условия $P(t; t) = 1$ немедленно следует ограничение на функцию волатильности: $\sigma(t, t) = 0$.

Применяя формулу Ито к выражению для форвардной кривой (1) с учетом уравнения (2) получаем

$$dF(t; T) = m(t, T)dt + v(t, T)dW, \\ m(t, T) = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{1}{2} \sigma^2(t, T) - \mu(t, T) \right), \quad v(t, T) = \frac{\partial}{\partial T} \sigma(t, T) \quad (3)$$

где, не ограничивая общности, знак перед dW заменен на противоположный, а $m(t, T)$ и $v(t, T)$ – функции дрейфа и волатильности процесса $F(t, T)$. Следует подчеркнуть еще раз, что дата погашения облигации, T , является фиксированной в уравнении (3), а «эволюция» процесса происходит за счет изменения момента времени t .

Рассмотрим модель НЖМ в риск-нейтральной мере. В этом случае, как известно, функция дрейфа, $\mu(t, T)$, будет совпадать со значением краткосрочной процентной ставки, $r(t)$. Тогда, учитывая условие $\sigma(t, t) = 0$, можно записать

$$m(t, T) = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial T} \sigma^2(t, T) - \frac{\partial}{\partial T} r(t) = v(t, T) \int_t^T v(t, u) du \quad (4)$$

Выражение (4) является знаменитым условием НЖМ. Из него следует, что модель НЖМ в риск-нейтральной вероятностной мере однозначно определяется своей функцией волатильности. Таким образом, окончательно можно записать

$$dF(t; T) = v(t, T) \left(\int_t^T v(t, u) du \right) dt + v(t, T) dW \quad (5)$$

Выше была рассмотрена однофакторная модель НЖМ. Однако, такая модель не всегда способна отразить все закономерности траектории временной структуры доходности. Поэтому часто на практике рассматривают многомерную модель НЖМ, теория для которой легко обобщается на основе одномерного случая. В риск-нейтральной вероятностной мере N -мерное стохастическое дифференциальное уравнение для форвардной кривой определяется как

$$dF(t; T) = m(t, T)dt + \sum_{i=1}^N v_i(t, T) dW_i = \left(\sum_{i=1}^N v_i(t, T) \int_t^T v_i(t, u) du \right) dt + \sum_{i=1}^N v_i(t, T) dW_i,$$

где dW_i некоррелированы, а условие НЖМ принимает вид

$$m(t, T) = \sum_{i=1}^N v_i(t, T) \int_t^T v_i(t, u) du.$$

Свойства модели НЖМ. Частные случаи. Краткосрочная процентная ставка, по определению, равна форвардной ставке с датой погашения равной текущей дате

$$r(t) = F(t; t).$$

Используя данное определение и уравнение (5), можно вывести стохастическое дифференциальное уравнение для краткосрочной процентной ставки. Пусть текущий момент времени обозначен через t_0 . Тогда для любого момента времени t в будущем, с учетом (5), можно записать

$$r(t) = F(t; t) = F(t_0, t) + \int_{t_0}^t dF(u; t) = F(t_0, t) + \int_{t_0}^t v(s, t) \left(\int_s^t v(s, u) du \right) ds + \int_{t_0}^t v(s, t) dW(s)$$

Дифференцируя по t получаем стохастическое дифференциальное уравнение для процесса $r(t)$

$$dr = \left(\frac{\partial F(t_0; t)}{\partial t} + \int_{t_0}^t \left(\frac{\partial v(s, t)}{\partial t} \left(\int_s^t v(s, u) du \right) + v^2(s, t) \right) ds + \int_{t_0}^t \frac{\partial v(s, t)}{\partial t} dW(s) \right) dt + v(t, t) dW \quad (6)$$

Уравнение (6) является громоздким и для большинства конкретных значений функции $v(t, T)$ пролущить значение дрейфа процесса процентной ставка в явном аналитическом виде не удастся. Однако, даже такая сложная форма уравнения позволяет сделать несколько важных

наблюдений. Все, кроме последнего слагаемого, являются детерминированными, последнее слагаемое – случайное. Рассмотрим более детально «подчеркнутое» слагаемое. Оно зависит от исторических значений функции $v(t, T)$ начиная с момента t_0 . Но, что более важно, оно также зависит от исторических значений стохастического приращения dW . Таким образом, в общем случае, данное слагаемое имеет сильную зависимость от реализации процесса. Как следствие, это приводит к немарковскому процессу краткосрочной процентной ставки. Другими словами, для того, чтобы «предсказать» будущее значение процесса уже не достаточно знать текущее состояние процесса, необходимо также знать бесконечно много состояний в прошлом, что не позволяет записать уравнение в частных производных с конечным числом переменных для определения стоимости бескупонной облигации. Отметим, что в некоторых простейших случаях процесс (6) все же является марковским. Достаточным условием марковской природы процесса краткосрочной процентной ставки является независимость функции $v(t, T)$ от второго аргумента, то есть $v(t, T) = v(t)$.

Рассмотрим некоторые частные случаи модели НЖМ. Наиболее простым представителем данного класса моделей является модель Хо-Ли [2]. Она задается простейшей функцией волатильности – константой, $v(t, T) = \sigma$. В таком случае, процесс форвардной ставки в риск-нейтральной мере представим в виде

$$dF(t; T) = \sigma^2(T - t)dt + \sigma dW$$

Процесс краткосрочной процентной ставки в модели Хо-Ли, согласно проведенному выше анализу, обладает марковскими свойствами. Примем для простоты $t_0 = 0$, тогда из (6) немедленно следует вид данного процесса

$$dr = \eta(t)dt + \sigma dW, \quad \eta(t) = \frac{\partial F(0; t)}{\partial t} + \sigma^2 t$$

Марковские свойства полученного процесса позволяют записать дифференциальное уравнение в частных производных для стоимости бескупонной облигации, $P(r, t, T)$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \eta(t) \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{2} \sigma^2 \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} - rP = 0, \quad P(r, T, T) = 1 \quad (7)$$

Поиск решения уравнения (7) в классическом для аффинных моделей виде

$$P(r, t, T) = \exp(A(t, T) + rB(t, T))$$

приводит к решению

$$P(r, t, T) = \exp \left(-r(T - t) + \frac{1}{6} \sigma^2 (T - t)^3 - \int_t^T \eta(s)(T - s)ds \right)$$

Отсюда, в каждый фиксированный момент t при фиксированном значении $r(t)$ форвардная ставка будет определяться согласно выражению

$$F(t, T) = r(t) + \sigma^2 t(T - t) + F(0, T) - F(0, t)$$

Большинство известных моделей при некоторых ограничениях имеют представление НЖМ. Рассмотрим в качестве примера модель Васичека [3], в которой динамика процентной ставки описывается диффузионным уравнением

$$dr = k(\theta - r)dt + \sigma dW \quad (8)$$

Будем исследовать модель Васичека в риск-нейтральной вероятностной мере и при нулевом значении параметра θ . В таком случае форвардная кривая задается выражением [3]

$$F(t, T) = r(t)e^{-k(T-t)} - \frac{\sigma^2}{2k^2} (1 - e^{-k(T-t)})^2 \quad (9)$$

Применяя формулу Ито к функции (9) с учетом вида процесса (8) получаем стохастическое дифференциальное уравнение для процесса форвардной ставки

$$dF(t, T) = \frac{\sigma^2}{k} (1 - e^{-k(T-t)}) e^{-k(T-t)} dt + \sigma e^{-k(T-t)} dW$$

при этом следует отметить выполнение условия дрейфа HJM.

Из приведенных выше примеров можно заметить, что простейшие модели HJM могут приводить к стационарным и марковским процессам процентной ставки. Возникает вопрос: на сколько простой может быть функция волатильности форвардной ставки, чтобы породить реалистичный процесс? Для ответа на этот вопрос можно провести некоторый анализ. На рисунке 1 приведена зависимость исторической волатильности форвардной ставки, построенной по данным Центрального Европейского Банка [4], ЕСВ от срока до погашения.

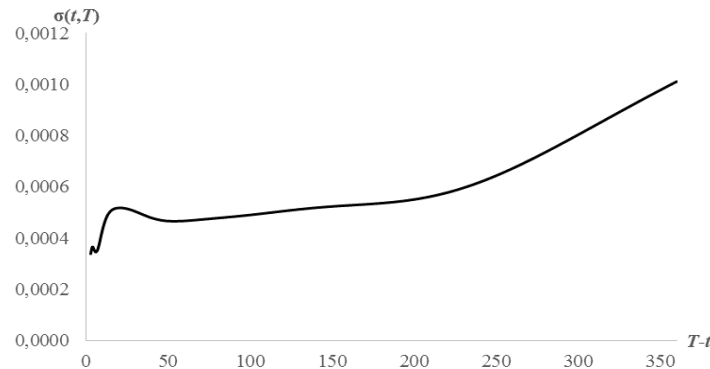


Рисунок 1 – График зависимости исторической волатильности форвардной ставки по данным ЕСВ от срока до погашения. По оси X приведены сроки до погашения в месяцах

С некоторым приближением зависимость, представленную на рисунке 1, можно принять как линейную либо экспоненциальную для среднесрочных и долгосрочных обязательств. Однако, чтобы охватить всю динамику, вероятно, понадобится более сложная форма зависимости.

Практическое применение модели HJM. Метод Монте-Карло. Рассмотрим некоторые методы применения моделей HJM на практике. В простейшем случае, когда это удастся, можно свести модель HJM к классической модели процентных ставок путем поиска стохастического дифференциального уравнения для процесса $r(t)$. Однако такой подход не представляет интереса в рамках данной статьи, так как получающиеся модели скорее всего уже известны и методы работы с ними хорошо изучены, как, например, модель Васичека [3].

Интерес представляют те случаи, когда свести модель HJM к явной форме модели процентных ставок не удастся. Как известно, модель HJM в риск-нейтральной вероятностной мере однозначно задается своей функцией волатильности. Если функция волатильности не известна априори, то возникает задача ее аппроксимации. Одним из наиболее популярных методов оценки функции волатильности многомерной модели HJM является метод главных компонентов [2]. Вкратце, суть данного метода заключается в построении ковариационной матрицы *изменений* форвардной ставки для различных сроков до погашения. Далее находят собственные значения и собственные вектора данной матрицы. Собственный вектор, соответствующий наибольшему собственному значению называется первым главным компонентом. Он определяет доминирующую составляющую движения форвардной кривой. Его первый элемент характеризует изменение ставки с наименьшим сроком до погашения, второй элемент – изменение ставки со вторым по величине сроком до погашения и так далее. Его собственное значение выступает в качестве дисперсии таких изменений. Тогда, i -ый элемент вектора волатильности процесса можно аппроксимировать функцией

$$\bar{v}_i(\tau_j) = \sqrt{\lambda_i} (V_i)_j$$

где τ_i – сроки до погашения, например, 1/12 года, 4/12 года и так далее, $(V_i)_j$ – j -ый компонент вектора V_i . Для того, чтобы получить значение волатильности для других сроков до погашения, необходимо применить технику интерполирования.

Предположим, что функция волатильности известна. Как уже отмечалось ранее, так как модель HJM в общем случае порождает немарковский процесс процентной ставки, построить

конечномерное дифференциальное уравнение в частных производных для нахождения временной структуры доходности не представляется возможным. Поэтому необходимы альтернативные способы построения временной структуры. Одним из подходов является моделирование процесса методом Монте-Карло.

Ниже описан алгоритм действий для нахождения временной структуры доходности методом Монте-Карло [5].

Рассмотрим одномерную модель НЖМ

$$dF(t; T) = m(t, T)dt + v(t, T)dW = v(t, T) \left(\int_t^T v(t, u)du \right) dt + v(t, T)dW \quad (10)$$

В общем случае моделирование непрерывного процесса (10) является неразрешимой задачей. Поэтому, обычно, прибегают к дискретизации исходного процесса. На самом деле дискретизации подтверждены оба аргумента функции $F(t, T)$. Для первого аргумента зафиксируем временную сетку $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_M = T^*$. Даже зафиксировав первый аргумент, t_j , в общем случае невозможно получить всю форвардную кривую $f(t_j, T)$ целиком, $t_j < T < T^*$, поэтому будем также использовать временную сетку для сроков до погашения. Вообще, сетка сроков до погашения может отличаться от сетки для первого аргумента. Однако, в целях упрощения, не ограничивая общности, будем считать, что первая и вторая сетки совпадают. В дискретной версии стоимость облигации будет иметь вид

$$\hat{P}(t_i, t_j) = \exp \left(- \sum_{k=i}^{j-1} \hat{F}(t_i, t_k)(t_{k+1} - t_k) \right)$$

Чтобы избежать дополнительных погрешностей, потребуем, чтобы начальные значения аппроксимации для цены облигации совпадали с точными значениями для всех узлов сетки, т. е.

$$\hat{P}(0, t_j) = \exp \left(- \sum_{k=0}^{j-1} \hat{F}(0, t_k)(t_{k+1} - t_k) \right) = \exp \left(- \int_0^{t_j} F(0, u)du \right) = P(0, t_j)$$

Отсюда следует, что

$$\hat{F}(0, t_k) = \frac{1}{t_{k+1} - t_k} \int_{t_k}^{t_{k+1}} F(0, u)du$$

для всех $k = 0, 1, \dots, M-1$. После того, как начальные значения заданы, можно построить рекурсивную процедуру симуляции значений форвардной ставки

$$\hat{F}(t_i, t_j) = \hat{F}(t_{i-1}, t_j) + \hat{m}(t_{i-1}, t_j)(t_i - t_{i-1}) + \hat{v}(t_{i-1}, t_j)\sqrt{t_i - t_{i-1}}\xi_i, \quad i = 0, \dots, M, \quad j = i, \dots, M, \quad (11)$$

где $\xi_1, \dots, \xi_M$ – независимые стандартно распределенные нормальные случайные величины. Смоделировав достаточное число реализаций (11), можно найти их математическое ожидание, которое и будет выступать в качестве оценки временной структуры доходности.

Аппроксимация дрейфа выглядит немного сложнее. Дело в том, что дрейф определяется через волатильность из условия отсутствия арбитража. Можно показать, что для того, чтобы выражение

$$\hat{P}(t_i, t_j) \exp \left(- \sum_{k=0}^{i-1} \hat{F}(t_i, t_k)(t_{k+1} - t_k) \right)$$

было мартингалом в момент t для каждого T , необходимо и достаточно, чтобы аппроксимация дрейфа определялось следующим образом

$$\hat{m}(t_{i-1}, t_j)(t_{j+1} - t_j) = \frac{1}{2} \left(\sum_{k=i}^j \hat{v}(t_{i-1}, t_k)(t_{k+1} - t_k) \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\sum_{k=i}^{j-1} \hat{v}(t_{i-1}, t_k)(t_{k+1} - t_k) \right)^2$$

Это дискретная версия условия дрейфа модели НЖМ. Оно обеспечивает выполнения мартингального свойства для стоимости дисконтированных облигаций. Устремив шаг сетки к нулю, а индексы i и j к бесконечности, можно показать, что дискретная версия условия на дрейф будет соответствовать аналогичному условию для непрерывной модели.

Таким образом, исходными данными для использования модели HJM являются функция волатильности форвардной ставки, а также значения форвардной кривой в текущий момент времени.

Вышесказанное продемонстрировано на рисунке 2, где изображено семейство форвардных кривых в различные моменты времени, полученные с помощью метода Монте-Карло для модели Хо-Ли с параметром волатильности $\sigma = 0,01$.

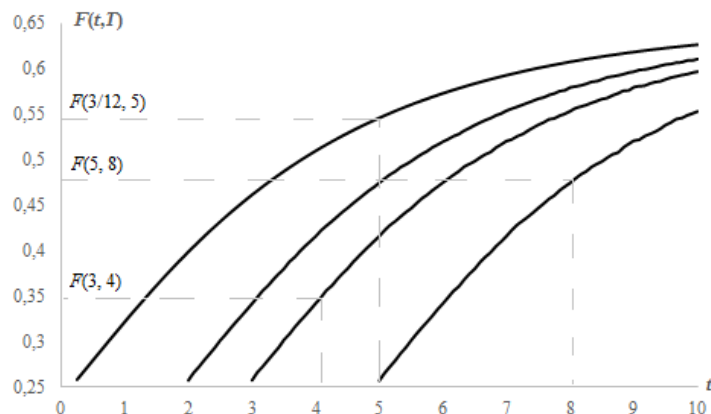


Рисунок 2 – Семейство форвардных кривых в различные моменты времени. На оси абсцисс приведена временная шкала в годах. Точка $F(5, 8)$ соответствует значению форвардной ставки в момент $t = 5$ со сроком до погашения $T - t = 3$

Заключение. В данной работе представлен обзор подходу HJM как альтернатива классически моделям процентных ставок для нахождения временной структуры доходности. Модель HJM привносит перспективные идеи в теорию временной структуры процентных ставок, такие как возможность моделирования временной структуры напрямую и на всей временной кривой. Особенности модели HJM определяют методы ее использования. В частности, в силу немарковской природы порождаемых процессов, получить временную структуру в аналитическом виде не удастся, поэтому единственным способом использования таких моделей на практике является применение приближенных методов, таких как метод Монте-Карло. Модель HJM может порождать и марковские процессы, однако такие модели вряд ли могут представлять интерес в силу отсутствия новизны, так как в большинстве случаев сводятся к уже известным хорошо изученным моделям.

Литература

1. Heath, D. Bond pricing and the term structure of interest rates: a new methodology / D. Heath, R. Jarrow, A. Morton. – *Econometrica*. – 1992. – № 60. – P. 77–105.
2. Wilmott, P. Paul Wilmott on quantitative finance / P. Wilmott. – Second edition. – New York, 2000. – 1401 p.
3. Медведев, Г. О временной структуре доходности. Модель Васичека / Г. Медведев // *Вестник ТГУ*. – 2012. – № 1 (18). – С. 102–111.
4. Financial markets and interest rates: Euro area yield curves [Electronic resource] / European Central Bank. – Mode of access : https://www.ecb.europa.eu/stats/financial_markets_and_interest_rates/euro_area_yield_curves/html/index.en.html. – Date of access : 26.03.2017.
5. Glasserman, P. Monte Carlo methods in financial engineering. Springer / P. Glasserman. – New York, 2003. – 599 p.

О неассоциативности l -арной операции $\eta_{s, \sigma, k}$

А.Д. РУСАКОВ¹, А.М. ГАЛЬМАК², В.Л. МЕРЕЖА¹

Продолжается изучение l -арной операции $\eta_{s, \sigma, k}$. В частности, найдены достаточные условия для невыполнимости в l -арном группоиде $\langle A^k, \eta_{s, \sigma, k} \rangle$ $l-1$ тождеств, включая тождество полуассоциативности, определяющих ассоциативность операции $\eta_{s, \sigma, k}$.

Ключевые слова: полиадическая операция, группоид, полугруппа, ассоциативность, единица.

The study of the l -ary operation $\eta_{s, \sigma, k}$ continues. In particular, the sufficient conditions of impracticability of $l-1$ identities in l -ary groupoid $\langle A^k, \eta_{s, \sigma, k} \rangle$ were found, including identity of the semiassociativity, which determines the associativity of $\eta_{s, \sigma, k}$ operation.

Keywords: polyadic operation, groupoid, semigroup, associativity, identity element.

Введение. Полиадическая операция $\eta_{s, \sigma, k}$ была определена в [1] на k -ой декартовой степени A^k n -арного группоида $\langle A, \eta \rangle$ с помощью подстановки σ множества $\{1, \dots, k\}$ и n -арной операции η . Частным случаем ($n=2$) полиадической операции $\eta_{s, \sigma, k}$ является l -арная операция $[]_{l, \sigma, k}$, которая первоначально была определена в [2] для любых целых $k \geq 2$, $l \geq 2$ и любой подстановки $\sigma \in S_k$ на k -ой декартовой степени A^k полугруппы A . Изучению операции $[]_{l, \sigma, k}$ посвящена книга [3].

При

$$k = m - 1, l = m, \sigma = (12 \dots m - 1), A = S_n$$

операция $[]_{l, \sigma, k}$ совпадает с m -арной операцией Э. Поста, определенной [4] на декартовой степени S_n^{m-1} симметрической группы S_n , а при $A = GL_n(C)$ и тех же k, l и σ операция $[]_{l, \sigma, k}$ совпадает с m -арной операцией Э. Поста, определенной [4] на декартовой степени $GL_n^{m-1}(C)$ полной линейной группы $GL_n(C)$.

В [1] доказано, что если n -арная операция η – ассоциативна, подстановка σ удовлетворяет условию $\sigma^l = \sigma$, то полиадическая операция $\eta_{s, \sigma, k}$ также является ассоциативной. Если же подстановка σ удовлетворяет условию $\sigma^l \neq \sigma$, то, как установлено в [5], наличие в n -арной полугруппе $\langle A, \eta \rangle$, содержащей более одного элемента, левой нейтральной последовательности влечёт за собой невыполнимость в l -арном группоиде $\langle A^k, \eta_{s, \sigma, k} \rangle$ тождества полуассоциативности. При этом в $\langle A^k, \eta_{s, \sigma, k} \rangle$ могут выполняться некоторые тождества, определяющие ассоциативность операции $\eta_{s, \sigma, k}$, отличные от тождества полуассоциативности.

Основным результатом данной статьи является теорема, утверждающая, что неравенство $\sigma^l \neq \sigma$ и наличие в n -арной полугруппе $\langle A, \eta \rangle$ единицы является достаточным условием для невыполнимости в l -арном группоиде $\langle A^k, \eta_{s, \sigma, k} \rangle$ $l-1$ тождеств, включая тождество полуассоциативности, определяющих ассоциативность операции $\eta_{s, \sigma, k}$.

1. Предварительные сведения. Напомним, что n -арную операцию η n -арного группоида $\langle A, \eta \rangle$ называют *ассоциативной*, если в нём для любого $i = 2, \dots, n$ выполняется тождество

$$\eta(\eta(x_1 \dots x_n)x_{n+1} \dots x_{2n-1}) = \eta(x_1 \dots x_{i-1}\eta(x_i \dots x_{i+n-1})x_{i+n} \dots x_{2n-1}).$$

Если указанное тождество выполняется для $i = n$, то n -арную операцию η называют *полуассоциативной*. Таким образом, n -арную операцию η n -арного группоида $\langle A, \eta \rangle$ называют *полуассоциативной*, если в нём выполняется тождество

$$\eta(\eta(x_1 \dots x_n)x_{n+1} \dots x_{2n-1}) = \eta(x_1 \dots x_{n-1}\eta(x_n \dots x_{2n-1})).$$

Ясно, что ассоциативная n -арная операция является и полуассоциативной.

Последовательность $e_1 \dots e_{n-1}$ элементов n -арного группоида $\langle A, \eta \rangle$ называют его *левой (правой) нейтральной последовательностью*, если

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

для любого $x \in A$.

Последовательность $e_1 \dots e_{n-1}$ элементов n -арного группоида $\langle A, \eta \rangle$ называют его *нейтральной последовательностью*, если она является и левой нейтральной и правой нейтральной.

Элемент e n -арного группоида $\langle A, \eta \rangle$ называют его *единицей*, если для любого $x \in A$ верно

$$\eta(\underbrace{x e \dots e}_{n-1}) = \eta(e \underbrace{x e \dots e}_{n-2}) = \dots = \eta(\underbrace{e \dots e x e}_{n-2}) = \eta(\underbrace{e \dots e x}_{n-1}) = x.$$

Определение 1.1 [1]. Пусть $\langle A, \eta \rangle$ – n -арный группоид, $n \geq 2, s \geq 1, l = s(n-1) + 1, k \geq 2, \sigma \in S_k$. Определим на A^k вначале n -арную операцию

$$\eta_{1, \sigma, k}(\mathbf{x}_1 \dots \mathbf{x}_n) = \eta_{1, \sigma, k}((x_{11}, \dots, x_{1k}) \dots (x_{n1}, \dots, x_{nk})) = \\ = (\eta(x_{11}x_{2\sigma(1)} \dots x_{n\sigma^{n-1}(1)}), \dots, \eta(x_{1k}x_{2\sigma(k)} \dots x_{n\sigma^{n-1}(k)})),$$

а затем l -арную операцию

$$\eta_{s, \sigma, k}(\mathbf{x}_1 \dots \mathbf{x}_l) = \eta_{s, \sigma, k}((x_{11}, \dots, x_{1k}) \dots (x_{l1}, \dots, x_{lk})) = \\ = \eta_{1, \sigma, k}(\mathbf{x}_1 \dots \mathbf{x}_{n-1} \eta_{1, \sigma, k}(\mathbf{x}_n \dots \mathbf{x}_{2(n-1)} \\ \eta_{1, \sigma, k}(\dots \eta_{1, \sigma, k}(\mathbf{x}_{(s-2)(n-1)+1} \dots \mathbf{x}_{(s-1)(n-1)} \\ \eta_{1, \sigma, k}(\mathbf{x}_{(s-1)(n-1)+1} \dots \mathbf{x}_{s(n-1)+1})) \dots))).$$

При $s = 1$ l -арная операция $\eta_{s, \sigma, k}$ совпадает с n -арной операцией $\eta_{1, \sigma, k}$.

Явный вид l -арной операции $\eta_{s, \sigma, k}$ описывает следующая

Теорема 1.1 [1]. Если

$$\mathbf{x}_i = (x_{i1}, \dots, x_{ik}), i = 1, 2, \dots, l, \\ \eta_{s, \sigma, k}(\mathbf{x}_1 \dots \mathbf{x}_l) = (y_1, \dots, y_k),$$

то для любого $j \in \{1, \dots, k\}$ j -ая компонента y_j находится по формуле

$$y_j = \eta(x_{1j}x_{2\sigma(j)} \dots x_{(n-1)\sigma^{n-2}(j)} \eta(x_{n\sigma^{n-1}(j)} \dots x_{(2(n-1))\sigma^{2(n-1)-1}(j)} \eta(\dots \\ \dots \eta(x_{((s-1)(n-1)+1)\sigma^{(s-1)(n-1)}(j)} \dots x_{(s(n-1)+1)\sigma^{s(n-1)}(j)} \dots))). \quad (1.1)$$

Замечание 1.1. Если n -арная операция η ассоциативна, то (1.1) может быть переписано следующим образом

$$y_j = \eta(x_{1j}x_{2\sigma(j)} \dots x_{(s(n-1)+1)\sigma^{s(n-1)}(j)}) = \eta(x_{1j}x_{2\sigma(j)} \dots x_{l\sigma^{l-1}(j)}).$$

Теорема 1.2 [1]. Если n -арная операция η – ассоциативна, подстановка σ из S_k удовлетворяет условию $\sigma^l = \sigma$, то l -арная операция $\eta_{s, \sigma, k}$ ассоциативна.

Теорема 1.3 [5]. Пусть $\langle A, \eta \rangle$ – n -арная полугруппа, содержащая более одного элемента, и обладающая левой нейтральной последовательностью; подстановка σ из S_k удовлетворяет условию $\sigma^l \neq \sigma$. Тогда в $\langle A^k, \eta_{s, \sigma, k} \rangle$ не выполняется тождество

$$\eta_{s, \sigma, k}(\eta_{s, \sigma, k}(\mathbf{x}_1 \dots \mathbf{x}_l) \mathbf{x}_{l+1} \dots \mathbf{x}_{2l-1}) = \eta_{s, \sigma, k}(\mathbf{x}_1 \dots \mathbf{x}_{l-1} \eta_{s, \sigma, k}(\mathbf{x}_l \dots \mathbf{x}_{2l-1})), \quad (1.2)$$

то есть l -арная операция $\eta_{s, \sigma, k}$ не является полуассоциативной.

Замечание 1.2. Ясно, что в теореме 1.3 левую нейтральную последовательность можно заменить нейтральной последовательностью.

Лемма 1.1 [3]. Пусть A – множество, $k \geq 2, \sigma$ – подстановка из S_k, f_σ – преобразование декартовой степени A^k по правилу

$$(x_1, x_2, \dots, x_k) \rightarrow (x_{\sigma(1)}, x_{\sigma(2)}, \dots, x_{\sigma(k)}).$$

Тогда:

1) f_σ – биекция;

2) для любого $i \geq 2$ преобразование f_σ^i множества A^k осуществляется по правилу

$$(x_1, x_2, \dots, x_k) \rightarrow (x_{\sigma^i(1)}, x_{\sigma^i(2)}, \dots, x_{\sigma^i(k)});$$

3) $f_\sigma^i = f_{\sigma^i}$ для любого $i \geq 2$;

4) если $a \in A, \mathbf{a} = (\underbrace{a, \dots, a}_k)$, то $\mathbf{a}^{f_\sigma} = \mathbf{a}$;

5) если $\langle A, * \rangle$ – группоид, то f_σ – автоморфизм группоида $\langle A^k, * \rangle$ с операцией

$$\mathbf{x} * \mathbf{y} = (x_1, \dots, x_k) * (y_1, \dots, y_k) = (x_1 * y_1, \dots, x_k * y_k).$$

Утверждение 5) леммы 1.1 обобщается следующей леммой.

Лемма 1.2. Если в условиях леммы 1.1 $\langle A, \eta \rangle$ – n -арный группоид, то f_σ – автоморфизм n -арного группоида $\langle A^k, \eta \rangle$ с n -арной операцией η , которая определяется покомпонентно с помощью операции η :

$$\eta(\mathbf{x}_1 \dots \mathbf{x}_n) = \eta((x_{11}, \dots, x_{1k}) \dots (x_{n1}, \dots, x_{nk})) = (\eta(x_{11} \dots x_{n1}), \dots, \eta(x_{1k} \dots x_{nk})).$$

Доказательство. Так как

$$\begin{aligned} \eta(\mathbf{x}_1 \dots \mathbf{x}_n)^{f_\sigma} &= (\eta((x_{11}, \dots, x_{1k}) \dots (x_{n1}, \dots, x_{nk})))^{f_\sigma} = \\ &= (u_1 = \eta(x_{11} \dots x_{n1}), \dots, u_k = \eta(x_{1k} \dots x_{nk}))^{f_\sigma} = \\ &= (u_{\sigma(1)} = \eta(x_{1\sigma(1)} \dots x_{n\sigma(1)}), \dots, u_{\sigma(k)} = \eta(x_{1\sigma(k)} \dots x_{n\sigma(k)})) = \\ &= \eta((x_{1\sigma(1)}, \dots, x_{1\sigma(k)}) \dots (x_{n\sigma(1)}, \dots, x_{n\sigma(k)})) = \eta(\mathbf{x}_1^{f_\sigma} \dots \mathbf{x}_n^{f_\sigma}), \end{aligned}$$

то

$$\eta(\mathbf{x}_1 \dots \mathbf{x}_n)^{f_\sigma} = \eta(\mathbf{x}_1^{f_\sigma} \dots \mathbf{x}_n^{f_\sigma}),$$

то есть f_σ – автоморфизм n -арного группоида $\langle A^k, \eta \rangle$. Лемма доказана.

Замечание 1.3. Ясно, что для n -арного группоида $\langle A, \eta \rangle$ n -арная операция, определённая на декартовой степени A^k покомпонентно с помощью n -арной операции η и обозначаемая тем же символом η , совпадает с n -арной операцией $\eta_{1, \varepsilon, k}$, где ε – тождественная подстановка. Поэтому, если $\langle A, \eta \rangle$ – n -арная полугруппа, то по теореме 1.2 $\langle A^k, \eta \rangle$ – n -арная полугруппа.

Лемма 1.3 [3]. Пусть множество A содержит более одного элемента, $k \geq 2$, σ и τ – подстановки из S_k . Если $\mathbf{x}^{f_\sigma} = \mathbf{x}^{f_\tau}$ для любого $\mathbf{x} \in A^k$, то $\sigma = \tau$.

2 Основные результаты

Согласно теореме 1.3, если n -арная полугруппа $\langle A, \eta \rangle$ обладает левой нейтральной последовательностью, и для подстановки σ верно неравенство $\sigma^l \neq \sigma$, то в l -арном группоиде $\langle A^k, \eta_{s, \sigma, k} \rangle$ не выполняется тождество (1.2), которое при $i = l$ является одним из следующих тождеств

$$\begin{aligned} \eta_{s, \sigma, k}(\eta_{s, \sigma, k}(\mathbf{x}_1 \dots \mathbf{x}_l)\mathbf{x}_{l+1} \dots \mathbf{x}_{2l-1}) &= \\ = \eta_{s, \sigma, k}(\mathbf{x}_1 \dots \mathbf{x}_{i-1}\eta_{s, \sigma, k}(\mathbf{x}_i \dots \mathbf{x}_{i+l-1})\mathbf{x}_{i+l} \dots \mathbf{x}_{2l-1}), & i = 2, \dots, l, \end{aligned} \quad (2.1)$$

определяющих ассоциативность l -арной операции $\eta_{s, \sigma, k}$.

В связи с этим возникает естественный

Вопрос 2.1. Существуют ли в классе всех l -арных группоидов вида $\langle A^k, \eta_{s, \sigma, k} \rangle$ l -арные группоиды, в которых не выполняются все тождества (2.1)?

Пример 2.1. Положим в определении 1.1: $A = \mathbb{R}$, η – тернарная операция, производная от операции умножения действительных чисел;

$$n = 3, s = 1, k = 3, \sigma = (132) \in S_3.$$

Так как $(132)^3$ – тождественная подстановка, то $(132)^3 \neq (132)$.

Ясно, что $\langle \mathbb{R}, \eta \rangle$ – тернарная полугруппа.

Определим на $\mathbb{R}^3$ тернарную операцию

$$\begin{aligned} \eta_{1, (132), 3}(\mathbf{xyz}) &= \eta_{1, (132), 3}((x_1, x_2, x_3)(y_1, y_2, y_3)(z_1, z_2, z_3)) = \\ &= (\eta(x_1 y_{\sigma(1)} z_{\sigma^2(1)}), \eta(x_2 y_{\sigma(2)} z_{\sigma^2(2)}), \eta(x_3 y_{\sigma(3)} z_{\sigma^2(3)})) = \\ &= (\eta(x_1 y_3 z_2), \eta(x_2 y_1 z_3), \eta(x_3 y_2 z_1)). \end{aligned}$$

Пусть $\mathbf{x}$, $\mathbf{y}$ и $\mathbf{z}$ – те же, что и выше,

$$\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3), \mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3).$$

Согласно определению 1.1,

$$\begin{aligned} \eta_{1, (132), 3}(\eta_{1, (132), 3}(\mathbf{xyz})\mathbf{uv}) &= \eta_{1, (132), 3}((\eta(x_1 y_3 z_2), \eta(x_2 y_1 z_3), \eta(x_3 y_2 z_1))\mathbf{uv}) = \\ &= (\eta(x_1 y_3 z_2 u_3 v_2), \eta(x_2 y_1 z_3 u_1 v_3), \eta(x_3 y_2 z_1 u_2 v_1)), \\ \eta_{1, (132), 3}(\mathbf{x}\eta_{1, (132), 3}(\mathbf{yzu})\mathbf{v}) &= \eta_{1, (132), 3}(\mathbf{x}(\eta(y_1 z_3 u_2), \eta(y_2 z_1 u_3), \eta(y_3 z_2 u_1))\mathbf{v}) = \\ &= (\eta(x_1 y_3 z_2 u_1 v_2), \eta(x_2 y_1 z_3 u_2 v_3), \eta(x_3 y_2 z_1 u_3 v_1)), \\ \eta_{1, (132), 3}(\mathbf{xy}\eta_{1, (132), 3}(\mathbf{zuv})) &= \eta_{1, (132), 3}(\mathbf{xy}(\eta(z_1 u_3 v_2), \eta(z_2 u_1 v_3), \eta(z_3 u_2 v_1))) = \\ &= (\eta(x_1 y_3 z_2 u_1 v_3), \eta(x_2 y_1 z_3 u_2 v_1), \eta(x_3 y_2 z_1 u_3 v_2)). \end{aligned}$$

Если $x_1 = y_3 = z_2 = v_2 = 1, u_3 \neq u_1$, то

$$\eta_{1, (132), 3}(\eta_{1, (132), 3}(\mathbf{xyz})\mathbf{uv}) \neq \eta_{1, (132), 3}(\mathbf{x}\eta_{1, (132), 3}(\mathbf{yzu})\mathbf{v}).$$

Если $x_1 = y_3 = z_2 = u_3 = u_1 = 1, v_2 \neq v_3$, то

$$\eta_{1, (132), 3}(\eta_{1, (132), 3}(\mathbf{xyz})\mathbf{uv}) \neq \eta_{1, (132), 3}(\mathbf{xy}\eta_{1, (132), 3}(\mathbf{zuv})).$$

Если $x_1 = y_3 = z_2 = u_1 = 1, v_2 \neq v_3$, то

$$\eta_{1, (132), 3}(\mathbf{x}\eta_{1, (132), 3}(\mathbf{yzu})\mathbf{v}) \neq \eta_{1, (132), 3}(\mathbf{xy}\eta_{1, (132), 3}(\mathbf{zuv})).$$

В примере 2.1 тернарная полугруппа $\langle A = R, \eta \rangle$ обладает единицей, и для подстановки (132) верно неравенство $(132)^3 \neq (132)$. При этом в тернарном группоиде $\langle R^3, \eta_{1, (132), 3} \rangle$ не выполняются все тождества вида (2.1).

Покажем, что неравенство $\sigma^l \neq \sigma$ и наличие в n -арной полугруппе $\langle A, \eta \rangle$ единицы является достаточным условием для невыполнимости всех тождеств (2.1). Утверждение о невыполнимости тождества (1.2) ($i = l$ в тождествах (2.1)) содержится в следующем следствии, вытекающем из теоремы 1.3.

Следствие 2.1. Пусть $\langle A, \eta \rangle$ – n -арная полугруппа, обладающая единицей; подстановка σ из S_k удовлетворяет условию $\sigma^l \neq \sigma$. Тогда в $\langle A^k, \eta_{s, \sigma, k} \rangle$ не выполняется тождество (1.2).

Для получения положительного ответа на сформулированный выше вопрос нам понадобится

Лемма 2.1. Если e – единица (идемпотент) n -арного группоида $\langle A, \eta \rangle$, то

$$e = (\underbrace{e, \dots, e}_k)$$

– единица (идемпотент) n -арного группоида $\langle A^k, \eta \rangle$.

Доказательство. Пусть e – единица n -арного группоида $\langle A, \eta \rangle$. Положим

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_k) \in A^k,$$

$$\eta(\underbrace{e \dots e}_{i-1} x \underbrace{e \dots e}_{n-i}) = (y_1, y_2, \dots, y_k), i \in \{2, \dots, n\}.$$

Так как в n -арном группоиде $\langle A^k, \eta \rangle$ n -арная операция η определена покомпонентно с помощью n -арной операции η n -арного группоида $\langle A, \eta \rangle$, то

$$y_j = \eta(\underbrace{e \dots e}_{i-1} x_j \underbrace{e \dots e}_{n-i}).$$

А так как e – единица n -арного группоида $\langle A, \eta \rangle$, то $y_j = x_j$. Следовательно,

$$\eta(\underbrace{e \dots e}_{i-1} x \underbrace{e \dots e}_{n-i}) = x,$$

а это означает, что e – единица n -арного группоида $\langle A^k, \eta \rangle$.

Если e – идемпотент, то положив

$$\eta(\underbrace{e \dots e}_n) = (z_1, z_2, \dots, z_k),$$

получим

$$z_j = \eta(\underbrace{e \dots e}_n).$$

А так как e – идемпотент n -арного группоида $\langle A, \eta \rangle$, то $z_j = e$. Следовательно,

$$\eta(\underbrace{e \dots e}_n) = e,$$

а это означает, что e – идемпотент n -арного группоида $\langle A^k, \eta \rangle$. Лемма доказана.

Следующая теорема даёт положительный ответ на вопрос 2.1.

Теорема 2.1. Пусть $\langle A, \eta \rangle$ – n -арная полугруппа, содержащая более одного элемента, и обладающая единицей; подстановка σ из S_k удовлетворяет условию $\sigma^l \neq \sigma$. Тогда в $\langle A^k, \eta_{s, \sigma, k} \rangle$ для любого $i \in \{2, \dots, l\}$ не выполняется тождество (2.1).

Доказательство. Если предположить выполнимости в A тождества из условия теоремы, то

$$\begin{aligned} & \eta(x_1 x_2^{f_\sigma} \dots x_{l-1}^{f_\sigma^{l-2}} x_l^{f_\sigma^{l-1}} x_{l+1}^{f_\sigma} \dots x_{l+i-1}^{f_\sigma^{i-1}} x_{l+i}^i \dots x_{2l-2}^{f_\sigma^{l-2}} x_{2l-1}^{f_\sigma^{l-1}}) = \\ & = \eta(x_1 x_2^{f_\sigma} \dots x_{l-1}^{f_\sigma^{i-2}} \eta(x_l x_{l+1}^{f_\sigma} \dots x_{l-1}^{f_\sigma^{l-i-1}} x_l^{f_\sigma^{l-i}} x_{l+1}^{f_\sigma^{l-i+1}} \dots x_{l+i-1}^{f_\sigma^{l-1}}) x_{l+i}^i \dots x_{2l-1}^{f_\sigma^{l-1}}), \end{aligned}$$

откуда

$$\begin{aligned} & \eta(x_1 x_2^{f_\sigma} \dots x_{l-1}^{f_\sigma^{l-2}} x_l^{f_\sigma^{l-1}} x_{l+1}^{f_\sigma} \dots x_{l+i-1}^{f_\sigma^{i-1}} x_{l+i}^i \dots x_{2l-2}^{f_\sigma^{l-2}} x_{2l-1}^{f_\sigma^{l-1}}) = \\ & = \eta(x_1 x_2^{f_\sigma} \dots x_{l-1}^{f_\sigma^{i-2}} x_l^{f_\sigma^{i-1}} x_{l+1}^{f_\sigma} \dots x_{l-1}^{f_\sigma^{l-2}} x_l^{f_\sigma^{l-1}} x_{l+1}^l \dots (x_{l+i-1}^{f_\sigma^{l-1}})^{f_\sigma^{i-1}} x_{l+i}^i \dots x_{2l-1}^{f_\sigma^{l-1}}). \end{aligned}$$

По условию теоремы в n -арной полугруппе $\langle A, \eta \rangle$ существует единица e . Если положить

$$x_1 = \dots = x_{l+i-2} = x_{l+i} = \dots = x_{2l-2} = e = (\underbrace{e, \dots, e}_k),$$

то, в силу утверждения 4) леммы 1.1, последнее равенство принимает вид

$$\eta(\underbrace{e \dots e}_{l+i-2} \underbrace{x_{l+i-1}^{f_{\sigma}^{i-1}}}_{l-i} \underbrace{e \dots e}_{l-i}) = \eta(\underbrace{e \dots e}_{l+i-2} (\underbrace{x_{l+i-1}^{f_{\sigma}^{l-1}}}_{l-i})^{f_{\sigma}^{i-1}} \underbrace{e \dots e}_{l-i}).$$

Так как, согласно лемме 2.1, e – единица n -арной полугруппы $\langle A^k, \eta \rangle$, то

$$x_{l+i-1}^{f_{\sigma}^{i-1}} = (x_{l+i-1}^{f_{\sigma}^{l-1}})^{f_{\sigma}^{i-1}}.$$

А так как согласно лемме 1.2, f_{σ}^{i-1} – автоморфизм n -арной полугруппы $\langle A^k, \eta \rangle$, то из этого равенства следует равенство

$$x_{l+i-1} = x_{l+i-1}^{f_{\sigma}^{l-1}},$$

которое равносильно равенству

$$x_{l+i-1}^{f_{\varepsilon}} = x_{l+i-1}^{f_{\sigma}^{l-1}},$$

где ε – тождественная подстановка. В свою очередь, из этого равенства, в силу утверждения 3) леммы 1.1, следует

$$x_{l+i-1}^{f_{\varepsilon}} = x_{l+i-1}^{f_{\sigma}^{l-1}}.$$

Так как элемент x_{l+i-1} выбран в A^k произвольно, то, применив к полученному равенству лемму 1.3, получим $\varepsilon = \sigma^{l-1}$, то есть $\sigma^l = \sigma$, что невозможно. Теорема доказана.

Следствие 2.1 получается из теоремы 2.1 при $i = l$.

Теоремы 1.2 и 2.1 позволяют сформулировать следующую теорему.

Теорема 2.2. Если $\langle A, \eta \rangle$ – n -арная полугруппа, содержащая более одного элемента, и обладающая единицей, то l -арная операция $\eta_{s, \sigma, k}$ является ассоциативной тогда и только тогда, когда $\sigma^l = \sigma$.

Полагая в теоремах 2.1 и 2.2 $n = 2$, получим следующие два следствия.

Следствие 2.2. Пусть A – полугруппа с единицей, содержащая более одного элемента; подстановка σ из S_k удовлетворяет условию $\sigma^l \neq \sigma$. Тогда в $\langle A^k, [\]_{l, \sigma, k} \rangle$ для любого $i \in \{2, \dots, l\}$ не выполняется тождество

$$[[x_1 \dots x_l]_{l, \sigma, k} x_{l+1} \dots x_{2l-1}]_{l, \sigma, k} = [x_1 \dots x_{i-1} [x_i \dots x_{i+l-1}]_{l, \sigma, k} x_{i+l} \dots x_{2l-1}]_{l, \sigma, k}.$$

Следствие 2.3. Если A – полугруппа с единицей, содержащая более одного элемента, то l -арная операция $[\]_{l, \sigma, k}$ является ассоциативной тогда и только тогда, когда $\sigma^l = \sigma$.

Замечание 2.1. В [5] установлено, что теорема 2.2 и следствие 2.3 останутся верными, если в них единицу заменить левой единицей.

Замечание 2.2. Установленная в примере 2.1 невыполнимость для тернарной операции $\eta_{1, (132), 3}$ всех тождеств вида (2.1) является следствием теоремы 2.1, так как в тернарном группоиде $\langle R^3, \eta \rangle$ имеется единица.

Литература

1. Гальмак, А.М. О полиадических операциях на декартовых степенях / А.М. Гальмак, А.Д. Русаков // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2014. – № 3. – С. 35–40.
2. Гальмак, А.М. Многочестные ассоциативные операции на декартовых степенях / А.М. Гальмак // Весці НАН Беларусі. – 2008. – № 3. – С. 28–34.
3. Гальмак, А.М. Многочестные операции на декартовых степенях / А.М. Гальмак. – Минск : Изд. центр БГУ, 2009. – 265 с.
4. Post, E.L. Polyadic groups / E.L. Post // Trans. Amer. Math. Soc. – 1940. – Vol. 48, № 2. – P. 208–350.
5. Русаков, А.Д. О неполуассоциативности полиадической операции $\eta_{s, \sigma, k}$ / А.Д. Русаков // Проблемы физики, математики и техники. – 2017. – № 1. – С. 68–72.

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

²Могилевский государственный университет продовольствия

УДК 621.396.67

Ускорение сходимости характеристик излучателей плоских фазированных антенных решеток бесконечных размеров

В.П. Кудин

Исследована применимость ρ -и ε -алгоритмов для ускорения сходимости характеристик излучателей в составе бесконечной плоской фазированной антенной решетки. Установлено, что ρ -алгоритм дает расходящиеся результаты как для поэлементного, так и для спектрального методов. ε -алгоритм нестабилен для спектрального метода, а для поэлементного позволяет уменьшить число слагаемых в двойных рядах до 25...200 (на порядок и более) в большинстве случаев.

Ключевые слова: плоская фазированная антенная решетка, функция Грина, численные методы, сходимость, ρ - и ε -алгоритмы.

The applicability of ρ - and ε -algorithms for accelerating the convergence of the characteristics of radiators in an infinite plane phased array is investigated. It is established that the ρ -algorithm gives divergent results for both element-by-element and spectral methods. The ε -algorithm is unstable for the spectral method, and for the element-by-element it allows to reduce the number of terms in double series up to 25...200 (by an order or more) in most cases.

Keywords: plane phased array, Green's function, numerical methods, convergence, ρ - and ε -algorithms.

Введение. При анализе многоэлементных фазированных антенных решеток (ФАР) как линейных, так и плоских большую роль играет модель бесконечной решетки, позволяющая свести задачу к исследованию характеристик одного излучателя, так называемого «центрального». Фактически речь идет о замене функции Грина, которая теперь выражается в виде однократных или двукратных бесконечных рядов соответственно для линейных и плоских решеток. Подобные бесконечные ряды обычно вычисляются с помощью редукции, т. е. в расчетах удерживается конечное число слагаемых. Это число в зависимости от параметров задачи может варьироваться в достаточно широких пределах и достигать в отдельных случаях десятков тысяч, что ведет в конечном итоге к существенным или даже недопустимым затратам процессорного времени. Не решает проблему и преобразование функции Грина к спектральному виду.

В литературе известны различные попытки ускорения сходимости подобных рядов. Один подход связан с последовательным применением преобразований Куммера и Пуассона [1], [2], с помощью которых удается получить быстросходящиеся ряды для функций Грина бесконечной решетки. Аналогичный метод для двумерной задачи был реализован в работах [3], [4]. Хорошие результаты показывает метод Эвальда [5], который считается наиболее эффективным. Сопоставимым по эффективности можно считать метод Иванишина [6], [7]. Еще один подход основывается на использовании ρ - или ε -алгоритмов [8], [9] и дает очень хорошие результаты для функции Грина. К сожалению, упомянутые методы являются принципиально численными и не позволяют простым путем от функции Грина перейти к полям и получить необходимые уравнения для нахождения искомого решения.

В данной работе исследуется альтернативный подход, когда сначала находится численное решение электродинамической задачи о бесконечной плоской решетке проволочных излучателей при различном числе удерживаемых слагаемых в используемых рядах, а затем к последовательности решений для ускорения сходимости применяется ρ - или ε -алгоритм.

ρ - и ε -алгоритмы. Пусть g_n , $n = 1, 2, \dots$ есть произвольная сходящаяся последовательность. Тогда ρ -алгоритм нахождения предела последовательности имеет рекуррентную форму [8]:

$$\rho_{n,1} = 0, \quad \rho_{n,2} = g_n,$$

$$\rho_{n,t} = \rho_{n+1,t-2} + \frac{t-2}{\rho_{n+1,t-1} - \rho_{n,t-1}}, \quad t = 3, 4, \dots,$$

где t есть порядок алгоритма. Характерно, что только четные элементы $\rho_{n,2t}$ дают оценку для предела последовательности, в то время как нечетные элементы $\rho_{n,2t-1}$ являются промежуточными величинами и достаточно быстро растут при увеличении порядка t . В отдельных случаях из-за накопления ошибок округления последнее обстоятельство приводит к ограничениям на порядок алгоритма.

ε -алгоритм основан на рекуррентных соотношениях [9]:

$$\varepsilon_{n,1} = g_n, \quad \varepsilon_{n,2} = \frac{1}{\varepsilon_{n+1,1} - \varepsilon_{n,1}},$$

$$\varepsilon_{n,t} = \varepsilon_{n+1,t-2} + \frac{1}{\varepsilon_{n+1,t-1} - \varepsilon_{n,t-1}}, \quad t = 3, 4, \dots$$

В работах [8], [9] указано, что применительно к улучшению сходимости частичных сумм $g_n = \sum_{m=1}^n f(m)$ однократных рядов ρ -алгоритм для монотонных последовательностей $f(m)$ дает сходящиеся результаты, в то время как ε -алгоритм нестабилен из-за накопления ошибок округления. И, наоборот, для знакопеременных последовательностей $f(m)$ сходится ε -алгоритм, тогда как ρ -алгоритм дает нестабильные результаты. Там же проведено исследование применимости указанных алгоритмов для улучшения сходимости частичных сумм для двумерной функции Грина, представленной в пространственной и спектральной формах. Основной вывод заключается в том, что применение ρ -алгоритма ускоряет сходимость рядов для двумерной функции Грина, представленной как в пространственной форме, так и в спектральном виде, причем это происходит значительно лучше, чем при использовании ε -алгоритма.

Плоская косоугольная ФАР. В настоящей работе исследуется применимость ρ - и ε -алгоритмов для улучшения сходимости функции Грина плоской ФАР с косоугольной сеткой расположения излучателей, а также решений электродинамической задачи (распределение тока, входной импеданс излучателей и т. п.) для решеток проволочных излучателей. Функция Грина в пространственной и спектральной формах и метод электродинамического анализа двумерно-периодических решеток из проволочных структур представлены в [10].

Хорошо известно, что сходимость двойных рядов для поэлементной функции Грина достаточно медленная и носит осциллирующий характер. В общем случае в зависимости от геометрии при редукции необходимо удерживать примерно $10^3 \dots 10^4$ или более слагаемых. Несколько иная ситуация имеет место при вычислении спектральной функции Грина. Если точки наблюдения и источника разнесены по вертикали (вертикаль ортогональна плоскости решетки) члены ряда экспоненциально убывают, причем с увеличением разности скорости убывания растет, и в этом случае достаточно небольшого количества слагаемых. Если же точки наблюдения и источника лежат в плоскости решетки, то сходимость монотонная и необходимое число слагаемых сопоставимо с требуемым при вычислении рядов для поэлементной функции Грина.

На рисунке 1 в качестве примера приведено типичное поведение частичных сумм

$$G_s = \sum_{m=-s}^s \sum_{n=-s}^s f(m, n)$$

поэлементной функции Грина в зависимости от параметра s (сплошные линии). На рисунках штриховыми и пунктирными линиями показаны также результаты применения ρ - и ε -алгоритмов к указанным частичным суммам соответственно. Хорошо видно, что ε -алгоритм уже при $s = 5$ дает сходящийся результат, в то время как ρ -алгоритм расходится. Похожие результаты получаются и для спектральной функции Грина (рисунок 2).

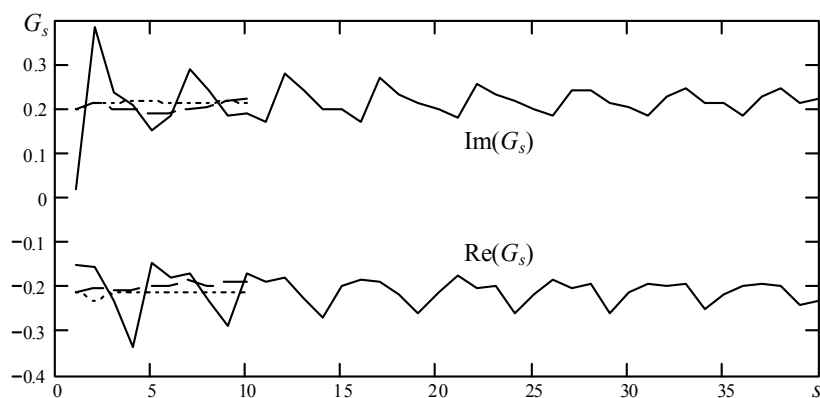


Рисунок 1 – Сходимость поэлементной функции Грина для плоской решетки

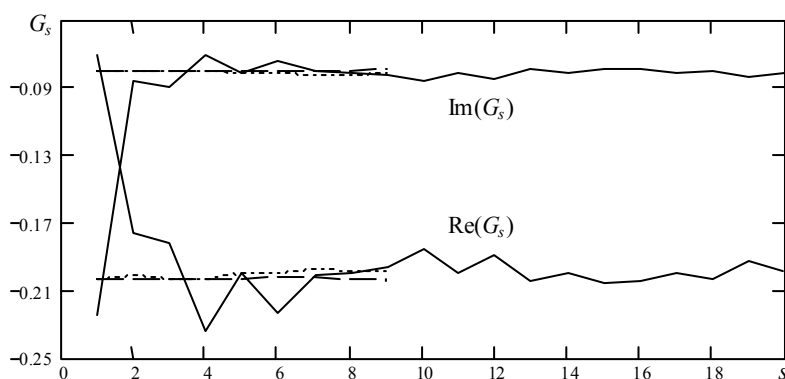


Рисунок 2 – Сходимость спектральной функции Грина для плоской решетки

Расчеты показывают, что применение ρ - или ε -алгоритма приводит к уменьшению необходимого числа слагаемых в двойных рядах до величин порядка 200...600, т. е. на порядок и более. Соответственно уменьшается и затрачиваемое процессорное время. К сожалению, данные процедуры являются сугубо численными и дальнейшая работа с функцией Грина (нахождение полей в виде интегро-дифференциальных выражений от функции Грина, коэффициентов матричных уравнений, выражающимися кратными интегралами от полей, и т. д.) сильно затруднена и должна вестись также численными методами. Поэтому имеет смысл сначала провести необходимые аналитические преобразования, получить требуемые уравнения, найти искомое решение и лишь затем применить процедуру ускорения его сходимости. Ниже подробно исследуется предлагаемый путь.

Ускорение сходимости решений интегральных уравнений. Исследование процедуры ускорения сходимости решения проведем на примере бесконечной плоской решетки вибраторов с изогнутыми плечами, подробный электродинамический анализ которой дан в [11] (геометрия вибратора и расположения вибраторов в решетке показаны на рисунке 3).

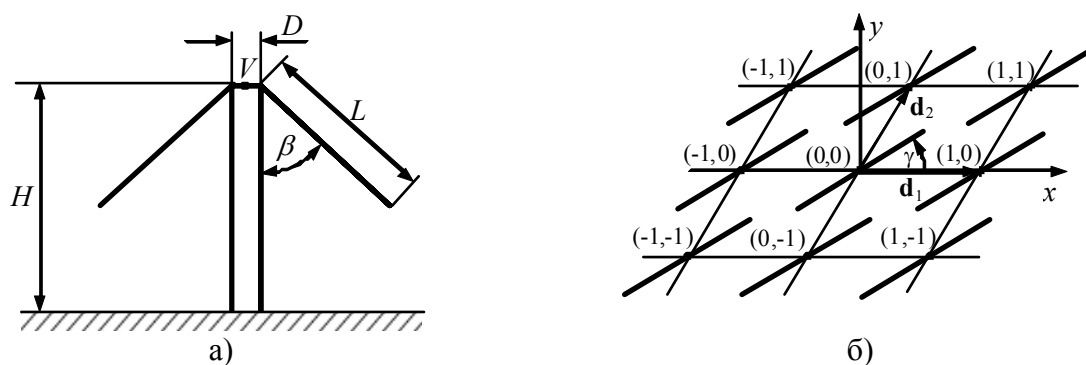


Рисунок 3 – Геометрия: а) – вибратора; б) – расположения вибраторов в решетке

В указанной работе для нахождения распределения токов на проводниках антенны использовалось уравнение типа Поклингтона, для решения которого применялся метод Галеркина. Вклады в общее поле полей соседних излучателей учитывались поэлементным методом. Таким образом, решалась система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)

$$\sum_{n=1}^N Z_{mn}^{\infty} I_n = V_n, \quad m = 1, 2, \dots, N$$

с матричными элементами вида

$$Z_{mn}^{\infty} = \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \tilde{Z}_{mn}^{pq} \exp(-ip\psi_1 - iq\psi_2), \quad (1)$$

где ψ_1 и ψ_2 – фазовые сдвиги между соседними излучателями вдоль координатных осей.

Исследовались два варианта использования ρ - и ε -алгоритмов для ускорения сходимости. В варианте 1 указанные алгоритмы применялись к частичным суммам рядов (1), представляющих матричные элементы,

$$Z_{mn}^s = \sum_{p=-s}^s \sum_{q=-s}^s \tilde{Z}_{mn}^{pq} \exp(-ip\psi_1 - iq\psi_2), \quad (2)$$

а затем находится решение, т. е. фактически применяется стандартная процедура. В варианте 2 сначала находилась последовательность решений СЛАУ для набора матричных элементов (2) при различных индексах суммирования s , а затем последовательность значений входного импеданса Z_{BX}^s (или другой выходной величины), после чего применялась процедура ускорения сходимости.

На рисунке 4 приведены зависимости входного импеданса излучателя в ФАР при фазировании по нормали к плоскости решетки в зависимости от параметра s для вариантов 1 и 2 соответственно. В данном случае используется поэлементный подход нахождения вкладов соседних излучателей. Сплошными линиями показаны результаты непосредственного нахождения входного импеданса, штриховыми и пунктирными – с применением ρ - и ε -алгоритмов ускорения сходимости соответственно. При этом величина s является порядком алгоритма ускорения. Характерно, что оба варианта дают практически одинаковые.

На рисунке 5 показаны аналогичные результаты при отклонении луча на 50° от нормали к плоскости решетки.

Численные эксперименты показывают, что в большинстве случаев ρ -алгоритм дает расходящиеся результаты и, наоборот, ε -алгоритм сходится, причем требуемый порядок алгоритма составляет $s = 2 \dots 6$. Это фактически означает, что в частичных суммах (2) достаточно удерживать 25...200 слагаемых. Обратим внимание, что такое количество слагаемых не обеспечивает сходимости исходных рядов (1).

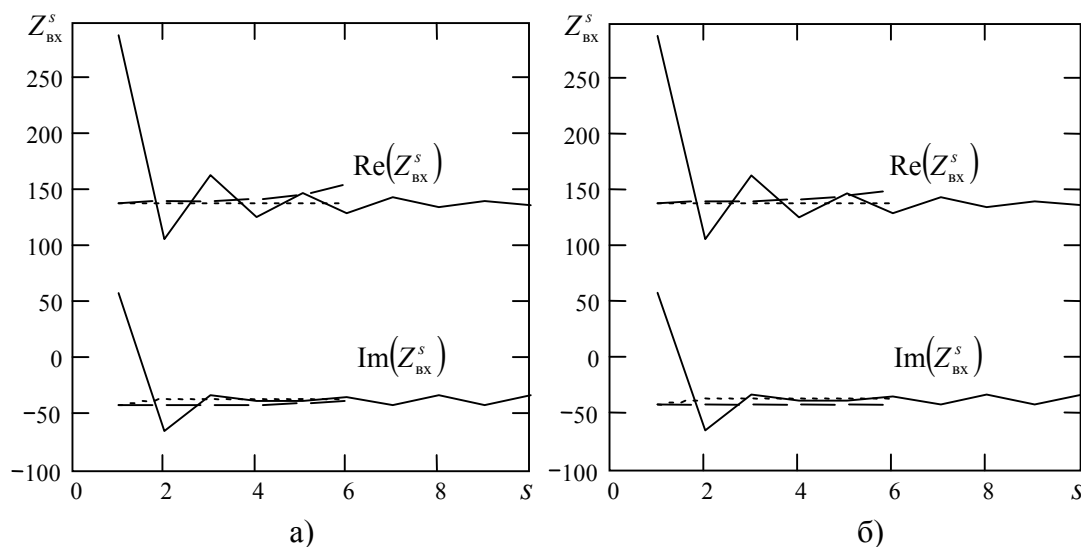


Рисунок 4 – Сходимость входного импеданса излучателя в ФАР при фазировании по нормали к плоскости решетки (поэлементный подход): а) – вариант 1; б) вариант 2

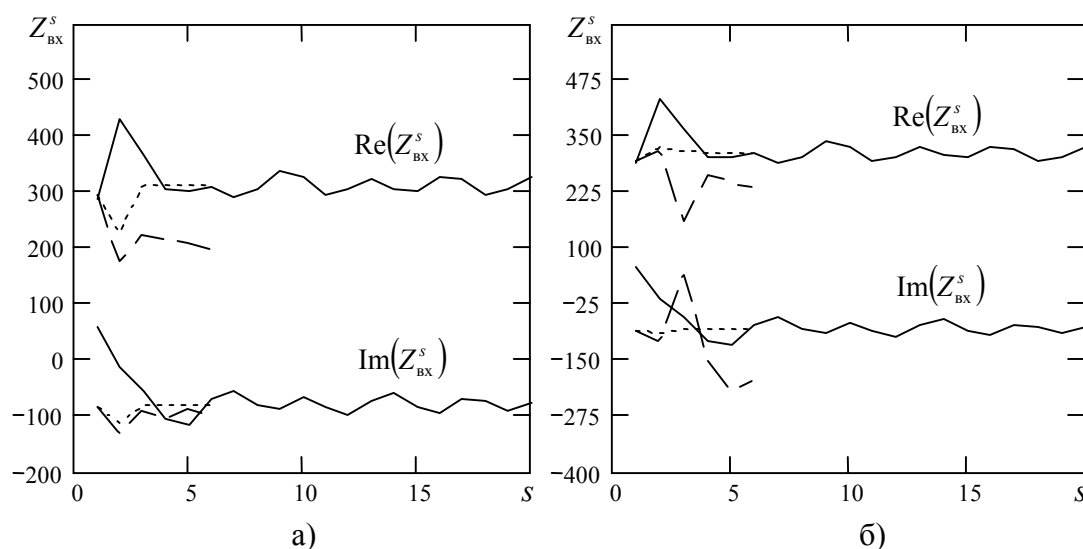


Рисунок 5 – Сходимость входного импеданса излучателя в ФАР при отклонении луча на 50° от нормали к плоскости решетки (поэлементный подход): а) – вариант 1; б) вариант 2

Рассмотрим далее улучшение сходимости результатов, полученных основанными на спектральной функции Грина методами [10]. Для примера на рисунке 6 приведены такие результаты. Подробный анализ показывает, что вариант 1 улучшения сходимости для спектрального подхода дает нестабильные результаты и лишь ухудшает ситуацию. В варианте 2 ε -алгоритм дает несколько лучшие результаты, чем ρ -алгоритм, однако говорить о полной сходимости в обоих случаях нельзя.

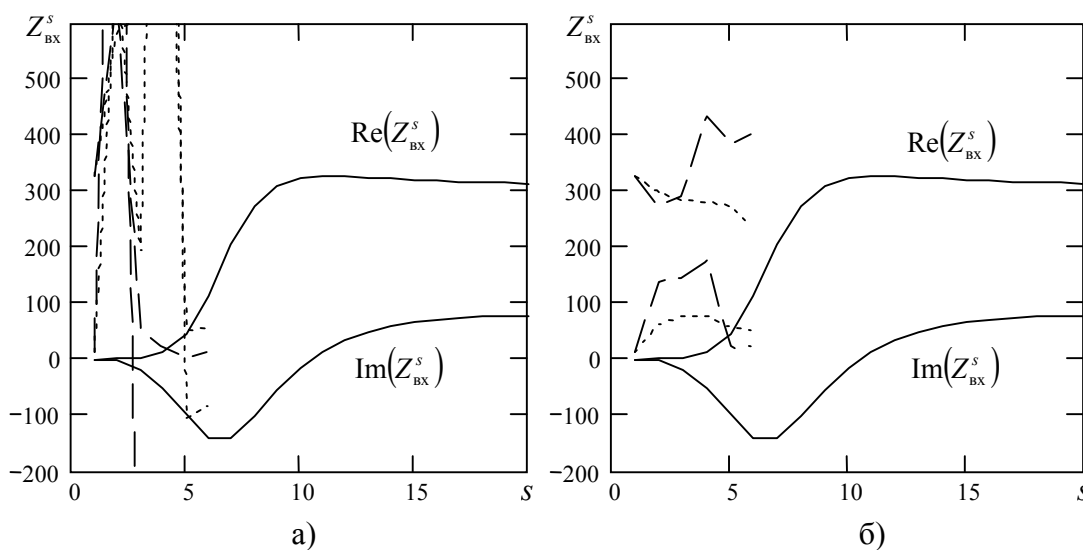


Рисунок 6 – Сходимость входного импеданса излучателя в ФАР при отклонении луча на 50° от нормали к плоскости решетки (спектральный подход): а) – вариант 1; б) вариант 2

Заключение. В работе исследована применимость ρ - и ε -алгоритмов для ускорения сходимости характеристик излучателей в составе плоской ФАР. Показано, что в большинстве случаев ε -алгоритм для поэлементного метода позволяет уменьшить число слагаемых в двойных рядах до 25...200 (на порядок и более), в то время как для спектрального метода дает нестабильные результаты. ρ -алгоритм дает расходящиеся результаты как для поэлементного, так и для спектрального методов и не может быть рекомендован для применения.

Литература

1. Lampe, R. Integral transforms useful for the accelerated summation of periodic, free-space Green's functions / R. Lampe, P. Klock, P. Mayes // IEEE Transactions. – 1985. – Vol. MTT-33, № 8. – P. 734–736.
2. Singh, S. Accelerating the convergence of series representing the free space periodic Green's function / S. Singh, W.F. Richards, J.R. Zinecker [et al.] // IEEE Transactions. – 1990. – Vol. AP-38. – № 12. – P. 1958–1962.
3. Jorgenson, R.E. Oblique scattering from lossy strip structures with one-dimensional periodicity / R.E. Jorgenson, R. Mittra // IEEE Transactions. – 1990. – Vol. AP-38, № 2. – P. 212–219.
4. Jorgenson, R.E. Efficient calculation of the free-space periodic Green's function / R.E. Jorgenson, R. Mittra // IEEE Transactions. – 1990. – Vol. AP-38, № 5. – P. 633–642.
5. Ewald, P.P. Die berechnung optischer und elektrostatischen gitterpotentiale / P.P. Ewald // Ann. der Phys. – 1921. – Vol. 64. – P. 253–287. Translated by A. Cornell, Atomics International Library, 1964.
6. Иванишин, М.М. Модификация метода Куммера для эффективного вычисления функции Грина двумерно-периодических структур / М.М. Иванишин, С.П. Скобелев // Радиотехника. – 2008. – № 10. – С. 31–36.
7. Ivanishin, M.M. A modification of the Kummer's method for efficient computation of the Green's function for doubly periodic structures / M.M. Ivanishin, S.P. Skobelev // IEEE Transactions. – 2009. – Vol. AP-57. – № 9. – P. 2794–2798.
8. Singh, S. On the use of ρ -algorithm in series acceleration / S. Singh, R. Singh // IEEE Transactions. – 1991. – Vol. AP-39, № 10. – P. 1514–1517.
9. Singh, S. Application of transforms to accelerate the summation of periodic free-space Green's functions / S. Singh, R. Singh // IEEE Transactions. – 1990. – Vol. MTT-38, № 11. – P. 1746–1748.
10. Кудин, В.П. Электродинамический анализ двумерно-периодических решеток из проволочных структур / В.П. Кудин // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2012. – № 6 (75). – С. 69–75.
11. Кудин, В.П. Плоская фазированная антенная решетка из вибраторов V-типа / В.П. Кудин // Доклады БГУИР. – 2007. – № 1 (17). – С. 42–48.

Гомельский государственный технический
университет им. П. О. Сухого

Поступила в редакцию 23.04.2018

УДК 538.958

Микроструктура многослойных пленок Cu-Zn-Sn на гибких подложках

С.А. БАШКИРОВ, В.Ф. ГРЕМЕНОК, А.В. СТАНЧИК, В.Г. ГУРТОВОЙ

Металлические прекурсоры Cu-Zn-Sn для создания пленок твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$ получены на гибких подложках методом электрохимического осаждения. Показано, что в составе прекурсоров с порядком слоев Cu/Sn/Cu/Zn, наряду с фазами меди, олова и цинка, присутствуют также интерметаллические фазы CuSn и Cu_5Zn_8 , в то время как в составе прекурсоров с порядком слоев Cu/Sn/Zn присутствуют только фазы Cu, Sn, Zn и Cu_5Zn_8 . Параметры элементарной ячейки фаз в составе полученных материалов близки к значениям для объемных поликристаллов. Отклонение фактического элементного состава материалов от технологически заложенного в среднем не превышает 3 ат. %. Средняя шероховатость поверхности пленок составляет порядка 24 нм.

Ключевые слова: микроструктура, электрохимическое осаждение, интерметаллические фазы.

The Cu-Zn-Sn metallic precursors of the $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$ solid solutions were obtained on flexible substrates by electrochemical deposition. It was shown that intermetallic phases CuSn, Cu_5Zn_8 , as well as copper, tin and zinc phases are also present in the composition of precursors with Cu/Sn/Cu/Zn layers, whereas in the composition with Cu/Sn/Zn layers are only the phases Cu, Sn, Zn and Cu_5Zn_8 are present. Lattice parameters of the materials are close to the values for bulk polycrystals. The deviation of the actual elemental composition of the materials from the technologically-based is not higher than 3 at. %. The average surface roughness of the films is about 24 nm.

Keywords: microstructure, electrochemical deposition, intermetallic phases.

Введение. Полупроводниковые твердые растворы $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$ (CZT(S,Se)) являются перспективными материалами для использования в тонкопленочных солнечных элементах. Они обладают оптической шириной запрещенной зоны в интервале 1,0–1,5 эВ (при изменении x от 0,0 до 1,0) для прямых переходов, высоким коэффициентом оптического поглощения ($> 10^4 \text{ см}^{-1}$) и проводимостью p -типа [1]. На сегодняшний день достигнутая эффективность лабораторных тонкопленочных солнечных элементов на основе CZTS, CZTSe и CZTSSe составляет 9,2 %, 11,6 % и 12,6 % соответственно [2]–[4]. Кроме того, CZT(S,Se) состоит из широко распространенных в природе и малотоксичных компонентов (медь, цинк, олово, сера/селен), что делает его дешевым и экологически чистым материалом для солнечных элементов [1].

Для получения тонких пленок CZT(S,Se) широко используются не-вакуумные методы: спрей-пиролиз, жидкофазное химическое осаждение (CBD), золь-гель и др. [1], [5], [6]. Особое внимание привлекает двухстадийная технология, на первом этапе которой получают прекурсоры Cu-Zn-Sn электрохимическим осаждением, на втором этапе производится селенизация/сульфидизация.

В большинстве работ по получению пленок CZT(S,Se) в качестве подложки использовано стекло с подслоем Mo [6]–[8]. Альтернативой стеклянным подложкам являются гибкие подложки на основе полимеров и металлических фольг [9]. Гибкость подложек позволяет существенно расширить область применения приборов на основе CZT(S,Se) и снизить их стоимость [9]. Цель настоящей работы состоит в комплексном исследовании микроструктуры многослойных металлических пленок на подложке из молибденовой фольги, предназначенных для использования в качестве прекурсоров пленок CZT(S,Se).

Методика эксперимента. Металлические слои прекурсоров Cu/Zn/Sn получены на подложках из молибденовой фольги послойным электрохимическим осаждением. Дополнительно слои олова и цинка осаждались на медной фольге для отработки режимов формирования слоев олова и цинка на меди.

В качестве анодов использовались пластины из промышленной анодной меди, высокочистого олова (99,999 %) и цинка. Осаждение металлов проводилось из водных электролитов. Осаждение меди проводилось при комнатной температуре из раствора 0,02 М CuSO_4 и 0,25 М цитрата натрия ($\text{pH} = 6,3$) при катодной плотности тока $1,0 \text{ мА/см}^2$ [10]–[16]. Для осаждения олова применялся электролит, содержащий 0,02 М SnSO_4 и 0,25 М цитрата натрия ($\text{pH} = 6,3$) [10]. Процесс проводился при температуре электролита 60°C и катодной плотности тока 6 мА/см^2 . Осаждение цинка проводилось из раствора 1 М $\text{ZnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и 0,5 М H_3BO_3 ($\text{pH} = 3,0$) при температуре электролита 60°C и катодной плотности тока 15 мА/см^2 [11], [12].

Начальное время осаждения каждого из слоев рассчитывалось по закону Фарадея [17], исходя из требования стехиометрии. Далее время осаждения корректировалось, исходя из фактического элементного состава материала. Суммарное время осаждения слоев варьировалось в интервале 360–3600 с для получения прекурсоров с общей толщиной 500–5000 нм.

Кристаллическая структура и фазовый состав материалов исследовались методом рентгеновской дифракции с использованием ДРОН-3М и Rigaku Ultima IV на излучении CuK_α с измерением 2θ в диапазоне от 20 до 100° и шагом $0,01^\circ$. Элементный состав определен методом рентгеновского спектрального микроанализа (PCM) с помощью Oxford Instruments X-MaxN. Морфология поверхности исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе LEO1455VP с увеличением 5000–20 000 при ускоряющем напряжении 20 кВ. Трехмерные изображения пленок получены методом атомно-силовой микроскопии с использованием NT-206 (Microtestmachines Co., Belarus).

Результаты и их обсуждение. *Формирование пленок олова и цинка на медных подложках.* Типичные рентгенограммы пленок олова и цинка на подложке из медной фольги представлены на рисунке 1. В составе пленок Sn на медной подложке, наряду с фазами Cu (куб., пр. гр. *Fm-3m* [18]) и Sn (тетр., пр. гр. *I41/amd* [18]), присутствует фаза состава CuSn со структурным типом соросита (гекс., пр. гр. *P63mc* [18]). В составе пленок Zn на медной подложке, помимо фазы меди, присутствует только фаза Cu_5Zn_8 (куб., пр. гр. *I-43m*, [19]). Индивидуальная фаза цинка при его электрохимическом осаждении на медь, согласно полученным данным, не формируется. Анализ рентгенограмм затруднен перекрыванием рефлексов Cu и Cu_5Zn_8 на всех углах, где наблюдаются дифракционные пики (рисунок 1,б). Однако увеличение относительной интенсивности соответствующих пиков по сравнению с их интенсивностью на рентгенограмме подложки однозначно указывает на присутствие фазы Cu_5Zn_8 в составе пленок.

Типичные рентгенограммы двухслойных пленок Sn/Zn и Zn/Sn на медной подложке представлены на рис. 2. Пленки Sn/Zn и Zn/Sn на меди содержат только фазы Cu, Zn и Sn при отсутствии интерметаллических фаз. Для рентгенограмм пленок Sn/Zn на меди (рисунок 2,а) характерно наличие рефлекса 002 Zn на $36,39^\circ$, который отсутствует на рентгенограммах пленок Zn (рисунок 1,б) и Zn/Sn (рисунок 2,б).

Формирование слоя олова на подслое цинка в пленках Zn/Sn сопровождается практически полным растворением цинксодержащего подслоя, представленного в основном фазой Cu_5Zn_8 . На это указывает значительное уменьшение интенсивности пика на $43,4^\circ$ (ср. рисунок 1,б и рисунок 2,б). В то же время, при осаждении Zn на Sn растворения олова не происходит, поскольку в гальванической паре Zn-Sn олово является катодом. Ввиду данного факта, во избежание растворения цинка при получении многослойных пленок с требуемым точным соотношением слоев представляется целесообразным использовать порядок слоев Cu/Sn/Zn, но не Cu/Zn/Sn.

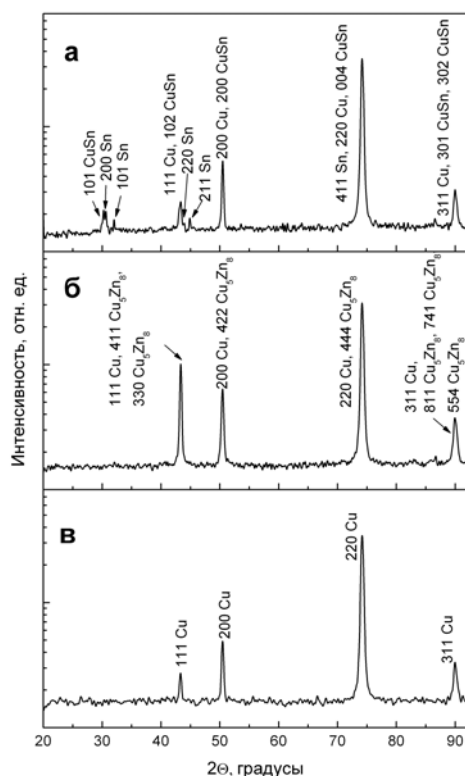


Рисунок 1 – Типичные рентгенограммы пленок Sn (а) и Zn (б) на медной подложке, а также рентгенограмма подложки (в)

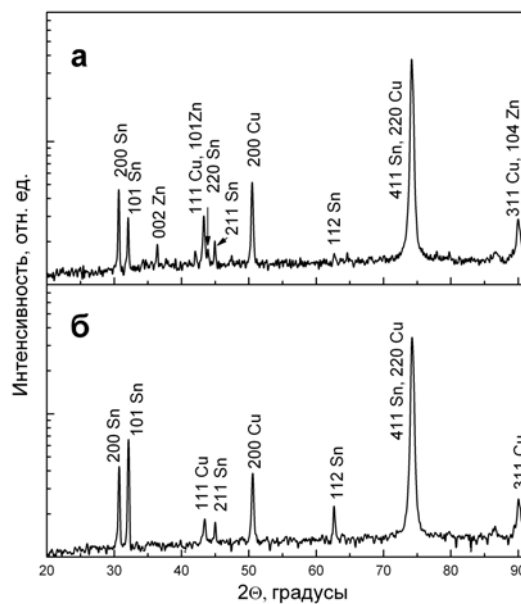


Рисунок 2 – Типичные рентгенограммы пленок Sn/Zn (а) и Zn/Sn (б) на медной подложке

Параметры элементарной ячейки металлических фаз в полученных пленках представлены в таблице 1. Параметр a кубической элементарной ячейки медной фольги, использованной в качестве подложки, составляет $3,615 \pm 0,001 \text{ \AA}$ и в пределах погрешности равен справочному значению для поликристаллов [18]. Параметры элементарной ячейки полученных металлических пленок близки к соответствующим литературным значениям для монокристаллов. Максимальные отклонения в сторону увеличения параметров наблюдаются для фазы олова в пленках Sn на меди и составляют 0,21 %, 0,25 % и 0,67 % для параметров a , c и объема элементарной ячейки V соответственно. Максимальные отклонения в сторону уменьшения параметров наблюдаются для фазы Cu_5Zn_8 в составе пленок Zn на меди и составляют 0,34 % и 2,4 % для параметра a и объема элементарной ячейки V соответственно. Установленные отклонения параметров и объема элементарной ячейки указывают на наличие макронапряжений на границе раздела «подложка-пленка».

Таблица 1 – Параметры элементарной ячейки различных фаз в составе пленок Sn, Zn, Sn/Zn и Zn/Sn на медной подложке (погрешность $\pm 0,001 \text{ \AA}$)

Тип пленки	Фазы										
	Sn			Zn			CuSn			Cu ₅ Zn ₈	
	<i>a</i> , Å	<i>c</i> , Å	<i>V</i> , Å ³	<i>a</i> , Å	<i>c</i> , Å	<i>V</i> , Å ³	<i>a</i> , Å	<i>c</i> , Å	<i>V</i> , Å ³	<i>a</i> , Å	<i>V</i> , Å ³
Sn	5,832	3,183	108,26	-			4,201	5,058	89,26	-	
Zn	-			-			-			8,848	682,7
Sn/Zn	5,831	3,180	108,12	2,667	4,942	35,15	-			-	
Zn/Sn	5,823	3,180	107,83	-			-			-	
[18], [19]	5,820	3,175	107,54	2,665	4,947	35,13	4,190	5,086	89,29	8,878	699,8

Формирование прекурсоров Cu-Zn-Sn на молибденовой подложке. Тонкие пленки металлических прекурсоров Cu-Zn-Sn могут наноситься на подложку в различном порядке слоев: Zn/Sn/Cu, Sn/Zn/Cu, Zn/Cu/Sn, Sn/Cu/Zn, Cu/Zn/Sn, Cu/Sn/Zn. Однако первые четыре варианта на практике не реализуются ввиду трудности получения пленок олова и цинка на молибдене с требуемой адгезией, а также растворении этих металлов при дальнейшем осаждении на них слоя

меди ввиду того, что в гальванических парах Cu-Sn и Cu-Zn медь является катодом. Как было показано ранее, для пленок Sn/Zn и Zn/Sn на медной фольге порядок слоев Cu/Zn/Sn также не может использоваться ввиду растворения Zn при осаждении на него Sn. Таким образом, наиболее приемлемым для практического использования является порядок слоев Cu/Sn/Zn, который применяется в большинстве работ по данному материалу [12]–[14], [20], [21], в том числе и в данной работе. Для улучшения адгезии слоев и ускорения процесса формирования интерметаллических фаз при предварительном отжиге прекурсоров целесообразно между слоями олова и цинка нанести дополнительный слой меди, в результате чего получается последовательность слоев Cu/Sn/Cu/Zn. Данная последовательность слоев также была исследована в настоящей работе.

По данным PCM, в элементный состав пленок Cu/Sn/Zn, Cu/Sn/Cu/Zn входит 46–57 ат. % Cu, 27–33 ат. % Sn и 21–25 ат. % Zn, что близко к стехиометрическому составу (50 ат. % Cu, 25 ат. % Sn, 25 ат. % Zn). Отклонение фактического элементного состава материалов от технологически заложенного в среднем не превышает 3 ат. %.

Типичные рентгенограммы образцов прекурсоров Cu/Sn/Zn и Cu/Sn/Cu/Zn представлены на рисунке 3. Параметры элементарной ячейки металлических фаз в составе прекурсоров представлены в таблице 2.

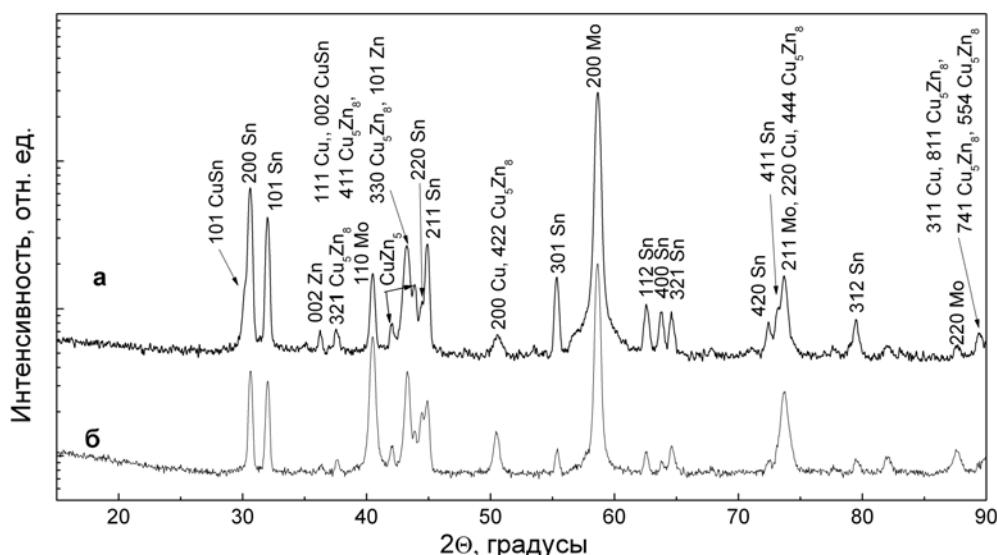


Рисунок 3 – Типичные рентгенограммы пленок Cu/Sn/Cu/Zn (а) и Cu/Sn/Zn (б) на молибденовой подложке

Таблица 2 – Параметры элементарной ячейки фаз в составе пленок Cu/Sn/Zn и Cu/Sn/Cu/Zn на молибденовой подложке (погрешность $\pm 0,001 \text{ \AA}$)

Тип пленки	Фазы													
	Cu		Sn			Zn			CuSn			Cu ₅ Zn ₈		
	<i>a</i> , Å	<i>V</i> , Å ³	<i>a</i> , Å	<i>c</i> , Å	<i>V</i> , Å ³	<i>a</i> , Å	<i>c</i> , Å	<i>V</i> , Å ³	<i>a</i> , Å	<i>c</i> , Å	<i>V</i> , Å ³	<i>a</i> , Å	<i>V</i> , Å ³	
CuSnCu/Zn	3,627	47,71	5,835	3,184	108,41	2,665	4,947	35,13	4,190	5,085	89,29	8,879	700,0	
Cu/Sn/Zn	3,619	47,40	5,833	3,184	108,33	2,665	4,947	35,13	-			8,879	700,0	
[18], [19]	3,615	47,24	5,820	3,175	107,54	2,665	4,947	35,13	4,190	5,086	89,29	8,878	699,8	

На рентгенограммах пленок Cu/Sn/Cu/Zn присутствуют фазы Cu, Sn, Zn, CuSn, Cu₅Zn₈, на рентгенограммах пленок Cu/Sn/Zn присутствуют фазы отдельных металлов Cu, Sn, Zn, а также фаза Cu₅Zn₈. Образование фазы Cu₅Zn₈ в пленках Cu/Sn/Zn при отсутствии контакта слоев цинка и меди может свидетельствовать о наличии в слое олова пор, по которым цинк из электролита проникает к медному подслою и взаимодействует с ним. Фаза CuSn, образующаяся при осаждении олова на медь, по-видимому, разрушается при дальнейшем осаждении цинка на олово, как было показано для пленок Sn/Zn на медной фольге. Не вполне ясно происхождение пиков на углах 42,1° и 43,9°. Наиболее вероятно, эти пики относятся к фазе CuZn₅, дающей рефлексы на углах 42,2° и 43,4° [22].

В составе прекурсоров с порядком слоев Cu/Sn/Zn, наряду с фазами Cu_5Zn_8 и Sn, в литературе отмечают фазы CuZn [10], CuZn_5 [16], [22], Cu_3Sn [10], [22], Cu_6Sn_5 [10], Zn [10], [14], [15]. Энергия активации формирования Cu_5Zn_8 ($34 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$) значительно ниже, чем у Cu_6Sn_5 ($72 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$) [10], что может объяснять присутствие фазы Cu_5Zn_8 при отсутствии Cu_6Sn_5 в составе материала.

Параметры элементарной ячейки фаз Zn, Cu_5Zn_8 и CuSn, согласно полученным результатам, близки к соответствующим литературным данным для объемных поликристаллов. Для фазы Sn характерно увеличение параметров и объема элементарной ячейки на 0,22–0,28 % и 0,73–0,81 % соответственно. Аналогичное увеличение параметров и объема элементарной ячейки наблюдалось для пленок олова на медной подложке (см. таблицу 1), однако для пленок олова на подслое электрохимически осажденной меди этот эффект выражен сильнее.

Типичные электронные микрофотографии и трехмерные АСМ-изображения поверхности пленок металлических прекурсоров представлены на рисунке 4. По данным СЭМ и АСМ, пленки плотно без трещин покрывают подложку и характеризуются развитой поверхностью при наличии царапин, оставшихся после очистки пленки от гидроксидного слоя. Средняя шероховатость поверхности пленок по данным АСМ составляет порядка 24 нм.

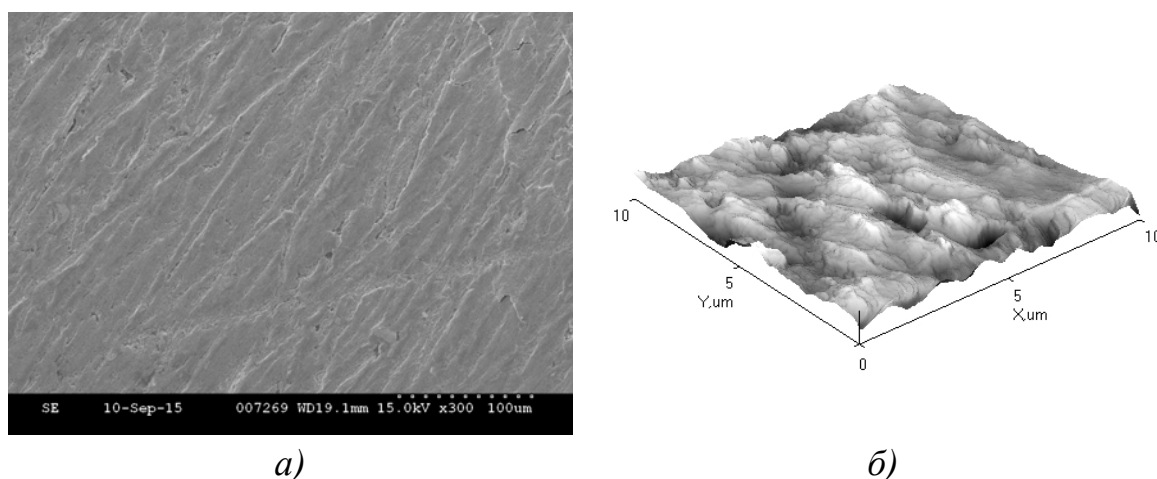


Рисунок 4 – Типичные СЭМ- (а) и АСМ-изображения (б) пленок металлических прекурсоров

Заключение. В настоящей работе методом электрохимического осаждения на гибкой подложке из молибденовой фольги получены тонкие пленки металлических прекурсоров (медь, олово, цинк) для формирования пленок твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})$. Проведено комплексное исследование микроструктуры прекурсоров Cu-Zn-Sn, включая их морфологию, элементный и фазовый составы. Показано, что в составе металлических прекурсоров с порядком слоев Cu/Sn/Cu/Zn, наряду с фазами меди, олова и цинка, присутствуют также интерметаллические фазы CuSn и Cu_5Zn_8 , в то время как в составе прекурсоров с порядком слоев Cu/Sn/Zn присутствуют только фазы Cu, Sn, Zn и Cu_5Zn_8 . Параметры элементарной ячейки фаз в составе полученных материалов близки к соответствующим значениям для объемных поликристаллов. Установлено, что в элементный состав пленок Cu/Sn/Zn, Cu/Sn/Cu/Zn входит 46–57 ат. % Cu, 27–33 ат. % Sn и 21–25 ат. % Zn, что близко к стехиометрическому составу (50 ат. % Cu, 25 ат. % Sn, 25 ат. % Zn). Отклонение фактического элементного состава материалов от технологически заложенного в среднем не превышает 3 ат. %. Средняя шероховатость поверхности пленок по данным АСМ составляет порядка 24 нм. Полученные данные будут использованы для дальнейшего развития технологии получения тонких пленок CZT(S,Se).

Благодарность. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и МИЦНТ (проект № 080-310).

Литература

1. Paranthaman, M.P. Semiconductor materials for solar photovoltaic Cells / M.P. Paranthaman, W. Wong-Ng, R.N. Bhattacharya. – Switzerland : Springer International Publishing, 2016. – V. 218. – 25 p.
2. Kato, T. Characterization of front and back interfaces on CZTS thin-film solar cells / T. Kato, H. Hiroi, N. Sakai [at al.] // In 27th European photovoltaic solar energy conference and exhibition, Frankfurt, 25–28 September 2012 / Edited by : S. Nowak [at al.]. – Frankfurt, 2012. – P. 2236–2239.
3. Lee, Y.S. $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ thin-film solar cells by thermal Co-evaporation with 11.6 % efficiency and improved minority carrier diffusion length / Y.S. Lee, T. Gershon, O. Gunawan, T.K. Todorov [at al.] // Advanced energy materials. – 2015. – V. 5, № 7. – P. 1401372.
4. Wang, W. Device characteristics of CZTSSe thin-film solar cells with 12.6 % efficiency / W. Wang, M.T. Winkler, O. Gunawan [at al.] // Advanced energy materials. – 2013. – V. 4, № 7. – P. 1301465.
5. Shockley, W. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells / W. Shockley, H.J. Queisser // J. Appl. Phys. – 1961. – V. 32. – P. 510–519.
6. Kim, J. High efficiency $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ solar cells by applying a double $\text{In}_2\text{S}_3/\text{CdS}$ emitter / J. Kim, H. Hiroi, T.K. Todorov, O. Gunawan [at al.] // Adv. Mater. – 2014. – V. 26, № 44. – P. 7427–7431.
7. Zoppi, G. $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ thin film solar cells produced by selenisation of magnetron sputtered precursors / G. Zoppi, I. Forbes, R.W. Miles [at al.] // Prog. Photovoltaics Res. Appl. – 2009. – V. 17, № 5. – P. 315–319.
8. Seol, J.S. Electrical and optical properties of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin films prepared by RF-magnetron sputtering process / J.S. Seol, S.Y. Lee, J.C. Lee [at al.] // Sol. Ener. Mater. – 2003. – V. 75, № 1. – P. 155–162.
9. Xu, J. Characterization of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin films on flexible metal foil substrates / J. Xu, Zh. Cao, Y. Yang, Zh. Xie // J. Mater. Sci. : Mater. Electron. – 2015. – V. 26. – P. 726–733.
10. Juskenas, R. XRD studies of an electrochemically co-deposited Cu-Zn-Sn precursor and formation of a $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ absorber for thin-film solar cells / G. Niaura, Z. Mockus, S. Kanapeckaitė, R. Giraitis [at al.] // Journal of alloys and compounds. – 2016. – V. 655. – P. 281–289.
11. Juskenas, R. A two-step approach for electrochemical deposition of Cu-Zn-Sn and Se precursors for CZTSe solar cells / R. Juskenas, S. Kanapeckaitė, V. Karpaviciene [at al.] // Solar energy materials and solar cells. – 2012. – V. 101. – P. 277–282.
12. Клочко, Н.П. Кестеритные слои, полученные сульфуризацией электроосажденных металлических прекурсоров / Н.П. Клочко, А.В. Момотенко, В.Н. Любов, Н.Д. Волкова [и др.] // ФИП PSE. – 2014. – Т. 12, № 4. – С. 487–504.
13. Ananthoju, B. Improved structural and optical properties of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin films via optimized potential in single bath electrodeposition / B. Ananthoju, F.J. Sonia, A. Kushwaha [at al.] // J. of the Intern. Society of electrochemistry. Electrochimica acta. – 2014. – V. 137. – P. 154–163.
14. Kondrotas, R. Characterization of $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ solar cells prepared from electrochemically co-deposited Cu-Zn-Sn alloy / R. Kondrotas, R. Juskenas, A. Naujokaitis, E. Saucedo // Solar energy materials and solar cells. – 2015. – V. 132. – P. 21–28.
15. Клочко, Н.П. Структура и свойства электроосажденных пленок и пленочных композиций для прекурсоров халькопиритных и кестеритных солнечных элементов / Н.П. Клочко, Г.С. Хрипунов, Н.Д. Волкова [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т. 48, № 4. – С. 539–548.
16. Yao, L. CZTSe solar cells prepared by electrodeposition of Cu/Sn/Zn stack layer followed by selenization at low Se pressure / L. Yao, J. Ao, M.J. Jeng, J. Bi [at al.] // Nanoscale research let. – 2014. – V. 9. – P. 678.
17. Lehner, J. Formation of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ and $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ by chalcogenisation of electrochemically deposited precursor layers : diss. PhD : B169 / J. Lehner. – Tallinn, 2014. – 149 p.
18. Wyckoff, R.W.G. Crystal structures / R.W.G. Wyckoff. – New York : Interscience Publishers, 1963.
19. Brandon, J.K. New refinements of the γ brass type structures Cu_5Zn_8 , Cu_5Cd_8 and $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ / J.K. Brandon, R.Y. Brizard, P.C. Chieh [at al.] // Acta crystallographica section B : Struc. crystallography and crystal chem. – 1974. – V. 30, № 6. – P. 1412–1417.
20. Raghu, N.B. Cu-Zn-Sn-S thin films from electrodeposited metallic precursor layers / N. B. Raghu, J.Y. Kim // The open surface science j. – 2012. – V. 4. – P. 19–24.
21. Huang, L. Cu content dependence of morphological, structural and optical properties for $\text{Cu}_2\text{ZnGeS}_4$ thin films synthesized by sulfurization of sputtered precursors / L. Huang, H. Deng, J. He, X. Meng [at al.] // Materials letters. – 2015. – V. 159. – P. 1–4.
22. Xiancong, He. Synthesis of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ films from co-electrodeposited Cu-Zn-Sn precursors and their microstructural and optical properties / He Xiancong, Shen Honglie, Wei Wang, Jinhong Pi [at al.] // Appl. Surf. Sci. – 2013. – V. 282. – P. 765–769.

Краткие сообщения

УДК 599.365

Обитает ли на востоке Беларуси европейский еж *Erinaceus europaeus* L., 1758?

А.А. САВАРИН, И.Д. БОРОВЦОВ

Осенью 2016 г. в Шкловском районе Могилевской области на дороге отловлен взрослый еж (*Erinaceus* sp.). Окраска волос морды – серо-черная, не характерная для особей *Erinaceus concolor roumanicus*, обитающих на территории Беларуси.

Ключевые слова: восток Беларуси, *Erinaceus europaeus*, вероятность обитания.

Inhabitation of the European hedgehog *Erinaceus europaeus* L., 1758 in the east of Belarus is under consideration. In the fall of 2016, an adult hedgehog (*Erinaceus* sp.) was caught on the road in the Shklov district of the Mogilev region. The color of the muzzle's hair was gray-black that isn't typical of the individuals of *Erinaceus concolor roumanicus* inhabiting the territory of Belarus.

Keywords: east of Belarus, *Erinaceus europaeus*, probability of habitation.

Введение. На территории Беларуси доказано обитание только одного представителя семейства Ежовые (*Erinaceidae*) – северного белогрудого ежа (*Erinaceus concolor roumanicus* Barrett-Hamilton, 1900) [1]. Особи этого подвида отловлены на территории всех областей страны (рисунок 1).



Рисунок 1 – Карта мест (*) поимок северного белогрудого ежа на территории Беларуси [1]

В приграничных районах Брянской и Смоленской областей России, а также Черниговской и Киевской областей Украины обитает только *E. c. roumanicus* [2], [3].

Содержащаяся в отдельных научно-популярных изданиях и даже научных статьях в журналах перечня ВАК информация об обитании в Беларуси европейского ежа (*E. europaeus* L., 1758) не подтверждена коллекционными находками.

Цель работы – пополнить сведения об изменчивости окраски ежей на территории Беларуси, а также указать на необходимость уточнения видовой принадлежности ежей, обитающих в северных районах Могилевской области.

Результаты и их обсуждение. 03.09.2016 г. в Шкловском районе Могилевской области на дороге Р121 (вблизи д. Новое Бращино) пойман взрослый (зимовавший) еж. Об его возрасте свидетельствует рыжеватая окраска игл на голове, общие пропорции тела. Зверек имел очень темную окраску волос морды – серо-черную, без продольных или поперечных светлых полос ниже глаз. Окраска вокруг глаз – значительно более темная, угольно-черная (рисунок 1).



Рисунок 2 – Отловленная особь *Erinaceus* sp.

Несмотря на большой объем выборки (ранее просмотренных ежей, $n > 500$), мы не наблюдали у особей *E. c. roumanicus*, обитающих на территории Беларуси, подобной окраски. Причем, нами отлавливались зверьки и на территории Шкловского, а также близлежащих Могилевского и Чаусского районов.

После кратковременного содержания в домашних условиях в г. Круглое Круглянского района еж был выпущен вблизи д. Ракушево, расположенной в 8 км от г. Круглое.

Так как указанная особь не попала в коллекционные фонды, то достоверно судить о видовой принадлежности ежа (*E. europaeus*?) не представляется возможным. Однако исключать подобной поимки также не следует.

Какова вероятность появления европейского ежа на территории Шкловского и прилегающих районов? В Беларуси традиционно гуманное отношение к ежам. В ряде случаев зверьки живут в домашних условиях и даже дарятся. С другой стороны, нам известны случаи выпуска ежей на «свободу» после содержания их в квартире. Полагаем, что теоретически и практически вероятен завоз ежа с территории России, менее – с северных районов Беларуси. Наличие «своих» небольших группировок (популяций) европейского ежа на территории Беларуси полностью исключать также нельзя.

Для решения вопроса об обитании европейского ежа (*E. europaeus*) необходима организация научной экспедиции в Шкловской и Круглянский районы Могилевской области. Наиболее гуманным представляется поиск погибших зверьков на дорогах с последующим анализом краниологического материала.

Заключение. Анализируемый случай не доказывает обитание *E. europaeus* L., 1758 на востоке Беларуси. Наиболее вероятна аномалия окраски у особи *E. c. roumanicus*, так как предположение о гибридизации двух видов ежей в контактной зоне [4] нельзя считать в полной мере доказанным.

Литература

1. Саварин, А.А. Патологии черепа северного белогрудого ежа (*Erinaceus concolor roumanicus*), обитающего на территории Беларуси / А.А. Саварин. – Гомель : БелГУТ, 2015. – 190 с.
2. Млекопитающие России: систематико-географический справочник / под ред. И.Я. Павлинова, А.А. Лисовского. – М. : Т-во научн. изданий КМК, 2012. – 604 с.
3. Зайцев, М.В. Млекопитающие фауны России и сопредельных территорий. Насекомоядные / М.В. Зайцев, Л.Л. Войта, Б.И. Шефтель. – СПб. : Наука, 2014. – 391 с.
4. Первое генетическое свидетельство гибридизации обыкновенного и южного ежей (*Erinaceus europaeus* и *E. roumanicus*) в Подмоскowie / А.С. Богданов [и др.] // Известия РАН. Серия биологическая. – 2009. – № 6. – С. 760–765.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 02.04.2018

Сообщение

Редакционная коллегия сообщает, что в № 6 (105) за 2017 год была опубликована статья Е.А. Цветковой, Ж.В. Кадолич, Т.В. Арастович, К.С. Письменниковой «Оценка групповой принадлежности синовиальной жидкости» (с. 56–60).

В данной статье обнаружено заимствование информации без соответствующего цитирования из статьи Черняковой Ю.М. и Пинчука Л.С. (Исследование групповой принадлежности синовиальной жидкости – шаг на пути к трансфузионной хондропротекции суставов / Ю.М. Чернякова, Л.С. Пинчук // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. – 2008. – № 2. – С. 53–56).

Данная информация в соответствии со статьями 42, 43 Закона Республики Беларусь «О средствах массовой информации» является опровержением авторства Е.А. Цветковой, Ж.В. Кадолич, Т.В. Арастович, К.С. Письменниковой в части информации, размещенной в указанной статье.

Технический редактор: *О.Г. Шляхтова*. Корректоры: *В.А. Бобрик, Г.Н. Петухова*

Подписано в печать 12.06.2018. Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 20,0. Уч.-изд. л. 17,42. Тираж 100 экз. Заказ № 538.
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.