

ИЗВЕСТИЯ

Гомельского государственного университета
имени Ф. Скорины

№ 5(74)

Естественные науки

2012

ИЗВЕСТИЯ

Гомельского государственного университета
имени Ф. Скорины

Научный и производственно-практический журнал

Выходит 6 раз в год

Издается с октября 1999 г.

№ 5(74)

Естественные науки

2012

Учредитель – Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь
(свидетельство о регистрации № 546 от 6 июля 2009 года)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А.В. РОГАЧЕВ (главный редактор)

О.М. ДЕМИДЕНКО (зам. главного редактора)

Л.А. ШЕМЕТКОВ (зам. главного редактора)

В.В. АНДРЕЕВ, Го ВЭНЬБИНЬ, В.Ф. БАГИНСКИЙ, Г.Г. ГОНЧАРЕНКО, А.М. ДВОРНИК, Г.М. ЕВЕЛЬКИН,
Е.В. УБОЖЕНКО (ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ), С.В. ЖАВОРОНОК, В.Г. ЖОГЛО,
Ф.В. КАДОЛ, В.Н. КАЛМЫКОВ, В.В. КИРИЧЕНКО, Г.Е. КОБРИНСКИЙ, Г.Г. ЛАЗЬКО, В.Д. ЛЕВЧУК,
А.М. ЛИТВИН, А.В. МАКАРЕВИЧ, О.А. МАКУШНИКОВ, И.В. МАКСИМЕЙ, Н.В. МАКСИМЕНКО,
Г.И. НАРСКИН, О.С. ОСИПОВА, А.Н. СЕРДЮКОВ, Н.В. СИЛЬЧЕНКО, Б.В. СОРВИРОВ, А.А. СТАНКЕВИЧ,
М.И. СТАРОВОЙТОВ, В.М. ХОМИЧ, И.Ф. ШТЕЙНЕР, В.А. ЩЕПОВ, Я.С. ЯСКЕВИЧ

Адрес редакции:

ул. Советская, 104, к. 2-17, 246019, Гомель

Тел. 57-37-91, e-mail: vesti@gsu.by

Интернет-адрес: <http://vesti.gsu.by>

© Известия Гомельского государственного
университета имени Франциска Скорины, 2012

© Proceedings of the F. Scorina Gomel State University, 2012

БИОЛОГИЯ

УДК 582.26:581.4

Влияние ионов меди на морфологические показатели *Chlorococcum hypnosporum* Starr. в культуре

Ю.М. БАЧУРА, О.М. ХРАМЧЕНКОВА

Установлено, что увеличение содержания ионов меди в культуральной среде вызывает изменение ряда морфологических признаков *Chlorococcum hypnosporum*: деформацию клеток, изменение формы хлоропластов и снижение интенсивности их окраски, утолщение клеточной стенки, отставание протопласта от клеточной стенки. Имело место нарушение спорообразования: при 2 ПДК и выше прекращалось формирование зооспор, при 2,5 ПДК и выше уменьшалось число апланоспор. Показано достоверное уменьшение диаметров клеток на 1,5–2,5 мкм при 2 ПДК и выше.

Ключевые слова: почвенные водоросли, ионы меди, морфологические показатели.

It is established that the increase in the maintenance of copper ions in cultivation substances changes some morphological signs of *Chlorococcum hypnosporum*: deformation of cells, change of chloroplast form and decrease in intensity of its colouring, thickening of a cellular wall, backlog of a protolayer from a cellular wall. Infringement of sporulation took place: at 2 maximum concentration limits and above zoospore formation stopped, at 2.5 maximum concentration limits and above the number of aplanospores decreased. Authentic reduction of diameters of cells by 1,5–2,5 microns is shown at 2 maximum concentration limits and above.

Keywords: soil algae, copper ions, morphological indicators.

Введение

Источниками поступления соединений меди в окружающую среду являются: черная и цветная металлургия, добыча и сжигание нефти, бензина, отходы рудников и выбросы предприятий [1], [2]. Ионы меди поступают в почву с пестицидами и органическими удобрениями [3]. Важными источниками также являются: ветровая пыль, лесные пожары, вулканический материал, растительность, морские соли и пр. [4]. Ионы меди способны концентрироваться в верхних слоях почвы, влиять на ее биологическую активность, быть доступными для потребления многими живыми организмами. В живых клетках ионы меди входят в состав многих ферментов, участвуют в окислительно-восстановительных процессах тканей, формировании иммунной реакции, стабилизации рибосом и мембран клеток [5], [6]. Избыточные концентрации негативно влияют на живые организмы, вызывают существенные нарушения наружных клеточных структур [7].

Токсическое действие ионов меди на почвенные водоросли показано в ряде исследований [8]–[12]. В результате воздействия обедняется почвенная альгофлора за счет угнетения и исчезновения желто-зеленых, диатомовых и азотфиксирующих сине-зеленых водорослей; наиболее устойчивы зеленые водоросли. В лабораторных условиях токсическое действие медьсодержащих соединений на водоросли проявляется в угнетении роста культур, их гибели, изменении морфологии клеток, снижении содержания хлорофилла.

В реальных почвенных условиях изменения численности и структуры альгосообществ, морфологических показателей отдельных видов не могут быть однозначно объяснены как результат влияния высоких концентраций ионов тяжелых металлов (в том числе – меди). Весьма существенно влияние на водоросли влаги, света, температуры, химических и физических свойств данного типа почвы и т. д. Методологически обоснованным подходом при изучении влияния определенных соединений на почвенные водоросли является их лабораторное

культивирование в контролируемых условиях на фоне градиента концентрации изучаемого соединения.

Целью настоящего исследования было изучение влияния соединений меди на морфологические показатели клеток *Chlorococcum hypnosporum* Start в культуре. Выбор *Ch. hypnosporum* в качестве объекта исследования связан с его популяционно-экологическими свойствами: в природе этот вид обитает в толще почвы, весьма устойчив к различным неблагоприятным условиям обитания, распространен повсеместно.

Методика исследований

Для исследования были использованы водоросли из коллекции культур почвенных водорослей кафедры ботаники и физиологии растений Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. Исходный материал для коллекции был получен ранее из аналогичной коллекции Киевского национального университета имени Т. Шевченко (Algological Collection of Kyiv University – АСКУ).

Chlorococcum hypnosporum выращивали на агаризованной среде Болда с различным содержанием растворимых соединений меди (от 0,5 ПДК до 3 ПДК). Под ПДК понимали предельно-допустимую концентрацию подвижных форм ионов меди в почвах, извлекаемую при определении ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH 4,8 [13]. В культуральную среду ионы меди вносили в форме ацетатной соли, принимая ПДК равной 3 мг/кг, плотность почвы – 1,54 г/см³.

Водоросли культивировали в климатостате КС-200 при температуре 17±2 с 14/10-часовым чередованием световой и темновой фаз, при освещении 3500–4000 лк. Наблюдение за развитием *Chlorococcum hypnosporum* проводили с помощью микроскопа Nikon Eclipse 80i. Для анализа изменения морфометрических показателей *Chlorococcum hypnosporum* через 1, 3, 5 и 7 недель фиксировали линейные размеры длины и ширины 50 вегетативных клеток и зооспор, визуально оценивали повреждения клеток. Статистическую обработку данных проводили с применением стандартного пакета Statistica 6.0.

Результаты исследований и их обсуждение

Клетки *Chlorococcum hypnosporum* яйцевидные (в основном молодые) или шаровидные (большинство зрелых), до 30 мкм в диаметре; одиночные или во временных скоплениях. Оболочка клеток тонкая, при старении культуры заметно не утолщается. Хлоропласт полый, шаровидный. Пиреноид один, окружен несколькими крупными зернами крахмала. Часто видны 2 сократительные вакуоли. Ядро одно. Зооспоры и апланоспоры образуются путем последовательного деления. Зооспоры эллипсоидные, в среднем 7,5 мкм длиной, 3,5 мкм шириной, с передней линейной стигмой. Покоящиеся клетки, обильные в стареющих культурах, с гладким наружным и шиповатым внутренним слоями оболочки, заполнены маслом, при прорастании дают начало двум клеткам [14].

К концу первой недели культивирования клетки *Chlorococcum hypnosporum* на средах 0,5–1,5 ПДК и в контроле имели нормальный вид, в культурах формировались зоо- и апланоспорангии. Начиная с 1,5 ПДК и выше зооспорангии практически отсутствовали, апланоспорангии были единичны. При 2 ПДК и выше отмечены повреждения вегетативных клеток, начальная деформация хлоропластов, утолщения клеточных стенок, гранулированность цитоплазмы (рисунок 1).

Через три недели культивирования морфологические показатели водорослей, развивающихся на средах 0,5–1 ПДК и в контроле, практически не изменились. При 1,5 ПДК у некоторых клеток наблюдалось отставание протопласта от клеточной стенки. В культурах с более высоким содержанием ионов меди нормальные клетки практически отсутствовали; имели место утолщения клеточных оболочек, деформации и обесцвечивания хлоропластов (рисунок 2). Снижение содержания хлорофилла при действии медьсодержащих соединений описано для *Anabaena variabilis* Kütz. ex Bornet et Flahault и *Scenedesmus quadricauda* Bréb. [9], [10].

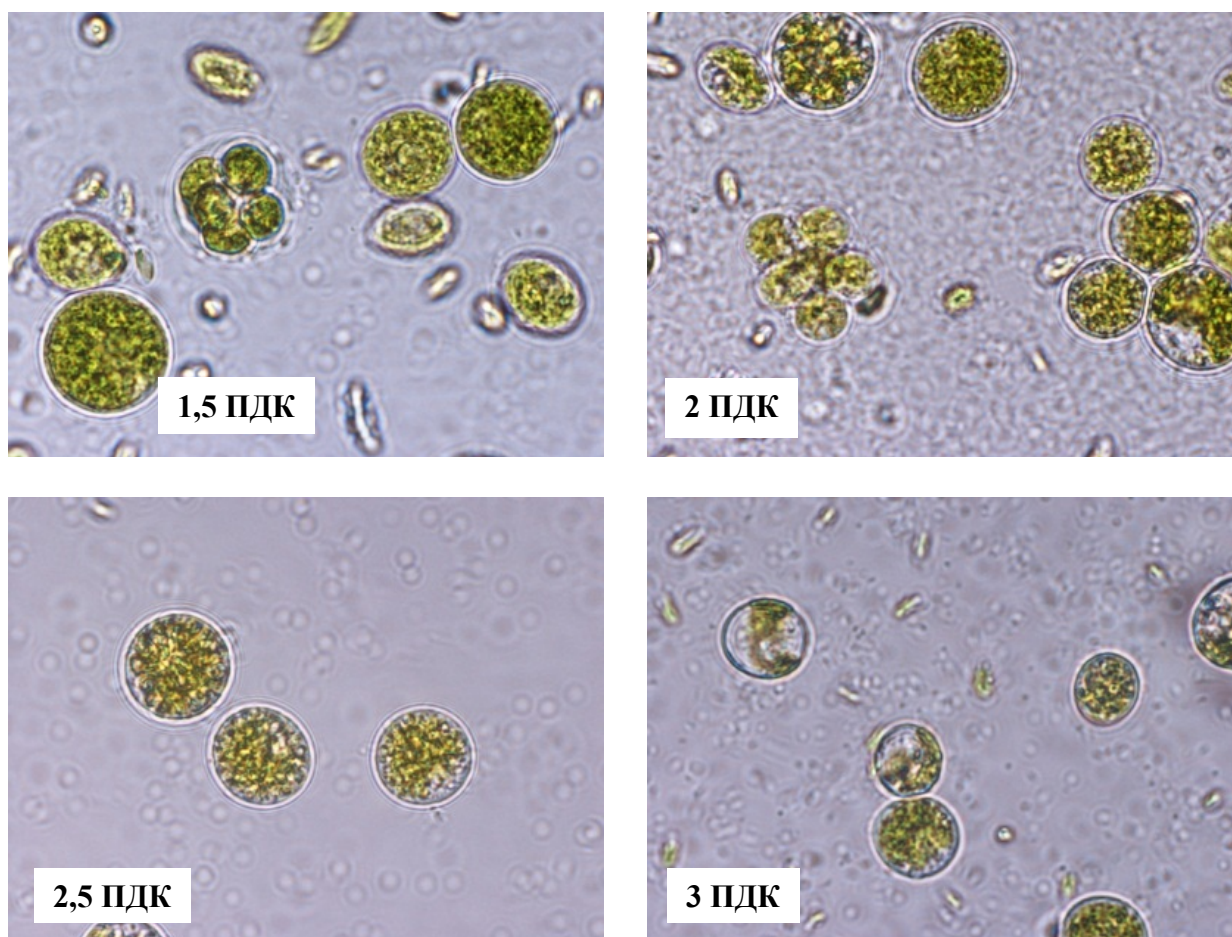


Рисунок 1 – Влияние ионов меди на культуры *Chlorococcum hypnosporum* (1 неделя культивирования)

После пяти недель культивирования культуры у *Chlorococcum hypnosporum* на средах 0,5–1 ПДК и в контроле появились первые признаки старения (накопление крахмала), формирование зоо- и апланоспорангиев продолжалось. При 1,5 ПДК наблюдалось утолщение клеточных оболочек вегетативных клеток, у каждой десятой клетки – легкая деформация хлоропласта; частично был нарушен процесс выхода зооспор из зооспорангиев. При более высоких концентрациях ионов меди отмечено утолщение клеточных оболочек, сжатие и обесцвечивание хлоропластов, вакуолизация цитоплазмы, деформация клеток.

К исходу седьмой недели культивирования контрольная культура *Chlorococcum hypnosporum* характеризовалось разновозрастным составом водорослей: наряду с преобладающими старыми шаровидными клетками, заполненными крахмалом, присутствовали молодые яйцевидные клетки (рисунок 3).

Окраска клеток была менее интенсивной, зоо- и апланоспорангии присутствовали. При 1 ПДК у некоторых клеток наблюдалось отставание протопласта от клеточной стенки. При 2 ПДК клетки были шаровидными со значительными утолщениями клеточных оболочек (до 3 мкм), сильной деформацией и обесцвечиванием хлоропластов, отстающими от клеточной стенки протопластами. Наблюдалась деформация и гибель клеток водорослей; зооспорангии отсутствовали, апланоспорангии были единичны, выхода апланоспор зафиксировано не было.

При 2,5 и 3 ПДК нормальных клеток в культурах не выявлено, возросло число мертвых и отмирающих клеток, увеличилась степень деформации клеток и хлоропластов, вакуолизация цитоплазмы, клеточная оболочка в некоторых случаях была утолщена до 5 мкм, зоо- и апланоспорангии не выявлены.

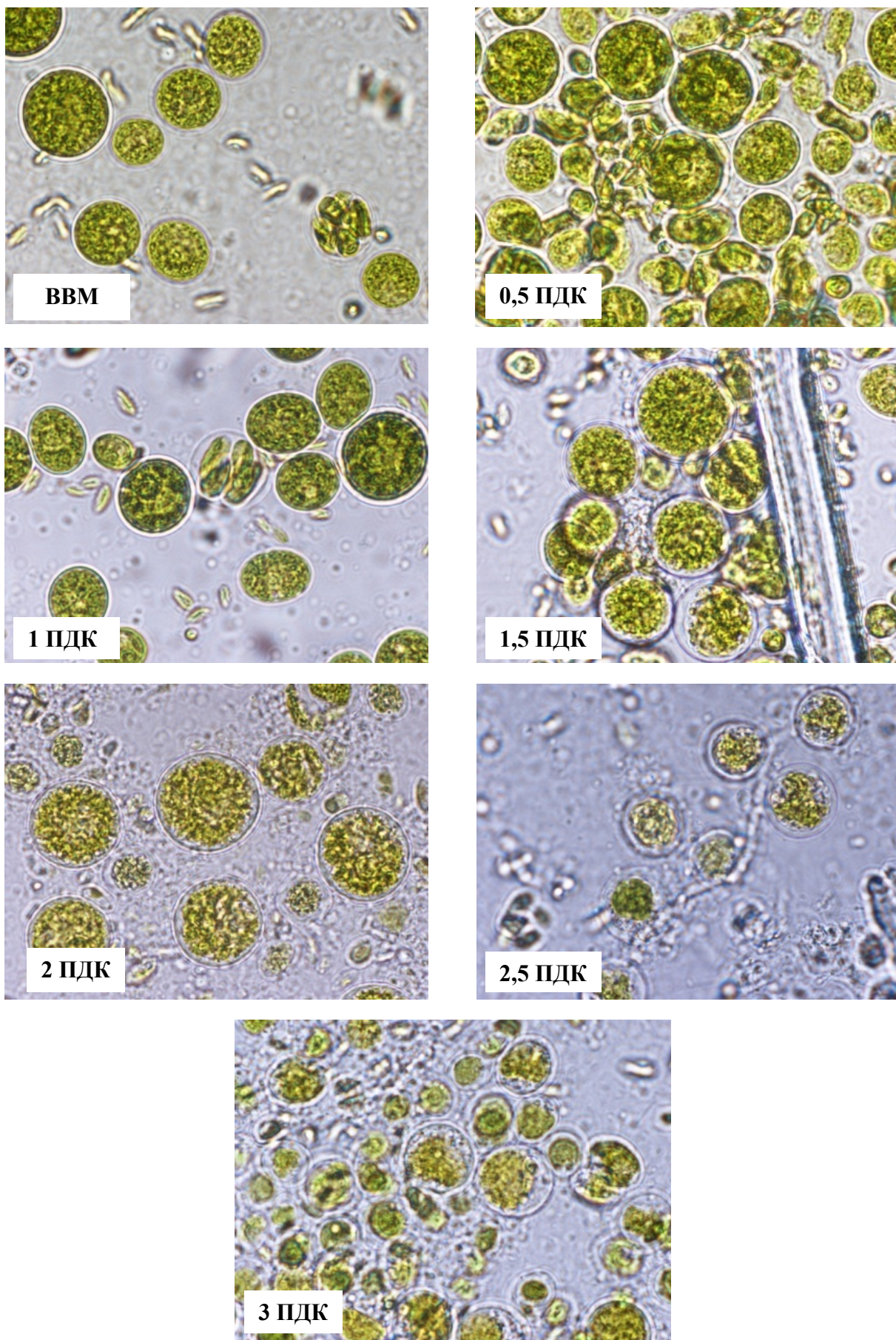


Рисунок 2 – Влияние ионов меди на культуры *Chlorococcum hynnosporum* (3 недели культивирования)

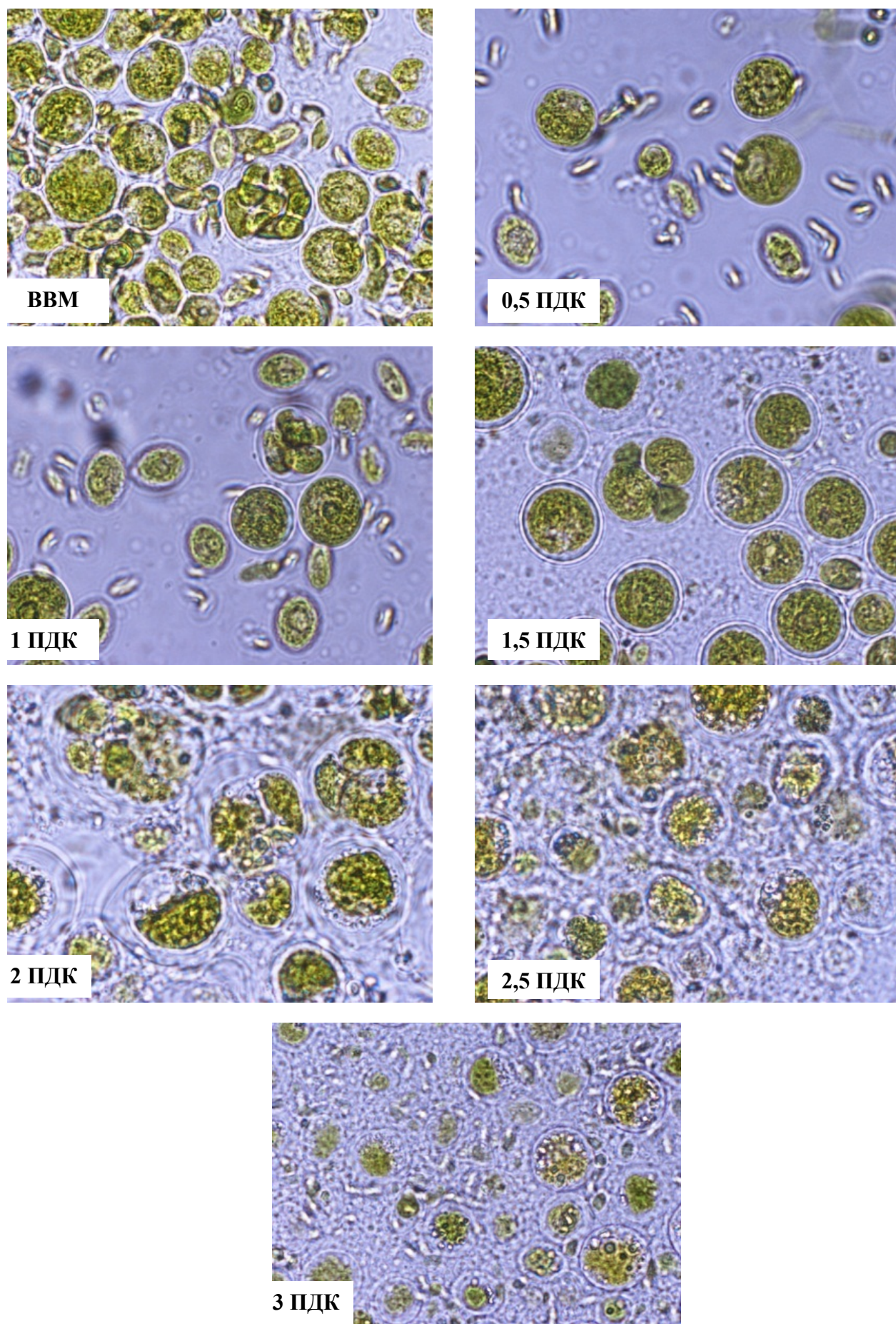


Рисунок 3 – Влияние ионов меди на культуры *Chlorococcum hypnosporum* (7 недель культивирования)

На рисунке 4 приведены результаты измерения длины (диаметра) клеток *Chlorococcum hypnosporum* в культуре.

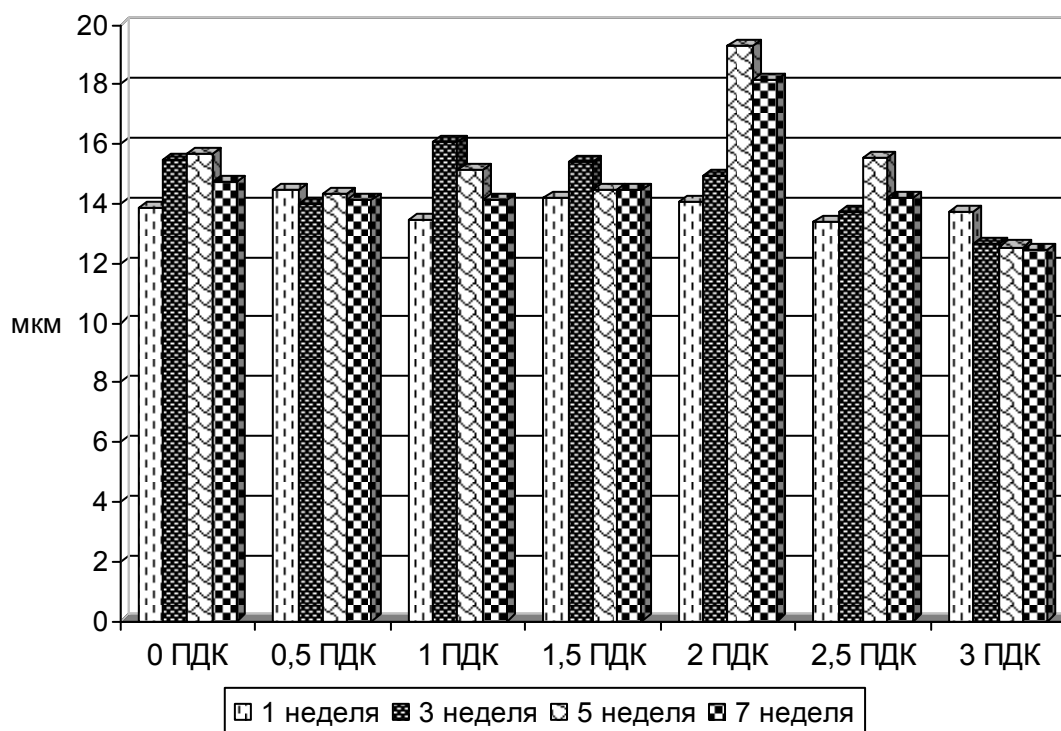


Рисунок 4 – Медианы длины клеток *Chlorococcum hypnosporum* в культуре

К концу первой недели культивирования диаметр вегетативных клеток, длина и ширина зооспор во всех вариантах опыта не отличались от контроля. Через три недели культивирования значения длины и ширины клеток при 2,5 ПДК и 3 ПДК были достоверно ниже контрольных на 1,5–2,5 мкм. После пяти недель культивирования было обнаружено, что величины диаметра вегетативных клеток и длины и ширины зооспор в большинстве вариантов опыта находились на уровне контроля, тогда как при 2 ПДК они превышали контроль на 4–5 мкм, при 3 ПДК были ниже контроля на 3 мкм. К исходу седьмой недели культивирования показатели длины и ширины клеток соответствовали таковым для пятой недели наблюдений. Полученные данные свидетельствуют о достоверном влиянии концентрации ионов меди на морфологические показатели клеток *Chlorococcum hypnosporum* в культуре.

Заключение

Увеличение содержания ионов меди в культуральной среде вызывает изменение ряда морфологических признаков *Chlorococcum hypnosporum*: деформацию клеток, изменение формы хлоропластов и снижение интенсивности их окраски, утолщение клеточной стенки, отставание протопласта от клеточной стенки. Имело место нарушение спорообразования: при 2 ПДК и выше прекращалось формирование зооспор, при 2,5 ПДК и выше уменьшалось число апланоспор. Показано достоверное уменьшение диаметров клеток на 1,5–2,5 мкм при 2 ПДК и выше.

Литература

1. Спозито, Г. Некоторые вопросы токсичности ионов металлов / Г. Спозито. – М. : Мир, 1993. – 284 с.
2. Кирпичников, Н.А. Влияние антропогенных факторов на распределение тяжелых металлов в почвах ландшафтов Московской области / Н.А. Кирпичников, Н.А. Черных, И.Н. Черных // Агрохимия. – 1993. – Т. 105, № 2. – С. 38–42.

3. Ключковский, В.М. Агрохимия / В.М. Ключковский. – М. : Колос, 1967. – 412 с.
4. Роева, Н.Н. Специфические особенности поведения тяжелых металлов в различных природных средах / Н.Н. Роева, Ф.Я. Ровинский, Э.Я. Кононов // Журнал аналитической химии. – 1996. – Т. 51, № 4. – С. 384–397.
5. Кабата-Пендиас, А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас. – М. : Мир, 1989. – 439 с.
6. Ковальский, В.В. Биологическая роль меди / В.В. Ковальский. – М. : Наука, 1970. – 345 с.
7. Гайсина, Л.А. Популяционная альгология / Л.А. Гайсина, А.И. Фазлутдинова, Р.Р. Кабиров. – Уфа : Гилем, 2008. – 152 с.
8. Ваулина, Э.Н. О влиянии меди на почвенные водоросли / Э. Ваулина // Ботан. ж. – 1957. – Т. 42, № 7. – 1097–1099.
9. Токсичность медьсодержащих соединений для водорослей / В.Г. Хоботьев, В.И. Капков, Е.Г. Рухадзе, Н.В. Турунина, Н.А. Шидловская // Гидробиологический журнал. – 1975. – Т. 11, № 5. – С. 49–55.
10. Дмитриева, А.Г. Анализ функциональных показателей популяции водорослей в условиях накопления меди / А.Г. Дмитриева, Г.А. Даллакян, Н.Л. Лысенко // Альгология. – 1992. – Т. 2, № 2. – С. 30–36, 109.
11. Кузяхметов, Г.Г. Альгологическая оценка токсичности препаратов меди в серой лесной почве и в черноземе выщелоченном / Г.Г. Кузяхметов // Почвоведение. – 1998. – № 8. – С. 968–973.
12. Кабиров, Р.Р. Показатели устойчивости почвенных водорослей тяжелым металлам / Р.Р. Кабиров, Е.А. Воронкова // Экологические проблемы современности : сб. науч. тр. Ч. 1 / Башкир. гос. пед. ун-т. – Уфа, 2001. – С. 152–160.
13. Справочник агрохимика / В.В. Лапа [и др.] ; под ред. В.В. Лапа. – Минск : Беларус. наука, 2007. – 390 с.
14. Андреева, В.М. Почвенные и аэрофильные зеленые водоросли / В.М. Андреева. – СПб. : Наука, 1998. – 351 с.

УДК 633.2.03:574.45

Динамика продуктивности луговых агроэкосистем на пойменных землях

Н.М. ДАЙНЕКО, Л.М. САПЕГИН, С.Ф. ТИМОФЕЕВ

Исследования показали, что в первом опыте в обоих вариантах основной вклад в формирование урожайности вносила ежа сборная (*Dactylis glomerata*), а во втором опыте – тимopheевка луговая (*Phleum pratense*). Внесение минеральных удобрений позволило увеличить урожайность травостоя в 1,9–2,0 раза по сравнению с контролем (без удобрений).

Ключевые слова: продуктивность, агроэкосистема, удобрения.

The research shows that during the first experiment in both variants it was *Dactylis glomerata* that made major contribution to the crop capacity formation, during the other experiment *Phleum pratense* appeared to contribute most. The application of mineral fertilizers made it possible to increase the productivity of the grass stand 1.9–2.0 times as compared to the control site (the one without fertilizers).

Keywords: productivity, agroecosystem, fertilizers.

Введение

Создание луговых агроэкосистем – важнейший путь интенсификации лугопастбищного хозяйства. Они высоко отзывчивы на внесение удобрений, орошение и другие приемы ухода. При создании и продолжительном использовании луговых агроэкосистем одной из проблем является поддержание стабильной продуктивности агроценопопуляций (АЦП) в составе луговых агроэкосистем.

Изучение динамики продуктивности АЦП луговых агроэкосистем представляет несомненный интерес, это дает возможность проследить изменение продуктивности с увеличением возраста травостоя с учетом хозяйственного использования и метеорологических условий на протяжении длительного периода времени.

Объекты и содержание исследований

В 2006–2011 годах нами изучалась продуктивность видов многолетних трав сеяного травостоя, созданного осенью 2004 года в пойме р. Сож (КСУП им. Ленина Гомельского района Гомельской области, Республика Беларусь). В состав травосмеси были включены следующие виды многолетних трав: ежа сборная (6 кг/га) + кострец безостый (8 кг/га) + тимopheевка луговая (8 кг/га). В этом посеве были заложены два опытных участка размером 5 х 10 м в 4-кратной повторности с вариантами: контроль (без удобрений) и $N_{60}P_{45}K_{60}$ кг/га. Весной под первый укос вносилось $N_{30}P_{45}K_{60}$ кг/га и после второго укоса N_{30} кг/га. Использование травостоя двуукосное, отчуждение в фазе «начало цветения». Почва первого опытного участка аллювиально-луговая легкосуглинистая, ее агрохимическая характеристика следующая: pH в KCl – 6,61; подвижный фосфор – 13,81 мг/100 г; гумус – 3,78%; калий – 5,86 мг/100 г почвы. Почва второго опытного участка аллювиально-луговая связно-песчаная, ее агрохимическая характеристика: pH в KCl – 6,85, подвижный фосфор – 5,67 мг/100 г; гумус – 4,69%; калий – 3,71 мг/100 г. Почвенно-грунтовые условия луговых экосистем изучались общепринятыми в почвоведении и геоботанике методами. Флористический состав изучали по методу А.А. Корчагина. Продуктивность изучали по общепринятым методикам.

Метеорологические условия в период проведения исследований представлены в таблице 1.

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

Месяц	Год						Средне-многолетние
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Апрель	$\frac{8,4}{32}$	$\frac{7,2}{22}$	$\frac{10,4}{60,0}$	$\frac{9,3}{6,0}$	$\frac{9,8}{14,7}$	$\frac{9,1}{22,6}$	$\frac{6,36}{42}$
Май	$\frac{13,6}{86}$	$\frac{17,0}{62}$	$\frac{13,8}{52}$	$\frac{14,0}{80}$	$\frac{17,5}{90,3}$	$\frac{15,4}{60,8}$	$\frac{13,7}{53}$
Июнь	$\frac{18,2}{136}$	$\frac{19,7}{53}$	$\frac{17,6}{24}$	$\frac{18,5}{132}$	$\frac{21,1}{35,9}$	$\frac{20,2}{86,3}$	$\frac{17,2}{76}$
Июль	$\frac{20,4}{44}$	$\frac{19,5}{12,4}$	$\frac{20,4}{76}$	$\frac{20,3}{233}$	$\frac{24,5}{125,3}$	$\frac{21,9}{98,6}$	$\frac{18,7}{79}$
Август	$\frac{19,0}{173}$	$\frac{20,8}{33}$	$\frac{20,2}{72}$	$\frac{17,3}{50}$	$\frac{23,5}{24,0}$	$\frac{18,8}{64,4}$	$\frac{17,7}{68}$
Сентябрь	$\frac{14,7}{45}$	$\frac{13,57}{56}$	$\frac{13,0}{47}$	$\frac{15,60}{19}$	$\frac{13,6}{60,0}$	$\frac{13,8}{22,7}$	$\frac{12,6}{51}$
Сумма осадков, мм	516	238,4	331	517	350,2	335,4	369

Метеорологические условия вегетационного периода 2006 года характеризовались теплым и влажным летним периодом, когда в июне месяце выпало в 1,8 раза осадков больше нормы, были благоприятными для развития луговых экосистем.

Метеорологические условия вегетационного периода 2007 года характеризовались более высокими температурами воздуха и недостаточным количеством осадков.

Метеорологические условия вегетационного периода 2008 года характеризовались теплым и сухим летом и осенью. Осадков за вегетационный период выпало на 57 мм меньше среднемноголетней нормы. Продолжительность затопления поймы в 2008 г. составила 62 дня (с 14 марта по 14 мая).

Метеорологические условия вегетационного периода 2009 года характеризовались теплым весенне-летним периодом, недостаточным количеством осадков в апреле. Наибольшее количество осадков выпало в июне – июле, в 1,7 и 2,9 раза выше нормы. Всего за вегетационный период выпало осадков в 1,4 раза больше в сравнении со среднемноголетними данными. В целом вегетационный период был теплым и влажным. Продолжительность затопления поймы в 2009 г. в районе г. Гомеля составила 23 суток (с 15 апреля по 7 мая).

Метеорологические условия вегетационного периода 2010 года характеризовались теплым и даже жарким (июнь – август) летом. По количеству выпавших осадков этот период приближался к среднемноголетним нормам.

Метеорологические условия вегетационного периода 2011 года характеризовались теплыми весной и летом. Температурный режим апреля – сентября превышал среднемноголетние данные, также осадков в мае, июне и июле выпало несколько больше нормы, а в сентябре – на 28,3 мм меньше. Продолжительность затопления поймы реки Сож паводковыми водами составила 74 дня (с 24 марта по 06 июня).

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты исследования динамики продуктивности дериватного сообщества *Bromopsis inermis* [Arrhenatheretalia] в 2006–2011 гг., созданного осенью 2004 года в пойме р. Сож (КСУП им. Ленина Гомельского района Гомельской области), представлены в таблице 2. Анализ таблицы 2 показывает, что наибольшей урожайностью в обоих вариантах опыта отличалась ежа сборная. Ее доля в формировании урожая за вегетационный сезон в 2006 г. в

контроле составила 52,0%, в 2007 г. – 49,1%, в 2008 г. – 47,0%, в 2009 г. – 60,4%, в 2010 г. – 62,8%, в 2011 г. – 57,7%; в удобренном варианте в 2006 г. – 62,7%, в 2007 г. – 59,1%, в 2008 г. – 63,6%, в 2009 г. – 69,9%, в 2010 г. – 72,0%, в 2011 г. – 72,0%. Почти в три раза меньше было участие в урожае тимopheевки луговой и костреца безостого. Участие внедрившихся видов было следующим: в контроле в 2006 г. – 4,1%, в 2007 г. – 17,7%, в 2008 г. – 12,1%, в 2009 г. – 15,7%, а в 2010 г. доля разнотравья возросла до 19,0%, в 2011 г. – 22,9%; в удобренном варианте соответственно: 2006 г. – 4,3%, 2007 г. – 6,9%, 2008 г. – 7,2%, 2009 г. – 6,4%, 2010 г. – 7,1%, 2011 г. – 9,0%. Наибольшая продуктивность травостоя отмечена в год закладки опыта – в 2006 году. Наименьшая урожайность отмечена в 2007 году, что связано, на наш взгляд, с недостатком осадков в вегетационный сезон (апрель – сентябрь), их выпало 238,4 мм, что составляет 64,6% от средней многолетней нормы (369 мм) осадков. В 2008 году урожайность увеличилась по сравнению с урожайностью 2007 года за счет большей урожайности в первом укосе, когда наблюдалось интенсивное выпадение осадков, тогда как во втором укосе она резко уменьшилась, так как в августе месяце отмечалось повышение температуры. В 2009 г. урожайность на 1,5 ц/га сухой массы была выше, чем в 2008 г. Урожайность в контроле 2007–2011 гг. практически мало изменялась. В варианте с удобрением в 2010 году урожайность уменьшилась по сравнению с 2009 г. на 9 ц/га, что связано с засушливым периодом второй половины вегетационного периода (июль – август), в 2011 г. урожайность была выше на 1,1 ц/га.

Таблица 2 – Динамика урожайности дериватного сообщества *Bromopsis inermis* [*Arrhenatheretalia*] в пойме р. Сож по годам исследований в 2006–2011 гг. первого опытного участка

Виды растений по годам	Урожайность, ц/га сухой массы					
	I укос		II укос		Всего	
	контроль (без удобрений)	N ₃₀ P ₄₅ K ₆₀ , кг/га	контроль (без удобрений)	N ₃₀ , кг/га	контроль (без удобрений)	с удобрением
1	2	3	4	5	6	7
2006 г.						
Ежа сборная	21,2	45,2	7,4	13,6	28,6	58,8
Кострец безостый	6,3	10,5	3,2	3,1	9,5	13,6
Тимофеевка луговая	5,7	10,2	3,5	5,1	9,2	15,3
Внедрившиеся виды	2,1	1,8	2,2	1,4	4,3	3,2
Всего	35,3	67,7	16,3	23,2	51,6	90,9
НСР _{0,5} ц/га					2,8	3,1
2007 г.						
Ежа сборная	10,4	25,4	6,5	12,5	16,9	37,9
Кострец безостый	3,2	6,8	2,1	3,6	5,3	10,4
Тимофеевка луговая	3,7	7,3	2,4	4,1	6,1	11,4
Внедрившиеся виды	3,4	2,9	2,7	1,5	6,1	4,4
Всего	20,7	42,4	13,7	21,7	34,4	64,1
НСР _{0,5} ц/га					2,7	2,5
2008 г.						
Ежа сборная	16,6	35,3	5,9	14,1	22,5	47,7
Кострец безостый	3,4	8,3	1,5	3,0	4,9	11,3
Тимофеевка луговая	3,9	6,9	0,7	3,7	4,6	10,6
Внедрившиеся виды	3,6	2,2	0,8	1,5	4,4	5,4
Всего	27,5	52,7	8,9	22,3	36,4	75,0
НСР _{0,5} ц/га					3,3	2,8
2009 г.						
Ежа сборная	14,3	32,5	8,6	20,4	22,9	52,9

Кострец безостый	2,8	6,1	1,9	3,5	4,7	9,6
Тимофеевка луговая	3,2	5,2	0,9	3,9	4,1	9,1
Внедрившиеся виды	4,5	3,1	1,4	1,9	5,9	4,9
Всего	24,8	46,9	12,8	29,6	37,6	76,5
НСР _{0,5} ц/га					3,6	3,9
2010 г.						
Ежа сборная	16,7	30,4	7,4	18,2	24,1	48,6
Кострец безостый	2,2	5,1	1,2	2,7	3,4	7,8
Тимофеевка луговая	2,9	4,2	0,7	2,1	3,6	6,3
Внедрившиеся виды	4,7	3,3	2,6	1,5	7,3	4,8
Всего	26,5	43,0	11,9	24,5	38,4	67,5
НСР _{0,5} ц/га					2,1	2,4
2011 г.						
Ежа сборная	14,3	28,7	8,6	20,7	22,9	49,4
Кострец безостый	1,8	4,2	1,9	3,1	3,7	7,3
Тимофеевка луговая	2,7	3,3	1,3	2,4	4,0	5,7
Внедрившиеся виды	6,3	3,9	2,8	2,3	9,1	6,2
Всего	25,1	40,1	14,6	28,5	39,7	68,6
НСР _{0,5} ц/га						

Ниже приводятся данные о средней урожайности экосистемы за шестилетний период (таблица 3). Как видно из таблицы 3, основной вклад в формирование урожайности вносила ежа сборная. Так, в контроле ее участие составило 78%, а в удобренном варианте – 67%. Участие костреца безостого (9,3%) и тимофеевки луговой (10,0%) в контроле было по 14%, а при внесении удобрений соответственно 13,7% и 13,1% – по 16%. Роль внедрившихся видов в формировании урожая в удобренном варианте была незначительной – 6%, тогда как в контроле – 15,6%.

Таблица 3 – Средняя урожайность сеяного луга в пойме р. Сож за 2006–2010 гг. дериватного сообщества *Bromopsis inermis* [*Arrhenatheretalia*]

Виды растений	Урожайность, ц/га сухой массы					
	I укос		II укос		Всего	
	контроль (без удобрений)	N ₃₀ P ₄₅ K ₆₀ , кг/га	контроль (без удобрений)	N ₃₀ , кг/га	контроль (без удобрений)	с удобрением
Ежа сборная	15,6	32,9	7,4	16,6	23,0	49,5
Кострец безостый	3,3	6,8	2,0	3,3	5,3	10,1
Тимофеевка луговая	3,7	6,2	1,6	3,5	5,3	9,7
Внедрившиеся виды	4,1	2,9	2,1	1,7	6,2	4,6
Всего	26,7	48,8	13,1	25,1	39,8	73,9

Результаты изучения динамики урожайности дериватного сообщества *Bromopsis inermis* + *Alopecurus pratensis* [*Molinietalia*] в пойме р. Сож второго опытного участка по годам исследований в 2006–2011 гг. представлены в таблице 3. Следует отметить, что здесь уже в формировании урожая большее участие принимала тимофеевка луговая, так как ежа сборная в 2005 году пострадала от весеннего половодья, и значительная ее часть выпала из состава травостоя.

В составе травосмеси второго опытного участка наибольшей урожайностью отличалась тимофеевка луговая (таблица 4). Ее участие в формировании урожая по годам исследований колебалось в контроле от 36,3–52,7% и при внесении удобрений – 58,7–80,2% от об-

щей урожайности сухой массы. Невысоким было участие ежи сборной и костреца безостого, ежи сборной в контроле – 23,8–6,6%, костреца – 12,4–8,6%. В удобренном варианте у ежи – 13,8–10,3%, костреца – 12,5–9,3%. Внедрившихся видов в контроле – 13,5–38,6%. При внесении удобрений – 5,0–10,6%.

Таблица 4 – Динамика урожайности дериватного сообщества *Bromopsis inermis* + *Alopecurus pratensis* [Molinietalia] в пойме р. Сож по годам исследований в 2006–2011 гг. (второй опытный участок)

Виды растений по годам	Урожайность, ц/га сухой массы					
	I укос		II укос		Всего	
	контроль (без удобре- ний)	N ₃₀ P ₄₅ K ₆₀ , кг/га	контроль (без удоб- рений)	N ₃₀ , кг/га	контроль (без удобре- ний)	с удобре- нием
1	2	3	4	5	6	7
2006 г.						
Ежа сборная	7,3	12,6	3,8	4,4	11,1	17,0
Кострец безостый	5,6	8,7	2,4	3,8	8,0	12,5
Тимофеевка луговая	15,2	38,3	6,2	11,3	21,4	49,6
Внедрившиеся виды	4,1	3,6	2,2	1,9	6,3	5,5
Всего	32,2	63,2	14,6	21,4	46,8	84,6
НСР _{0,5} ц/га					1,8	2,2
2007 г.						
Ежа сборная	3,4	5,1	2,2	3,2	5,6	8,3
Кострец безостый	4,7	6,2	2,0	2,9	6,7	9,1
Тимофеевка луговая	8,1	25,7	3,6	10,7	11,7	36,4
Внедрившиеся виды	5,2	3,4	3,1	2,8	8,3	6,2
Всего	21,4	40,4	10,9	19,6	32,3	60,0
НСР _{0,5} ц/га					2,3	1,9
2008 г.						
Ежа сборная	3,9	8,6	1,2	2,2	5,1	10,8
Кострец безостый	4,2	7,3	1,1	1,8	5,3	9,1
Тимофеевка луговая	13,6	33,6	2,5	3,6	16,1	37,2
Внедрившиеся виды	5,7	1,7	1,8	1,3	7,5	3,0
Всего	27,4	51,2	6,6	8,9	34,0	60,1
НСР _{0,5} ц/га					2,4	2,6
2009 г.						
Ежа сборная	2,2	6,2	1,3	2,8	3,5	9,0
Кострец безостый	3,1	5,7	1,2	2,5	4,3	8,2
Тимофеевка луговая	12,4	31,2	4,4	12,8	16,8	44,0
Внедрившиеся виды	7,2	2,8	2,9	1,6	10,1	4,4
Всего	24,9	45,9	9,8	19,7	34,7	65,6
НСР _{0,5} ц/га					2,8	2,9
2010 г.						
Ежа сборная	1,3	4,4	1,1	2,1	2,4	6,5
Кострец безостый	2,6	3,8	1,3	1,9	3,9	5,7
Тимофеевка луговая	13,1	33,1	5,2	10,6	18,3	43,7
Внедрившиеся виды	8,2	3,5	3,3	1,9	11,5	5,4
Всего	25,2	44,8	10,9	16,5	36,1	61,3
НСР _{0,5} ц/га					2,1	1,8

2011 г.						
Кострец безостый	2,2	4,2	1,1	2,2	3,3	6,4
Тимофеевка луговая	12,4	34,8	7,8	20,6	20,2	55,4
Внедрившиеся виды	10,6	4,7	4,2	2,6	14,8	7,3
Всего	25,2	43,7	13,1	25,4	38,3	69,1
НСР _{0,5} ц/га						

Следует отметить, что наибольшая урожайность в обоих вариантах опыта отмечена в 2006 году, в последующие годы она характеризовалась стабильностью в удобренном варианте. Прибавка от внесения удобрений составила 25,2–37,8 ц/га сухой массы.

Результаты средней урожайности дериватного сообщества *Bromopsis inermis* + *Alopecurus pratensis* [Molinetalia] в пойме р. Сож второго опытного участка за 2006–2011 гг. представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Средняя урожайность дериватного сообщества *Bromopsis inermis* + *Alopecurus pratensis* [Molinetalia] в пойме р. Сож за 2006–2011 гг. (второй опытный участок)

Виды растений	Урожайность, ц/га сухой массы					
	I укос		II укос		Всего	
	контроль (без удобре- ний)	N ₃₀ P ₄₅ K ₆₀ , кг/га	контроль (без удоб- рений)	N ₃₀ , кг/га	контроль (без удобре- ний)	с удоб- рением
Ежа сборная	3,6	6,2	1,6	2,5	5,5	8,7
Кострец безостый	4,0	6,0	1,3	2,6	5,0	8,6
Тимофеевка луговая	12,5	32,8	4,9	8,2	17,4	41,0
Внедрившиеся виды	6,8	3,3	2,2	1,9	9,0	5,2
Всего	26,9	48,3	10,0	15,2	36,9	63,5

В этом опыте наибольшее участие в формировании урожая уже принимала тимофеевка луговая, в контроле – 47,2%, в удобренном варианте – 64,6%. Ежа сборная и кострец безостый принимали почти одинаковое участие в обоих вариантах – 14,9–13,7%. Следует отметить, что в контроле доля внедрившихся видов составила 24,40%, а в удобренном варианте – 8,2%.

Таким образом, внесение минеральных удобрений на сеянном травостое, созданном на естественном пойменном лугу, позволило увеличить урожайность в 1,9–2,1 раза по сравнению с контролем (без удобрений).

УДК 582.29+582.26/.27+582.32+592:591.5:502.3

Влияние отвалов химического производства на видовое разнообразие лишайников, споровых растений и некоторых групп беспозвоночных

В.А. СОБЧЕНКО, О.М. ХРАМЧЕНКОВА, А.Г. ЦУРИКОВ, Ю.М. БАЧУРА,
В.Н. ВЕРЕМЕЕВ, Н.Г. ГАЛИНОВСКИЙ, С.В. ЖАДЬКО

В условиях присутствия в среде обитания фосфогипса отмечено 28 видов лишайников, 32 вида почвенных водорослей, 28 видов мохообразных и 69 видов жесткокрылых. Изучены особенности заселения фосфогипса как специфического субстрата данными группами организмов.

Ключевые слова: химические отходы, лишайники, растения, почвенные насекомые.

For the presence of phosphogypsum in the environment there have been found 28 species of lichens, 32 species of soil algae, 28 species of mosses and 69 species of soil insects. The peculiarities of these groups of organisms' filling the phosphogypsum as a specific substrate are analyzed in the article.

Keywords: chemical waste, lichens, plants, soil insects.

Введение

При накоплении больших запасов отходов промышленного производства может сложиться ситуация, когда минимальные, технически допустимые в процентном соотношении утечки в абсолютном исчислении могут являться дестабилизирующим фактором для окружающих экосистем. Описанная ситуация формируется на территории, прилегающей к местам складирования отвалов фосфогипса ОАО «Гомельский химический завод», где уже накоплено 17–20 млн. тонн отходов. Ранее проводимые исследования влияния химического производства преимущественно были направлены на изучение закономерностей миграции компонентов химических отходов в подземные воды [1] либо изучение первичных сукцессий на поверхности отвалов с участием достаточно узкой группы семенных растений [2]. Переработка фосфогипса в полезные продукты в наших условиях представляется мало возможной ввиду экономических условий, высокой токсичности производства либо использования только части его состава [3].

В условиях невозможности утилизации отходов химического производства представляется актуальной оценка опасности различных компонентов отходов для наиболее уязвимых видов живых организмов, разработка способов биоиндикации и биомониторинга содержания химических загрязнителей. Базой для таких исследований является изучение состояния флоры и фауны.

Целью нашей работы являлась оценка видового разнообразия лишайников, почвенных водорослей, мохообразных и ряда групп беспозвоночных животных (на примере жесткокрылых) на поверхности отвалов химических отходов и в биотопах, расположенных в непосредственной близости от них.

Материалы и методы

Исследования проводились в вегетационные периоды 2006–2011 годов по общепринятым в ботанических и зоологических исследованиях методикам [4]–[7]. Выделение категорий отвалов проводилось исходя из сроков хранения и наличия или отсутствия на их поверхности растений: свежие отвалы (отсутствие сосудистых растений); отвалы среднего возраста (наличие травянистой растительности, всходы древесных растений), старые отвалы (присутствие травянистых и древесных растений). При изучении почвенных водорослей отбор проб на отвалах среднего возраста осуществляли на трех типах участков: без растений, с наличием мохового покрова, с травянистыми растениями и мхами.

Номенклатура таксонов почвенных водорослей дана по системе И.Ю. Костикова [8], мохообразных – согласно [6], жесткокрылых беспозвоночных – с использованием последних данных по систематике этой группы животных [9]–[10], лишайников – согласно последним сводкам таксонов Канады и США [11].

Результаты и их обсуждение

В результате наших исследований показано, что в окрестностях и на поверхности отвалов фосфогипса Гомельского химического завода не только нет «лишайниковой пустыни», но и обитает не менее 28 видов лишайников. Нами зафиксированы следующие виды: *Caloplaca cerina* (Ehrh. ex Hedw.) Th. Fr. var. *cerina*; *Caloplaca decipiens* (Arnold) Blomb. & Forssell; *Caloplaca holocarpa* s. l.; *Candelariella aurella* (Hoffm.) Zahlbr.; *Cladonia furcata* (Huds.) Schrad. ssp. *furcata*; *Cladonia fimbriata* (L.) Fr.; *Cladonia ochrochlora* Flörke; *Evernia prunastri* (L.) Ach.; *Hypocenomyce scalaris* (Ach.) M. Choisy; *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl.; *Lecanora allophana* (Ach.) Nyl.; *Lecanora carpineae* (L.) Vain.; *Lecanora crenulata* Hook.; *Lecanora dispersa* (Pers.) Sommerf.; *Lecanora symmicta* (Ach.) Ach.; *Parmelia sulcata* Taylor; *Peltigera didactyla* (With.) J. R. Laundon; *Phaeophyscia ciliata* (Hoffm.) Moberg; *Phaeophyscia nigricans* (Flörke) Moberg; *Phaeophyscia orbicularis* (Neck.) Moberg; *Physcia adscendens* (Fr.) H. Olivier; *Physcia caesia* (Hoffm.) Fűrnr.; *Physcia dubia* (Hoffm.) Lettau; *Physcia stellaris* (Ach.) Nyl.; *Physcia tenella* Bitter; *Xanthoria elegans* (Link.) Th. Fr.; *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr.; *Xanthoria polycarpa* (Hoffm.) Th. Fr. ex Rieber. Различий в видовом составе лишайниковых группировок на разных удалениях от отвалов (до 500 м) и в окрестностях разновозрастных терриконов не наблюдается. Отмечена смена доминантов в лишайносообществах различных биотопов, соответствующая таковой в антропогенно ненарушенных местообитаниях.

В результате изучения почвенной альгофлоры на отвалах фосфогипса установлено обитание не менее 32 видов почвенных водорослей следующего таксономического положения:

Отдел CYANOPHYTA, Класс CYANOPHYCEAE, ПОР. CHROOCOCCALES, Сем. Merismopediaceae: *Synechocystis salina* Wisl.; *Merismopedia* Meyen; *Microcystis (Aphanocapsa) pulvereae* (Wood) Forti in De Toni; ПОР. OSCILLATORIALES, Сем. Phormidiaceae: *Phormidium dimorphum* Lemm; ПОР. NOSTOCALES, Сем. Microchaetaceae: *Tolypothrix* Kütz. ex Born. et Flah.; Сем. Nostocaceae: *Nostoc linckia* (Roth) Born. et Flah.; *Nostoc punctiforme* (Kütz.) Hariot; *Nostoc paludosum* Kütz.; Дополнение к классу CYANOPHYCEAE: Leptolyngbyoideae: *Leptolyngbya foveolarum* (Rabenh. ex Gom.) Anagnost. et Komárek; *Leptolyngbya tenuis* (Gom.) Anagnost. et Komárek; *Leptolyngbya molle* (Kütz.) Gom.;

Отдел XANTHOPHYTA, Класс XANTHOPHYCEAE, ПОР. MISCHOCOCCALES, Сем. Heterococcaceae: *Heterococcus* Chod.;

Отдел CHLOROPHYTA. Класс CHLOROPHYCEAE, ПОР. VOLVOCALES, Сем. Chlamydomonadaceae: *Chlamydomonas* Ehr.; *Chlamydomonas oblongella* Lund; Дополнение к сем. Chlamydomonadaceae: *Palmellopsis* Korsch.; ПОР. CHLOROCOCCALES, Сем. Chlorococcaceae: *Chlorococcum* Menegh.; *Tetracystis aggregata* Broun et Bold; ПОР. PROTOSIPHONALES, Сем. Chlorosarcinaceae: *Chlorosarcinopsis* Hernd.; Сем. Neosporangiococcaceae: *Neosporangiococcum* Deason; ПОР. SCENEDESMALES, Сем. Bracteacoccaceae: *Bracteacoccus minor* (Chod.) Petrová; Сем. Oocystaceae: *Scotiellopsis rubescens* Vinatz.; Сем. Ankistrodesmaceae: *Keratococcus bicaudatus* (A. Braun) B. Petersen; Класс TREBOUXIOPHYCEAE, ПОР. MICROTAMNIALES. Сем. Leptosiraceae: *Leptosira terricola* (Bristol) Printz; Сем. Microthamniaceae: *Microthamnion kuetzingianum* Näg.; ПОР. TREBOUXIALES, Сем. Myrmeciaceae: *Myrmecia bisecta* Reisingl; *Elliptochloris* Tschermak-Woess; ПОР. CHLORELLALES, Сем. Chlorellaceae: *Chlorella minutissima* Fott et Nováková; *Chlorella vulgaris* Beijir; *Chlorella ellipsoidea* Gern; Сем. Stichococcaceae: *Stichococcus bacillaris* Näg.; ПОР. CHORICYSTIDALES, Сем. Choricystidaceae: *Pseudococcomyxa simplex* (Mainx) Fott; Класс ULVOPHYCEAE, ПОР. CHAETOPELTIDALES, Дополнение к сем. Hormotiellopsidaceae: *Fernandinella alpina* Chod.

На всех категориях отвалов, кроме старовозрастных, преобладали представители отдела *Chlorophyta* (76,9–100%). Согласно литературным данным [12], именно они чаще всего являются первопоселенцами нарушенных почв и антропогенных безжизненных субстратов.

Смена состава водорослей фосфогипсовых субстратов происходит по схеме: *Elliptochloris* sp., *Chlorosarcinopsis* sp. (свежие отвалы) → *Palmellopsis* sp., *Fernandinella alpina*, *Microcystis pulvereae*, *Chlamydomonas oblongella* и *Myrmecia bisecta* (средневозрастные отвалы без растений) → *Keratococcus bicaudatus*, *Chlorella ellipsoidea* (средневозрастные отвалы со мхами) → *Chlamydomonas* sp., *Chlorococcum* sp., *Scotiellopsis rubescens*, *Merismopedia* sp., *Neosporangiococcum* sp., *Stichococcus bacillaris*, *Heterococcus* sp. (средневозрастные отвалы с травянистыми растениями и мхами) → *Leptosira terricola*, *Leptolyngbya molle*, *Leptolyngbya tenuis*, *Leptolyngbya foveolarum*, *Microthamnion kuetzingianum*, *Tolypothrix* sp., *Phormidium dimorphum*, *Bracteacoccus minor*, *Nostoc paludosum*, *Nostoc punctiforme*, *Nostoc linckia* (старые отвалы).

На участках средневозрастных отвалов фосфогипса со мхами наблюдалось резкое уменьшение числа почвенных водорослей, что, возможно, обусловлено более низкой конкурентной способностью водорослей по сравнению с другими растениями, в том числе и мхами. Появление представителей отдела *Xanthophyta* на участках средневозрастных отвалов с растениями и на старовозрастных отвалах фосфогипса указывает на некоторое улучшение условий существования водорослей. На старых отвалах фосфогипса отмечено усложнение таксономической структуры водорослей, в основном за счет резкого увеличения доли синезеленых водорослей в составе альгогруппировок (47,6%).

Мохообразные отвалов и их ближайших окрестностей (до 500 м) характеризуются наличием 28 видов следующего таксономического состава: Отдел ANTHOCEROTOPHYTA, Класс ANTHOCEROTOPSIDA, ПОР. ANTHOCEROTALES, сем. Anthocerotaceae: *Anthoceros agrestis* Paton; *Phaeoceros laevis* (L.) Prosk;

Отдел BRYOPHYTA. Класс HEPATICOPSIDA, Подкласс JUNGERMANNIIDAE, ПОР. METZGERIALES, сем. Pelliaceae: *Pellia epiphylla* (L.) Corda; сем. Blasiaceae: *Blasia pusilla* L.; сем. Aneuraceae: *Aneura pinguis* (L.) Dum; ПОР. JUNGERMANNIALES, сем. Geocalycaceae: *Lophocolea heterophylla* (Schrad.) Dum.; сем. Cephaloziaceae: *Cephalozia connivens* (Dicks.) Lindb.; Подкласс MARCHANTIIDAE, ПОР. MARCHANTIALES, сем. Conocephalaceae: *Marchantia polymorpha* L.; Класс BRYOPSIDAЕ. Подкласс BRYIDAE, ПОР. POLYTRICHALES, сем. Polytrichaceae: *Polytrichum juniperinum* Hedw.; *Polytrichum piliferum* Hedw.; ПОР. FUNARIALES, сем. Funariaceae: *Funaria hygrometrica* Hedw.; ПОР. POTTIALES, сем. Pottiaceae: *Tortula ruralis* Hedw.; ПОР. ORTHOTRIHALES, сем. Orthotrichaceae: *Orthotrichum striatum* Hedw.; *Orthotrichum affine* Brid.; ПОР. DICRANALES, сем. Ditrichaceae: *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid.; сем. Dicranaceae: *Dicranum polysetum* Sw.; *Dicranum scoparium* Hedw.; *Dicranella heteromalla* (Hedw.) Schimp.; ПОР. BRYALES, сем. Bryaceae: *Pohlia nutans* (Hedw.) Lindb.; сем. Mniaceae: *Plagiomnium cuspidatum* (Hedw.) T. Kop.; *Plagiomnium affine* (Bland.) T. Cop.; сем. Anomodontaceae: *Anomodon longifolius* (Brid.) Hartm; сем. Amblystegiaceae: *Amblystegium serpens* (Hedw.) Shimp. in B.S.G.; *Calliergonella cuspidata* (Hedw.) Loesche; сем. Brachytheciaceae: *Brachythecium albicans* (Hedw.) Shimp. in B.S.G.; сем. Plagiotheciaceae: *Plagiothecium laetum* Shimp. in B.S.G.; сем. Hypnaceae – Гипновые: *Hypnum cupressiforme* Hedw.; сем. Hylocomiaceae: *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt.

Свежие отвалы характеризуются наличием только *Funaria hygrometrica*, *Ceratodon purpureus* и *Pohlia nutans*. На отвалах среднего возраста на поверхности фосфогипса также отмечены *Ceratodon purpureus* и *Pohlia nutans*, но они формируют уже плотный покров, частично стабилизирующий поверхность фосфогипса, что способствует его зарастанию длиннокорневищными травами. В местах, где покров из этих мхов нарушен, встречается *Dicranella heteromalla* и *Brachythecium albicans*.

На старых отвалах отмечено 9 видов мохообразных. 3 из них – печеночники, которые традиционно считаются наиболее примитивными по анатомическому строению и наиболее чувствительными к загрязнению окружающей среды: *Aneura pinguis*, *Blasia pusilla* и *Marchantia polymorpha*. Интересной находкой на поверхности старого отвала является типичный лесной мох *Pleurozium schreberi* в островке растительности, сформированном вокруг нескольких берез.

В целом, с уменьшением возраста отвалов наблюдается снижение видового разнообразия бриофлоры, но в среднем на них обитает от 3 до 7 видов мохообразных, в том числе 3 печеночника. Печеночники встречаются достаточно массово у подножия отвалов и не испытывают значительного угнетения от присутствия фосфогипса. Вблизи отвалов отмечены *Aneura pinquis*, *Pellia epiphylla*, *Cephalozia connivens*, *Funaria hygrometrica*, не способные конкурировать с другими растениями в ненарушенных биотопах, что свидетельствует о нестабильности обследованных растительных сообществ. По ценотической приуроченности среди зафиксированных мхов представлены напочвенные и эпифитные виды, характерные как для антропогенно нарушенных мест обитания, так и типично лесные мхи. Наиболее обильным мхом является *Ceratodon purpureus*. Его предшественником при завоевании субстратов (в том числе и в городских условиях) обычно является *Bryum argenteum*, не отмеченный в данных условиях. По-видимому, *Bryum argenteum* чувствителен к компонентам фосфогипса и может выступать индикаторным видом.

Изучение комплексов почвообитающих беспозвоночных показало, что свежие отвалы фосфогипса характеризуются отсутствием постоянных обитателей. На их поверхности иногда отмечаются передвигающиеся одиночные экземпляры пауков и жукелиц. В сухую солнечную погоду муравьи (*Lasius niger* Linnaeus) используют свежие отвалы фосфогипса для быстрого передвижения от одного участка вне отвалов к другому по близкой к прямолинейной траектории.

На средневозрастных отвалах собственно почвенные обитатели отсутствуют. На поверхности почвы в подстилке доминируют имаго жесткокрылых. Среди них преобладают жукелицы с массовым видом *Harpalus rufipes* Degeer и пилюльщики, встречаются тлевые коровки, долгоносики и пластинчатоусые жуки, довольно велика численность пауков, единично отмечены краснотелковые клещи.

На старых отвалах имеется тенденция увеличения видового разнообразия и численности почвообитающих беспозвоночных, но статистически значимые отличия отсутствуют. Они заселяют толщу почвы до глубины 5–10 см, не проникая в слой фосфогипса. Доминируют жесткокрылые (более 90% численности). Преобладают жукелицы с тем же массовым видом и щелкуны с доминантным видом *Agriotes lineatus* Linnaeus. В толще почвы, кроме щелкунов, встречаются личинки долгоносика *Otiorhynchus ovatus* Linnaeus, в небольшом количестве отмечены стафилиниды, встречаются пауки, численность которых, однако, меньше, чем на средневозрастных отвалах.

По сравнению с луговым фитоценозом на старых отвалах фосфогипса биоразнообразие и численность почвенных беспозвоночных значительно меньше. Отсутствуют дождевые черви и двукрылые, что свидетельствует о том, что комплексы почвообитающих беспозвоночных отвалов фосфогипса даже через 50 лет находятся на стадии формирования.

Значительно большим видовым разнообразием отличались жесткокрылые (Coleoptera) в биотопах, расположенных у подножия отвалов. Показано наличие не менее 69 видов следующих семейств: Сем. Carabidae: *Cicindela campestris* Linnaeus; *Cicindela hybrida* Linnaeus; *Calosoma auropunctatum* Herbst; *Calosoma investigator* Illiger; *Carabus granulatus* Linnaeus; *Broscus cephalotes* Linnaeus; *Asaphidion flavipes* Linnaeus; *Bembidion andreae polonicum* Müller; *Bembidion lampros* Herbst; *Bembidion properans* Stephens; *Poecilus cupreus* Linnaeus; *Poecilus lepidus* Leske; *Poecilus versicolor* Sturm; *Pterostichus melanarius* Illiger; *Pterostichus niger* Schaller; *Pterostichus oblongopunctatus* Fabricius; *Pterostichus quadrioveolatus* Letzner; *Pterostichus vernalis* Panzer; *Calathus ambiguus* Paykull; *Calathus erratus* Sahlberg; *Calathus fuscipes* Goeze; *Calathus micropterus* Duftschmid; *Amara aenea* DeGeer; *Amara brunnea* Gyllenhal; *Amara communis* Panzer; *Curtonotus aulicus* Panzer; *Harpalus rubripes* Duftschmid; *Harpalus rufipes* DeGeer; *Harpalus tardus* Panzer; Сем. Silphidae: *Nicrophorus vespillo* Linnaeus; *Silpha carinata* Herbst; *Silpha obscura* Linnaeus; Сем. Staphylinidae: *Atheta flavipes* Gravenhorst; *Drusilla canaliculata* Fabricius; Сем. Scarabaeidae: *Onthophagus ovatus* Linnaeus; *Aphodius niger* Panzer; *Rhyssalus germanus* Linnaeus; *Phyllopertha horticola* Linnaeus; Сем. Limnichidae: *Limnichus sericeus* Duftschmid, 1825; Сем. Elateridae: *Agrypnus murinus* Linnaeus; *Prosternon tesellatum* Linnaeus; *Selatosomus aeneus* Linnaeus; *Agriotes lineatus* Linnaeus; *Agriotes obscurus*

Linnaeus; *Agriotes sputator* Linnaeus; Сем. Buprestidae: *Ovalisia decipiens* Gebler; Сем. Byrrhidae: *Morychus aeneus* Fabricius; *Lamprobyrrhulus nitidus* Schaller; *Byrrhus fasciatus* Forster; *Byrrhus pilula* Linnaeus; Сем. Dermestidae: *Dermestes lanarius* Illiger; Сем. Trogossitidae: *Ostoma ferruginea* Linnaeus; Сем. Coccinellidae: *Coccinella septempunctata* Linnaeus; Сем. Anthicidae: *Notoxus monoceros* Linnaeus; Сем. Tenebrionidae: *Opatrum sabulosum* Linnaeus; *Crypticus quisquilius* Linnaeus; Сем. Chrysomelidae: *Oulema melanopus* Linnaeus; *Cassida nebulosa* Linnaeus; *Cassida viridis* Linnaeus; Сем. Curculionidae: *Otiorhynchus ovatus* Linnaeus; *Otiorhynchus raucus* Fabricius; *Otiorhynchus tristis* Scopoli; *Trachyploeus bifoveolatus* Beck; *Phyllobius argentatus* Linnaeus; *Phyllobius pyri* Linnaeus; *Chlorophanus viridis* Linnaeus; *Sitona lineatus* Linnaeus; *Ceutorhynchus punctiger* Sahlberg; *Hypera arator* Linnaeus.

Сообщество жесткокрылых, обитающих вблизи отвалов фосфогипса, также находится на стадии формирования, с преобладающими видами из родов *Harpalus* и *Otiorhynchus*. В сообществе жесткокрылых наблюдается доминирование луговых и полевых мезоксерофильных и мезофильных зоофагов и фитофагов. Вблизи отвалов формируется сообщество жесткокрылых, практически целиком сложенное из экологически пластичных видов-эврибионтов, способных обитать в самых неблагоприятных условиях окружающей среды. Это в значительной степени обедняет фауну. Кроме того, данное сообщество является своеобразным резерватом потенциальных вредителей сельскохозяйственных и цветочно-декоративных культур.

Выводы

В изученных условиях отмечено 28 видов лишайников, 32 вида почвенных водорослей, 28 видов мохообразных и 69 видов жесткокрылых. Изучены особенности заселения фосфогипса как специфического субстрата данными группами организмов.

В ряду «свежие отвалы – отвалы среднего возраста – старые отвалы – прилегающие биотопы» происходит постепенное увеличение видового разнообразия всех изученных групп организмов. Сообщества споровых растений и почвообитающих беспозвоночных на поверхности отвалов фосфогипса и в биотопах около них еще значительный промежуток времени будут находиться в стадии становления и могут являться, с одной стороны, резерватом вредителей сельскохозяйственных культур и инвазивных видов растений, с другой – местом с относительно благоприятными условиями для неконкурентоспособных видов (например, достаточно редких печеночников).

Литература

1. Коцур, В.В. Прогноз миграции загрязнения в подземных водах на участке отвалов фосфогипса / В.В. Коцур // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2003. – № 5(20). – С. 115–123.
2. Гусев, А.П. Первичная сукцессия на отвалах фосфогипса (Гомельский химический завод, Белоруссия) / А.П. Гусев // Экология. – 2006. – № 3. – С. 232–235.
3. Гридэл, Т.Е. Промышленная экология / Т.Е. Гридэл, Б.Р. Алленби / пер. с англ. – М. : Юнити-дана, 2004. – 527 с.
4. Бязров, Л.Г. Лишайники в экологическом мониторинге / Л.Г. Бязров. – М. : Научный мир, 2002. – 336 с.
5. Голлербах, М.М. Почвенные водоросли / М.М. Голлербах, Э.А. Штина. – М. : Наука, 1969. – 228 с.
6. Рыковский, Г.Ф. Флора Беларуси. Мохообразные : в 2 т. Т. 1. Andreaeopsida – Bryopsida / Г.Ф. Рыковский, О.М. Масловский. – Минск : Тэхналогія, 2004. – 437 с.
7. Количественные методы в почвенной зоологии / Ю.Б. Бызова [и др.] ; под ред. М.С. Гилярова, Б.Р. Стригановой. – М. : Наука, 1987. – 288 с.
8. Водорості ґрунтів України (історія та методи дослідження, система, конспект флори) / І.Ю. Костіков та інш. – Київ : Фітосоціоцентр, 2001. – 300 с.
9. Каталог жесткокрылых (Coleoptera, Insecta) Беларуси / О.Р. Александрович и др. – Минск : ФФИ РБ. – 1996. – 103 с.

10. Fauna Europaea [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.faunaeur.org>. – Дата доступа : 15.03.2009.
11. Esslinger, T.L. A cumulative checklist for the lichen-forming, lichenicolous and allied fungi of the continental United States and Canada [Electronic resource] / T.L. Esslinger. – Fargo, North Dakota : North Dakota State University, 2011. – Mode of access : <http://www.ndsu.edu/pubweb/~esslinge/chcklst/chcklst7-15.htm>. – Date of access : 08.11.2011.
12. Штина, Э.А. Почвенные водоросли как пионеры зарастания техногенных субстратов и индикаторы состояния нарушенных земель / Э.А. Штина // Журнал общей биологии. – 1985. – Т. XLVI, № 4. – С. 435–443.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступило 15.05.12

Лихенологический отдел гербария GSU. I. Род *Cladonia* Hill ex P. Browne

А.Г. ЦУРИКОВ, О.М. ХРАМЧЕНКОВА, Е.В. ЦУКАНОВА

Приводится список образцов лишайников рода *Cladonia*, хранящихся в Научном гербарии Белорусского Полесья кафедры ботаники и физиологии растений учреждения образования «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины» (GSU).

Ключевые слова: лишайники, *Cladonia*, гербарий, GSU.

Cladonia genera specimens housed in The Belarusian Polesye Scientific Herbarium of Francisk Skorina Gomel State University (GSU) (the department of botany and plant physiology) are listed in the article.

Keywords: lichens, *Cladonia*, herbarium, GSU.

Введение

Развитие ботанических дисциплин зависит от источников природных ресурсов, неотъемлемой частью которых являются научные ботанические коллекции – хранилища биологического разнообразия и национального достояния любой страны. На территории Беларуси в ВУЗах имеются гербарии и коллекции, основная цель которых не только сохранение генофонда, но и проведение экологического и биологического мониторингов с целью установления масштабов антропогенных воздействий на природную среду. Одним из таких ведущих учреждений с традиционно сохранившимся и развивающимся гербарием является Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины.

Научный гербарий Белорусского Полесья кафедры ботаники и физиологии растений учреждения образования «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины» создан в 1953 году. В 1998 году гербарий кафедры был включен в международную сеть гербариев и получил международный акроним GSU. В 2006 году гербарий кафедры на основании решения коллегии Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды включен в государственный реестр ботанических коллекций и в 2007 году признан особо ценной ботанической коллекцией (выдано свидетельство № 1).

Начало лихенологическому отделу гербария было положено в середине 1960-х гг. Во второй половине 2000-х годов была создана международная секция лихенологического отдела. Был налажен обмен гербарными образцами с зарубежными университетами и институтами. К настоящему времени в гербарии хранится более 2000 гербарных конвертов. Для облегчения работы и упрощения поиска необходимой информации создана постоянно обновляемая и пополняемая база данных гербария лишайников, включающая полную характеристику образца. Также начат учет и нумерация гербарных конвертов.

Каталогизация была начата с образцов рода *Cladonia* Hill ex P. Browne как наиболее представленного рода в гербарии.

Методика исследований

Идентификация хранящихся в коллекции образцов лишайников проводилась в лабораториях кафедры ботаники и физиологии растений биологического факультета Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. Видовая принадлежность некоторых видов лишайников была уточнена на кафедре ботаники факультета биологии и экологии Гродненского государственного университета им. Я. Купалы, за что приносим свою благодарность к.б.н., доценту В.В. Голубкову.

Определение образцов проводили с использованием микроскопов МБС-9 и Nikon Eclipse 80i. При определении лишайников использовали метод цветных реакций со следую-

щими химическими реактивами: 10% водный раствор KOH (K), насыщенный водный раствор CaCl_2O_2 (C), 10% спиртовой раствор парафенилендиамина $\text{C}_6\text{H}_4(\text{NH}_2)_2$ (P). Поскольку изучение образцов методом тонкослойной хроматографии (TLC) не проводили, разграничение видов лишайников приводятся согласно концепциям, изложенным в [1] с учетом современной номенклатуры [2].

Результаты и их обсуждение

В результате инвентаризации лишайников рода *Cladonia* гербария GSU был зафиксирован 31 вид, 2 подвида и 1 разновидность лишайников.

- 1 *Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot. *ssp. arbuscula*; *ssp. mitis* (Sandst.) Ruoss
- 2 *C. botrytes* (Hag.) Willd.
- 3 *C. cariosa* (Ach.) Spreng.
- 4 *C. carneola* (Fr.) Fr.
- 5 *C. cenotea* (Ach.) Schaer.
- 6 *C. cervicornis* (Ach.) Flot. *ssp. verticillata* (Hoffm.) Ahti
- 7 *C. chlorophaea* (Flörke ex Sommerf.) Spreng.
- 8 *C. coccifera* (L.) Willd.
- 9 *C. coniocraea* (Flörke) Spreng.
- 10 *C. cornuta* (L.) Hoffm.
- 11 *C. crispata* (Ach.) Flot.
- 12 *C. cyanipes* (Sommerf.) Nyl.
- 13 *C. deformis* (L.) Hoffm.
- 14 *C. digitata* (L.) Hoffm.
- 15 *C. fimbriata* (L.) Fr.
- 16 *C. furcata* (Huds.) Schrad. *ssp. furcata*; *ssp. subrangiformis* (Scriba ex Sandst.) Pisút
- 17 *C. gracilis* (L.) Willd. *ssp. gracilis*
- 18 *C. grayi* G. Merr. ex. Sandst.
- 19 *C. macilenta* Hoffm.; *var. bacillaris* (Genth) Schaer.
- 20 *C. ochrochlora* Flörke
- 21 *C. phyllophora* Hoffm.
- 22 *C. pyxidata* (L.) Hoffm.
- 23 *C. rangiferina* (L.) Wigg.
- 24 *C. rei* Schaer.
- 25 *C. scabriuscula* (Delise) Nyl.
- 26 *C. squamosa* Hoffm.
- 27 *C. stellaris* (Opiz) Pouzar & Vězda
- 28 *C. subulata* (L.) Wigg.
- 29 *C. sulphurina* (Michx.) Fr.
- 30 *C. turgida* (Ehrh.) Hoffm.
- 31 *C. uncialis* (L.) Wigg.

Первые образцы лишайников рода *Cladonia* были собраны 14 и 15 июля 1970 года и являются одними из первых образцов лишайников GSU. В гербарии хранятся образцы сборов 1970–1975, 1977, 2002–2012 гг.

Белорусские образцы были собраны на территории 2 областей (Гомельской и Брестской) и 7 районов (Буда-Кошелевского, Житковичского, Калинковичского, Каменецкого, Кормянского, Лельчицкого, Петриковского) (рисунок 1).

В гербарии хранятся также образцы, собранные на территории Воронежской, Мурманской, Оренбургской, Самарской областей, Ханты-Мансийского автономного округа Югра, Красноярского края и Республики Карелия Российской Федерации (рисунок 2).

Таким образом, в Научном гербарии Белорусского Полесья, кроме Белорусских образцов, представлены виды лишайников рода *Cladonia*, произрастающие в степных и лесо-

степных регионах (Самарская, Оренбургская области России), тайге (Сибирь, Республика Карелия), тундре (Мурманская область).

Образцы лишайников рода *Cladonia* собраны 24 коллекторами. В качестве коллекторов выступали А.Г. Цуриков (113 гербарных образцов), О.П. Шахрай (78), Н.В. Тимошенкова (20), Л.Н. Парукова (13), В.П. Прокопенко (12); Г.И. Швец (8), Е.С. Корчиков и Т.А. Карловская (по 7 гербарных образцов), Ю.М. Бачура и А.М. Радионова (по 5 образцов), В.А. Собченко, Я.Н. Гончарова и И.А. Ковалева (по 4 гербарных образца), Г.И. Абрамова и Т. Клец (по 3 образца), В.Н. Лебедько и А.В. Тейкин (по 2 образца), Бурлакова, В.А. Глазунов, Дашук, Малахова, В.Л. Миронов, Павлищева и Т. Черленок (по 1 гербарному образцу).

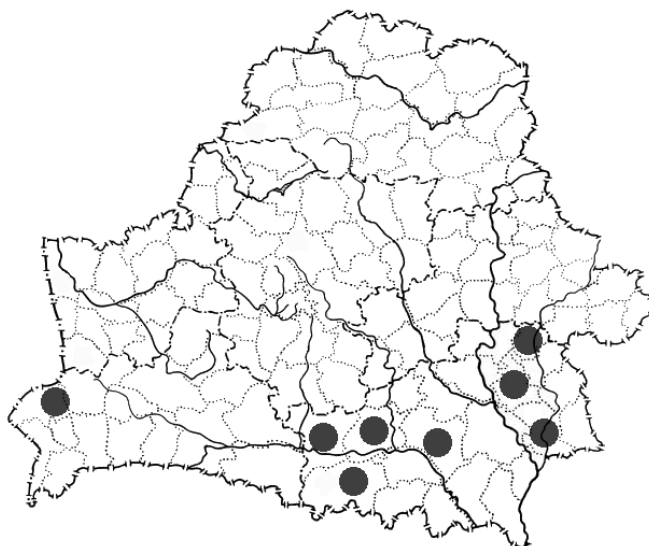


Рисунок 1 – География сбора лишайников рода *Cladonia* гербария GSU на территории Республики Беларусь

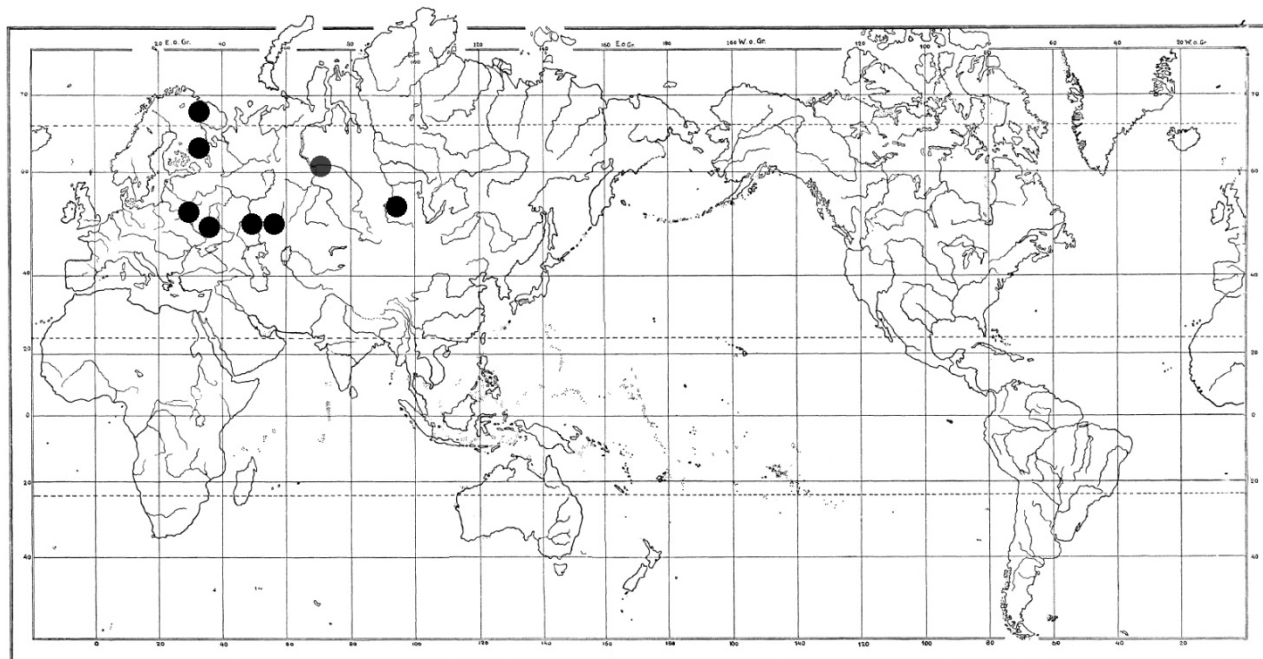


Рисунок 2 – География сбора лишайников рода *Cladonia* гербария ГГУ

Ниже приводим конспект лишайников рода *Cladonia*, хранящихся в GSU. В нем приводятся: латинские названия видов лишайников, наименования лесничеств и номера кварта-

лов, названия мест обитаний и произрастаний лишайников, инициалы, фамилии сборщиков и даты сбора, а также инвентаризационный номер гербарного образца GSU. При составлении конспекта лишайников мы использовали информацию на этикетках. К сожалению, в конспекте имеются неполные данные, которые возникли по вине сборщиков ранее оформляющих этикетки.

1. *Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot. ssp. *arbuscula* – Припятский заповедник, 60 кв. Млынокского л-ва, на почве, Дашук, 18.07.1971, (00283); Припятский заповедник, 85 кв. Озеранско-Млынокского л-ва, в сосняке лишайниковом, на почве, В.П. Прокопенко, 19.03.1977, (00312); Припятский заповедник, 23 кв. Переровского л-ва, в сосняке мшистом, на почве, Л.Н. Парукова, 10.07.1973, (00284); г. Гомель, окрестности завода «Кристалл», Н.В. Тимошенкова, 21.07.2004, (00311); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, опушка молодых посадок сосны (20 лет), А.Г. Цуриков, 21.03.2003, (00313); ***Cladonia arbuscula* (Wallr.) Flot. ssp. *mitis* (Sandst.) Ruoss** – Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк вересковый, на гнилом пне, О.П. Шахрай, 10.06.1975, (00007), Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк вересковый, на почве, О.П. Шахрай, 10.06.1975, (00074); Припятский заповедник, Млынокское л-во, в сосняке мшистом, Т. Черленок, 13.07.1973, (00295); Припятский заповедник, 60 кв. Млынокского л-ва, сосняк мшистый, на почве, О.П. Шахрай, 19.07.1971, (00288); Припятский заповедник, 96 кв. Озерано-Млынокского л-ва, сосняк брусничный, на почве, В.П. Прокопенко, 10.03.1977, (00296); Припятский заповедник, 107 кв. Озерано-Млынокского л-ва, сосняк лишайниковый, на почве, В.П. Прокопенко, 15.03.1977, (00287); Припятский заповедник, 50 кв. Озеранского л-ва, сосновый лес, на почве, О.П. Шахрай, 27.06.1971, (00293); Припятский заповедник, 64 кв. Рычевского л-ва, сосняк лишайниковый, на почве, О.П. Шахрай, 17.07.1972, (00289); Припятский заповедник, 106 кв., сосняк лишайниковый, на почве, В.П. Прокопенко, 09.05.1977, (00285); Гомельская область, Гомельский р-н, Черниговское шоссе, поворот на Студеную Гуту, булавоносцевая пустошь, на почве, А.Г. Цуриков, 10.09.2002, (00286); Припятский заповедник, 60 кв. Млынокского л-ва, сосняк мшистый, Абрамова, 19.07.1971, (00290); Припятский заповедник, Млынокское л-во, поляна в сосновом лесу чабрец + ястребинка, 01.06.1974, (00291); Гомельская обл., Гомельский р-н, Ст. Ченки, сосновый лес, Малахова, 15.07.1970, (00292); Припятский заповедник, Млынокское л-во, на почве, (00294); Припятский заповедник, 106 кв. Млынокского л-ва, сосняк мшистый, на почве, (00297); Припятский заповедник, Млынокское л-во, на почве сосна + чабрец + ястребинка, 01.06.1974, (00298).

2. *Cladonia botrytes* (Hag.) Willd. – Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк вересковый, на почве, О.П. Шахрай, 10.06.1975, (00006); Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк вересковый, на почве, О.П. Шахрай, 10.06.1975, (00007); Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк вересковый, гнилой пень, О.П. Шахрай, 10.06.1975, (00003); Припятский заповедник, 20 кв. Млынокского л-ва, в сосняке лишайниковом, на гнилом пне, О.П. Шахрай, 18.06.1971, (00004); Буда-Кошелевский р-н, д. Рудня-Ольховка, на гнилом бревне, В.А. Собченко, 14.02.2006, (00005); Млынокское л-во, сосняк вересковый, гнилой пень, О.П. Шахрай, 10.06.1975, (00001); Россия, Красноярский край, с. Красный завод, Боготольского р-на, сосняк мшистый, на гнилом пне, Н.В. Тимошенкова, 17.08.2003, (00002); Россия, Карелия, заповедник «Кивач», сосняк, на поваленной сосне, А.Г. Цуриков, 25.09.2008, (00320).

3. *Cladonia cariosa* (Ach.) Spreng. – Россия, Самарская обл., Красносамарское л-во, окр. оз. Моховое, в сосняке на почве, Е.С. Корчиков, 02.07.2004, (00009).

4. *Cladonia carneola* (Fr.) Fr. – Буда-Кошелевский р-н, окр. д. Кленовица, березняк оляковый, на пне, А.Г. Цуриков, 02.07.2005, (00008).

5. *Cladonia cenotea* (Ach.) Schaer. – Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк черничный, на почве, А.М. Радионова, 26.07.1975, (00011); Припятский заповедник, 61 кв. Млынокского л-ва, сосняк черничный, на гнилой древесине, О.П. Шахрай, 20.06.1975, (00018); Припятский заповедник, Озеранское л-во, на почве, О.П. Шахрай, 20.06.1975, (00023); Припятский заповедник, 50 кв. Озеранского л-ва, в сосняке черничном, на почве,

О.П. Шахрай, (00017); Припятский заповедник, 50 кв. Озеранского л-ва, в сосняке мшистом, на гнилом пне, О.П. Шахрай, 16.06.1975, (00019); Припятский заповедник, 59 кв. Озеранского л-ва, сосняк лишайниковый, на почве, Г.И. Швеиц, 18.07.1974, (00016); Припятский заповедник, 46 кв. Переровского л-ва, сосняк черничный, на почве, Л.Н. Парукова, 06.03.1973, (00022); Припятский заповедник, 64 кв. Рычевского л-ва, сосняк черничный, на гнилом пне, Л.Н. Парукова, 18.07.1972, (00021); Припятский заповедник, 23 кв. Снядинского л-ва, березняк осоковый, О.П. Шахрай, (00024); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00010); окрестности д. Чёнки, А.Г. Цуриков, 29.04.2005, (00012); Кормянский р-н, д. Кляпино, сосняк мшистый возле дороги, В.Н. Лебедько, 12.08.2005, (00013); г. Гомель, р-н Волотова, окрестности березовой рощи, Я.Н. Гончарова, И.А. Ковалева, 27.03.2003, (00015); Припятский заповедник, Озеранское л-во, на почве, О.П. Шахрай, (00020); Гомельская обл., Кормянский р-н, окр. д. Струмень, на пне, А.Г. Цуриков, 26.05.2010, (00025); Россия, Самарская обл., Красносамарское л-во, окр. оз. Моховое, в сосняке на гниющей древесине, Е.С. Корчиков, 02.07.2004, (00014).

6. *Cladonia cervicornis* (Ach.) Flot. ssp. *verticillata* (Hoffm.) Ahti – Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк вересковый, на почве, 10.06.1975, (00281); Припятский заповедник, 61 кв. Млынокского л-ва, на почве, Клец, 19.07.1971, (00280); Припятский заповедник, Озеранское л-во, на почве, О.П. Шахрай, 20.06.1975, (00282); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00278); Припятский заповедник, Млынокское лес-во, сосняк лишайниковый, О.П. Шахрай, (00275); Припятский заповедник, 85 кв. Оз-Мл. лес-ва, сосняк черничный, на влажной почве, В.П. Прокопенко, 14.03.1977, (00276); Припятский заповедник, 18 кв. Переровского лес-ва, сосняк лишайниковый, на почве, О.П. Шахрай, 20.07.1974, (00274); Припятский заповедник, Млынокское лес-во, посадки сосны, на почве, 01.06.1974, (00273); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00272); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00277); Припятский заповедник, Озеранское л-во, сосняк черничный, на почве, В.П. Прокопенко, 13.03.1977, (00279); Днепро-Березинское охото-хозяйство, д. Кленовица, Буда-Кошелевского р-на, опушка смешанного леса 5С 5Б, А.Г. Цуриков, 03.07.2005, (00271).

7. *Cladonia chlorophaea* (Flörke ex Sommerf.) Spreng. – Припятский заповедник, Млынокское лес-во, сосняк вересковый, на почве, А.М. Радионова, 21.07.1975, (00027); Припятский заповедник, 15 кв. Озеранского л-ва, дубрава папоротниковая, на дубе, О.П. Шахрай, (00036); Припятский заповедник, 64 кв. Рычевского л-ва, сосняк лишайниковый, на пне, Л.Н. Парукова, 09.07.1971, (00033); Припятский заповедник, 23 кв. Снядинского л-ва, в дубраве разнотравной, на дубе, О.П. Шахрай, 18.06.1974, (00034); Гомельская обл., УНБ «Чёнки», А.Г. Цуриков, 20.06.2004, (00026); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, у карьера, просека бывшей выборки песка, на почве, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00029); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, сосняк, болото, А.Г. Цуриков, 18.09.2005, (00038); Гомельский р-н, Черниговское шоссе, поворот на Студеную Гуту, булавоносцевая пустошь, А.Г. Цуриков, 10.09.2002, (00031); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, у карьера, просека бывшей выборки песка, на почве, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00032); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, у карьера, просека бывшей выборки песка, на почве, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00035); Житковичский р-н, окр. д. Белев, сосняк, на коре трухлявого пня, А.В. Тейкин, 01.02.2006, (00028); кв. 106, 17.05.?, (00037); г. Гомель, ул. Буденного напротив дома 59, на березе, А.Г. Цуриков, 23.03.2007, (00039); Россия, Самарская обл., Красносамарское л-во, окр. оз. Моховое, на почве в сосняке, Е.С. Корчиков, 02.07.2004, (00030).

8. *Cladonia coccifera* (L.) Willd. – Припятский заповедник, 105 кв. Млынокского л-ва, в сосняке лишайниковом, на гнилой древесине, О.П. Шахрай, 10.06.1973, (00040).

9. *Cladonia coniocraea* (Flörke) Spreng. – Припятский заповедник, Озеранское лес-во, на гнилом пне, О.П. Шахрай, 16.06.1973, (00044); Припятский заповедник, 50 кв. Озеранско-

го лес-ва, сосняк мшистый, гнилой пень, О.П. Шахрай, 04.07.1974, (00046); Припятский заповедник, 50 кв. Озеранского л-ва, в сосняке лишайниковом, на почве, О.П. Шахрай, 20.06.1971, (00048); Припятский заповедник, 106 кв. Озерано-Млынокского л-ва, сосняк брусничный, на березе, В.П. Прокопенко, 16.03.1977, (00049); Припятский заповедник, 106 кв. Озерано-Млынокского л-ва, сосняк вересковый, на сосне, В.П. Прокопенко, 23.03.1977, (00042); Припятский заповедник, 23 кв. Снядинского л-ва, березняк злаковый, на березе, (00043); Припятский заповедник, 34 кв. Переровского лес-ва, березняк орляковый, на пне, Л.Н. Парукова, 16.11.1973, (00047); г. Гомель, Н-Белицкий сосновый лес, у основания пня, О.П. Шахрай, 12.09.1970, (00045); г. Гомель, сквер возле корпуса №1 «ГГУ им. Ф. Скорины», на березе, А.Г. Цуриков, 13.08.2007, (00050).

10. *Cladonia cornuta* (L.) Hoffm. – Припятский заповедник, Млынокское лес-во, сосняк вересковый, гнилой пень, О.П. Шахрай, 10.06.1975, (00052); Припятский заповедник, 52 кв. Млынокского л-ва, сосняк лишайниковый, у подножия сосны, О.П. Шахрай, 04.07.1974, (00060); Припятский заповедник, 72 кв. Млынокского лес-ва, сосняк лишайниковый, на почве, О.П. Шахрай, (00054); Припятский заповедник, 23 кв. Переровского л-ва, сосняк мшистый, на почве, Л.Н. Парукова, 26.07.1973, (00061); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, опушка молодых посадок сосны (20 лет), А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00055); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, опушка молодых посадок сосны (20 лет), А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00056); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, опушка молодых посадок сосны (20 лет), А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00057); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, опушка молодых посадок сосны (20 лет), А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00058); Припятский заповедник, Млынокское лес-во, на почве, О.П. Шахрай, (00053); Припятский заповедник, Млынокское лес-во, сосняк лишайниковый, на почве, О.П. Шахрай, (00051); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00059).

11. *Cladonia crispata* (Ach.) Flot. – Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк вересковый, на почве, О.П. Шахрай, 10.06.1975, (00074); Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк лишайниковый, О.П. Шахрай, 03.07.1974, (00069); Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк вересковый, гнилой пень, О.П. Шахрай, 10.06.1975, (00003); Припятский заповедник, 59 кв. Млынокского л-ва, на почве, Г.И. Швец, 16.06.1974, (00071); Припятский заповедник, Озеранское л-во, на почве, О.П. Шахрай, 20.06.1975, (00072); Припятский заповедник, Озеранское л-во, в сосняке лишайниковом, на почве, О.П. Шахрай, 06.07.1975, (00073); Припятский заповедник, 50 кв. Озеранского л-ва, в сосновом лесу, на почве, О.П. Шахрай, 12.06.1971, (00070); Припятский заповедник, 18 кв. Переровского лес-ва, сосняк лишайниковый, на почве, О.П. Шахрай, 17.07.1973, (00062); Припятский заповедник, Млынокское лес-во, сосняк лишайниковый, (00063); Припятский заповедник, Млынокское л-во, на почве, (00064); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, у карьера, просека бывшей выборки песка, на почве, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00065); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, у карьера, просека бывшей выборки песка, на почве, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00066); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, сосняк мшистый, основание пня, А.Г. Цуриков, 07.07.2005, (00067); Припятский заповедник, Млынокское л-во, на почве, О.П. Шахрай, 24.07.1974, (00068).

12. *Cladonia cyanipes* (Sommerf.) Nyl. – Россия, Ханты-Мансийский АО, Белоярский р-н, природный парк «Нумто», 1,5 км. западнее пос. Нумто, сосново-кустарничково-лишайниково-сфагновое болото, В.А. Глазунов, 24.08.2007, (00041).

13. *Cladonia deformis* (L.) Hoffm. – Припятский заповедник, Озеранское л-во, на почве, О.П. Шахрай, 20.06.1975, (00078); Припятский заповедник, Озеранское л-во, на почве, О.П. Шахрай, (00079); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00075); Буда-Кошелевский р-н, д. Рудня-Ольховка, просека соснового леса, А.Г. Цуриков,

07.07.2005, (00076); Буда-Кошелевский р-н, д. Рудня-Ольховка, просека соснового леса, А.Г. Цуриков, 07.07.2005, (00077).

14. *Cladonia digitata* (L.) Hoffm. – Припятский заповедник, Млынокское л-во, на гнилой древесине, О.П. Шахрай, 20.06.1974, (00084); Припятский заповедник, Переровское л-во, у подножия сосны (сосна + ель + майник), 04.06.1974, (00086); Припятский заповедник, Переровское л-во, у подножия сосны (сосна + майник – ветреница – кислица), 30.05.1974, (00087); Припятский заповедник, 54 кв. Рычевского л-ва, в сосняке вересковом, на пне, О.П. Шахрай, 15.07.1973, (00083); Припятский заповедник, 23 кв. Снядинского л-ва, березняк осоковый, (00085); Беловежская Пуца, центральный (главный) вход, А.Г. Цуриков, 23.07.2005, (00080); Беловежская Пуца, центральный (главный) вход, А.Г. Цуриков, 23.07.2005, (00081); Буда-Кошелевский р-н, окр. д. Рудня-Ольховка, сосняк, болото, А.Г. Цуриков, 18.09.2005, (00082).

15. *Cladonia fimbriata* (L.) Fr. – Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк вересковый, на почве, О.П. Шахрай, 10.06.1975, (00100); Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк вересковый, гнилой пень, 10.06.1975, (00003); Припятский заповедник, 50 кв. Озеранского л-ва, в сосново-черничниковом лесу на почве, О.П. Шахрай, 23.06.1971, (00091); Припятский заповедник, Переровское л-во, на гнилом пне (ель-граб + майник-земляника), 30.05.1974, (00090); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, на гнилом пне, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00092); Гомельский р-н, окр. д. Скиток, сосновый лес, А.Г. Цуриков, 24.08.2005, (00095); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, у карьера, просека бывшей выборки песка, на почве, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00088); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Кленовица, суходольный луг, А.Г. Цуриков, 02.07.2005, (00094); Гомельский р-н, окрестности УНБ «Ченки», Ю.М. Бачура, 28.04.2005, (00089); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Кленовица, опушка смешанного леса, на почве, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00096); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, у карьера, просека бывшей выборки песка, на почве, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00093); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, у карьера, просека бывшей выборки песка, на почве, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00097); г. Гомель, окрестности остановки «Солнечная», А.Г. Цуриков, 26.04.2005, (00098); г. Гомель, район остановки «Медгородок», на почве, А.Г. Цуриков, 17.04.2007, (00101); Россия, Самарская обл., Большеглушицкий р-н, 3 км. на с.-в. от с/х Южный, склон холма, типчаковая степь, почва, Е.С. Корчиков, 26.06.2004, (00099); Буда-Кошелевский р-н, окр. д. Рудня-Ольховка, на валежнике, А.Г. Цуриков, 07.07.2005, (00226); Житковичский р-н, окр. д. Белев, сосняк, на трухлявом пне, А.В. Тейкин, 01.02.2006, (00181).

16. *Cladonia furcata* (Huds.) Schrader – Припятский заповедник, 60 кв. Озеранского лес-ва, в сосновом лесу, на почве, О.П. Шахрай, 21.07.1971, (00104); Припятский заповедник, 18 кв. Переровского лес-ва, в сосняке лишайниковом, на почве, О.П. Шахрай, 15.07.1973, (00105); Припятский заповедник, 23 кв. Переровского л-ва, в сосняке орляковом, на почве, Л.Н. Парукова, 26.07.1973, (00102); Припятский заповедник, 35 кв. Переровского л-ва, в ольсе снытевом, Л.Н. Парукова, (00122); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00110); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00112); Припятский заповедник, Переровское лес-во, сосняк лишайниковый, на почве, 20.07.1973, (00103); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, просека в молодых посадках сосны, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00108); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, просека в молодых посадках сосны, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00109); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, просека в молодых посадках сосны, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00111); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, просека в молодых посадках сосны, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00113); поворот на Студеную Гуту, булавоносцевая пустошь, А.Г. Цуриков, 10.09.2002, (00114); поворот на Студеную Гуту, булавоносцевая пустошь, А.Г. Цуриков, 10.09.2002, (00115); поворот на Студеную Гуту, булавоносцевая пустошь, А.Г. Цуриков,

10.09.2002, (00116); поворот на Студеную Гуту, булавоносцевая пустошь, А.Г. Цуриков, 10.09.2002, (00117); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00106); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, опушка молодых посадок сосны (20 лет), А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00107); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, опушка молодых посадок сосны (20 лет), А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00118); Буда-Кошелевский р-н, д. Рудня-Ольховка, просека соснового леса, А.Г. Цуриков, 07.07.2005, (00119); Буда-Кошелевский р-н, д. Рудня-Ольховка, просека соснового леса, А.Г. Цуриков, 07.07.2005, (00120); Припятский заповедник, Млынокское л-во, на почве сосна + чабрец + ястребинка, 01.06.1974, (00121); Припятский заповедник, 18 кв. Переровского лес-ва, в сосняке лишайниковом, на почве, О.П. Шахрай, 17.07.1973, (00123).

17. *Cladonia gracilis* (L.) Willd. ssp *gracilis* – Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк лишайниковый, на почве, О.П. Шахрай, 24.07.1974, (00153); Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк ракушечниковый, на почве, А.М. Радионова, 14.07.1975, (00139); Припятский заповедник, 20 кв. Млынокского л-ва, в сосняке лишайниковом на почве, О.П. Шахрай, (00163); Припятский заповедник, 106 кв. Оз-Мл. л-ва, сосняк лишайниковый, на почве, В.П. Прокопенко, 10.03.1977, (00143); Припятский заповедник, Оз-Мл. л-во, сосняк лишайниковый, на почве, В.П. Прокопенко, 09.03.1977, (00161); Припятский заповедник, 107 кв. Озерано-Млынокского л-ва, сосняк лишайниковый, на почве, В.П. Прокопенко, 15.03.1977, (00287); Припятский заповедник, 59 кв. Озеранского л-ва, сосняк лишайниковый, на почве, Г.И. Швеиц, 09.07.1974, (00156); Припятский заповедник, 59 кв. Озеранского л-ва, сосняк лишайниковый, на почве, О.П. Шахрай, 24.07.1975, (00157); Припятский заповедник, 23 кв. Переровского л-ва, сосняк мшистый, на почве, Л.Н. Парукова, 05.07.1973, (00152); Припятский заповедник, 23 кв. Переровского л-ва, сосняк орляковый, на почве, О.П. Шахрай, 14.07.1973, (00151); Припятский заповедник, 66 кв. Рычевского л-ва, в дубово-разнотравном лесу на почве, 12.07.1973, (00160); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00130); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00137); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00138); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00141); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00135); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00136); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00131); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00140); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00132); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00133); Припятский заповедник, Млынокское лес-во, на почве, О.П. Шахрай, (00142); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, просека в молодых посадках сосны, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00134); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, у карьера, просека бывшей выборки песка, на почве, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00144); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, у карьера, просека бывшей выборки песка, на почве, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00145); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, просека сосно-

вого леса, А.Г. Цуриков, 07.07.2005, (00146); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, сосняк мшистый, основание пня, А.Г. Цуриков, 07.07.2005, (00147); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, сосняк, на почве, А.Г. Цуриков, 07.07.2005, (00148); Калинковичский р-н, окрестности г.п. Озаричи, сосняк, на почве, Ю.М. Бачура, 22.08.2005, (00149); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, опушка соснового леса, Т.А. Карловская, 15.06.2005, (00150); Припятский заповедник, Озеранское л-во, в сосняке лишайниковом на почве, О.П. Шахрай, (00154); Припятский заповедник, Млынокское л-во, на почве, О.П. Шахрай, 24.07.1974, (00155); Припятский заповедник, Озеранское л-во, на почве, О.П. Шахрай, (00158); Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк лишайниковый, 24.07.1974, (00159); Припятский заповедник, 106 кв. Млынокского л-ва, в сосняке лишайниковом, (00162); Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк лишайниковый, 01.06.1974, (00164); Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк лишайниковый, 24.07.1974, (00169); Припятский заповедник, 60 кв. Млынокского л-ва, сосновая ассоциация, Г.И. Абрамова, 1977, (00168); Припятский заповедник, 50 кв. Озеранского л-ва, в сосновом лесу, на почве, О.П. Шахрай, 18.06.1971, (00167); Припятский заповедник, 49 кв. Озеранского л-ва, в сосново-ландышевом лесу, у подножия сосны, О.П. Шахрай, 29.05.1971, (00166); Припятский заповедник, 61 кв. Млынокского л-ва, на березе, Т. Клец, 19.07.1971, (00165).

18. *Cladonia grayi* G. Merr. ex. Sandst. – Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк лишайниковый, на валежнике, 01.06.1974, (00126); Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк вересковый, на почве и на гнилом пне, 10.06.1975 (00100); Припятский заповедник, 72 кв. Млынокского л-ва, в сосняке лишайниковом, на песчаной почве, О.П. Шахрай, 16.06.1972, (00129); Припятский заповедник, 98 кв. Озерано-Млынокского л-ва, сосняк брусничный, на валежнике, В.П. Прокопенко, 15.03.1977, (00128); Буда-Кошелевский р-н, окр. д. Рудня-Ольховка, опушка соснового леса, на песчаной почве, Т.А. Карловская, 15.06.2005, (00124); Припятский заповедник, Млынокское л-во, на почве, (00125); Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк лишайниковый, на почве, 24.07.1974, (00127), Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк вересковый, на гнилом пне, О.П. Шахрай, 10.06.1975, (00007).

19. *Cladonia macilenta* Hoffm. – Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк лишайниковый, на гнилом пне, О.П. Шахрай, 02.07.1975, (00189); Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк вересковый, на гнилом пне, О.П. Шахрай, 10.06.1975, (00007); Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк лишайниковый, на валежнике, В.П. Прокопенко, 13.03.1977, (00175); Припятский заповедник, Озеранское л-во, на почве, О.П. Шахрай, 20.06.1975, (00185); Припятский заповедник, 28 кв. Озеранского л-ва, в грабово-снытевом лесу на гниющем пне, О.П. Шахрай, 04.06.1971, (00174); Припятский заповедник, 60 кв. Озеранского л-ва, сосняк черничный, на почве, Г.И. Швеи, 23.07.1974, (00178); ***Cladonia macilenta* Hoffm. var. *bacillaris* (Genth) Schaer.** – Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк лишайниковый, на почве, Г.И. Швеи, 20.07.1975, (00177); Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк лишайниковый, гнилой пень, О.П. Шахрай, 02.07.1975, (00189); Припятский заповедник, 61 кв. Млынокского л-ва, на почве, Клец, 19.07.1971, (00188); Припятский заповедник, 106 кв. Млынокского л-ва, в сосняке лишайниковом, на пне, (00180); Припятский заповедник, Озеранское л-во, в сосняке лишайниковом на почве, О.П. Шахрай, 06.07.1975, (001776); Буда-Кошелевский р-н, д. Рудня-Ольховка, на березе, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00171); г. Гомель, сосняк в р-не завода «Кристалл», посадки 7–10 лет, субстрат – полуперегнившее дерево без коры, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00172); Припятский заповедник, Млынокское л-во, в сосняке лишайниковом, гнилой пень, О.П. Шахрай, (00173); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, сосняк, Т.А. Карловская, 15.06.2005, (00179); Припятский заповедник, 106 кв. Млынокского л-ва, в сосняке лишайниковом, на гнилом пне, А.В. Тейкин, 01.02.2006, (00181); Гомельский р-н, окрестности УНБ «Ченки», трухлявое поваленное дерево, А.Г. Цуриков, 29.04.2005, (00182); Гомельский р-н, окрестности леса УНБ «Ченки», И.А. Ковалева, 20.07.2003, (00183); Буда-Кошелевский р-н, д. Кленовица, опушка смешанного леса, на почве, А.Г. Цуриков, 03.07.2005, (00170); Буда-

Кошелевский р-н, д. Кленовица, опушка смешанного леса, на почве, А.Г. Цуриков, 03.07.2005, (00184); Припятский заповедник, Млынокское л-во, на почве, (00186); Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк лишайниковый, на почве, 24.07.1974, (00187).

20. *Cladonia ochrochlora* Flörke – Припятский заповедник, Переровское л-во, у подножия сосны, 30.05.1974, (00087); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, опушка молодых посадок сосны (20 лет), А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00191); Буда-Кошелевский р-н, д. Рудня-Ольховка, сосняк, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00190).

21. *Cladonia phyllophora* Hoffm. – Припятский заповедник, Млынокское л-во, на гнилой древесине, Г.И. Шве́ц, (00210); Припятский заповедник, 7 кв. Млынокского лес-ва, сосняк лишайниковый, на почве, О.П. Шахрай, (00194); Припятский заповедник, 74 кв. Млынокского л-ва, в сосняке вересковом, на почве, О.П. Шахрай, 30.06.1971, (00209); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00192); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00195); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00197); Припятский заповедник, Млынокское лес-во, на почве, О.П. Шахрай, (00193); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, просека в молодых посадках сосны, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00196); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, у карьера, просека бывшей выборки песка, на почве, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00198); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, у карьера, просека бывшей выборки песка, на почве, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00199); Буда-Кошелевский р-н, д. Рудня-Ольховка, на обработанной древесине, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00200); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, у карьера, просека бывшей выборки песка, на почве, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00201); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, у карьера, просека бывшей выборки песка, на почве, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00202); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, сосняк, на песчаной почве, Т.А. Карловская, 15.06.2005, (00203); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, сосняк, на песчаной почве, Т.А. Карловская, 15.06.2005, (00204); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, сосняк, на песчаной почве, Т.А. Карловская, 15.06.2005, (00205); Припятский заповедник, Млынокское л-во, на почве, сосна + ястребика + белоус, 01.06.1974, (00207); Припятский заповедник, Млынокское л-во, на почве, сосна + чабрец + ястребинка, 01.06.1974, (00208); Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк лишайниковый, Г.И. Шве́ц, (00210); Буда-Кошелевский р-н, окр. д. Рудня-Ольховка, на песчаной почве, Т.А. Карловская, 15.06.2005, (00212); Припятский заповедник, 23 кв. Переровского л-ва, сосняк лишайниковый, на почве, Л.Н. Парукова, 10.05.1973, (00216); Припятский заповедник, 23 кв. Переровского л-ва, сосняк лишайниковый, на почве, 07.07.1973, (00215); Припятский заповедник, 7 кв. Млынокского л-ва, в сосняке лишайниковом (марьян + ландыш), на почве, (00214); Припятский заповедник, 46 кв. Переровского л-ва, березняк орляковый, на сосне, Л.Н. Парукова, 18.06.1973, (00213); Россия, Воронежская обл., Лискинский р-н, окр. г. Лиски, берег р. Дон, склоны меловых «гор», каменистая степь, Е.С. Корчиков, 25.09.2005, (00206).

22. *Cladonia pyxidata* (L.) Hoffm. – Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк лишайниковый, на почве, 01.06.1974, (00219); Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк лишайниковый, на почве, 01.06.1974, (00220).

23. *Cladonia rangiferina* (L.) Wigg. – Припятский заповедник, Млынокское лес-во, сосняк лишайниковый, на почве, О.П. Шахрай, 06.06.1975, (00314); Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк орляковый, на почве, А.М. Радионова, 16.07.1975, (00303); Припятский заповедник, 106 кв. Озерано-Млынокского л-ва, сосняк лишайниковый, на почве, В.П. Прокопенко, 15.03.1977, (00305); Припятский заповедник, 20 кв. Озеранского л-ва, на почве, Бурлакова, 15.07.1973, (00301); Припятский заповедник, 50 кв. Озеранского л-ва, в сосняке, О.П. Шахрай, 23.06.1971, (00302); Припятский заповедник, 60 кв. Озеранского лес-ва,

в сосняке, на почве, О.П. Шахрай, 25.05.1971, (00315); Припятский заповедник, 23 кв. Переровского лес-ва, сосняк вересковый, на почве, О.П. Шахрай, 26.07.1973, (00316); Припятский заповедник, Рычевское л-во, сосняк лишайниковый, на почве, А.М. Радионова, 08.07.1975, (00304); Припятский заповедник, 46 кв. Рычевского л-ва, сосняк лишайниковый, на почве, Л.Н. Парукова, 20.07.1972, (00306); Припятский заповедник, сосняк лишайниковый, на почве, О.П. Шахрай, 10.06.1975, (00299); Гомельская обл., Гомельский р-н, д. Борец, сосновый бор, на почве, Павлицева, 14.07.1970, (00300); Гомельская обл., Буда-Кошелевский р-н, д. Рудня-Ольховка, просека соснового леса, А.Г. Цуриков, 07.07.2005, (00307); Припятский заповедник, 60 кв. Млынокского л-ва, сосновая ассоциация, Г.И. Абрамова, 1977, (00308), Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003 (00317), Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00318), Гомельский р-н, Ченки, сосновый лес, Сосновская, 16.07.1970, (00319).

24. *Cladonia rei* Schaer. – Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00222); г. Гомель, 17-й мкр-н, на песчаной почве, В.А. Собченко, 29.06.2005, (00233); Буда-Кошелевский р-н, д. Кленовица, суходольный луг, песчаная почва, А.Г. Цуриков, 02.07.2005, (00221); Припятский заповедник, 23 кв. Переровского л-ва, сосняк лишайниковый, на почве, Л.Н. Парукова, 16.06.1973, (00224); Гомельский р-н, окрестности леса УНБ «Ченки», Я.Н. Гончарова, 26.03.2003, (00225); Буда-Кошелевский р-н, окр. д. Рудня-Ольховка, на валежнике, А.Г. Цуриков, 07.07.2005, (00226); Буда-Кошелевский р-н, окр. д. Рудня-Ольховка, на песчаной почве, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00227); г. Гомель, район остановки «Медгородок», на почве, А.Г. Цуриков, 17.04.2007, (00228).

25. *Cladonia scabriuscula* (Del.) Nyl. – Россия, Воронежская обл., Лискинский р-н, окр. г. Лиски, берег р. Дон, склоны меловых «гор», каменистая степь, Е.С. Корчиков, 16.05.2005, (00229).

26. *Cladonia squamosa* Hoffm. – Припятский заповедник, на гнилом дереве, (00236); Припятский заповедник, Млынокское лес-во, на почве, О.П. Шахрай, (00231); Припятский заповедник, Озеранское л-во, на почве, О.П. Шахрай, 20.06.1975, (00238); Припятский заповедник, 52 кв. Озеранского л-ва, сосняк лишайниковый, на почве, Г.И. Швеиц, 17.07.1974, (00235); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00232); Днепро-Березинское охото-хозяйство, д. Кленовица Буда-Кошелевского р-на, опушка смешанного леса, на почве, А.Г. Цуриков, 02.07.2005, (00230); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, просека соснового леса, А.Г. Цуриков, 07.07.2005, (00233); Буда-Кошелевский р-н, окрестности д. Рудня-Ольховка, просека соснового леса, А.Г. Цуриков, 07.07.2005, (00234); Припятский заповедник, Озеранское л-во, на почве, (00237).

27. *Cladonia stellaris* (Delise) Nyl. – Россия, Республика Карелия, заповедник «Кивач», сосняк, примесь ели, на почве, А.Г. Цуриков, 25.09.2008, (00309); Россия, Республика Карелия, заповедник «Кивач», сосняк, примесь ели, на почве, А.Г. Цуриков, 25.09.2008, (00310).

28. *Cladonia subulata* (L.) Wigg. – Припятский заповедник, Млынокское лес-во, сосняк вересковый, на почве, О.П. Шахрай, 10.06.1975, (00242); Припятский заповедник, Млынокское л-во, сосняк вересковый, гнилой пень, 10.06.1975, (00003); Припятский заповедник, Озеранское л-во, березняк черничный, на почве, Г.И. Швеиц, 17.06.1975, (00246); Припятский заповедник, 50 кв. Озеранского л-ва, в сосново-черничниковом лесу, на почве, О.П. Шахрай, 23.06.1971, (00249); Припятский заповедник, Млынокское лес-во, на почве, О.П. Шахрай, (00239); Припятский заповедник, Озеранское лес-во, на почве, О.П. Шахрай, (00243); Припятский заповедник, Озеранское лес-во, О.П. Шахрай, (00244); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00240); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00241); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи

д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, опушка молодых посадок сосны (20 лет), А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00245); Гомельский р-н, УНБ «Ченки», окрестности леса, И.А. Ковалева, 26.03.2003, (00248); Буда-Кошелевский р-н, д. Рудня-Ольховка, просека соснового леса, А.Г. Цуриков, 07.07.2005, (00247).

29. *Cladonia sulphurina* (Michx.) Fr. – Россия, Республика Карелия, заповедник «Кивач», сосняк, на комле сосны, А.Г. Цуриков, 25.09.2008, (00217); Россия, Республика Карелия, заповедник «Кивач», сосняк, на комле сосны, А.Г. Цуриков, 25.09.2008, (00218).

30. *Cladonia turgida* (Ehrh.) Hoffm. – Припятский заповедник, 74 кв. Млынокского л-ва, в сосняке лишайниковом на почве, О.П. Шахрай, 29.06.1974, (00254); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, просека в молодых посадках сосны, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00251); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, просека в молодых посадках сосны, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00252); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, просека в молодых посадках сосны, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00253); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, у карьера, просека бывшей выборки песка, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00250); Кормянский р-н, окр. д. Кляпино, сосняк лишайниковый, на обочине лесной дороги, В.Н. Лебедев, 25.08.2006, (00254).

31. *Cladonia uncialis* (L.) Wigg. – Припятский заповедник, 50 кв. Озеранского лес-ва, сосняк лишайниковый, на почве, О.П. Шахрай, 20.06.1971, (00262); Припятский заповедник, 60 кв. Озеранского лес-ва, в сосняке марьянниковом, на почве, О.П. Шахрай, 28.06.1972, (00256); Припятский заповедник, Млынокское лес-во, на почве, О.П. Шахрай, 10.06.1975, (00260); Припятский заповедник, 60 кв. Озеранского лес-ва, на почве в ассоциации сосна – Иван-да-Марья, О.П. Шахрай, 28.06.1971, (00259); Припятский заповедник, Млынокское лес-во, сосняк лишайниковый, на почве, О.П. Шахрай, (00261); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, подножие всхолмления на опушке сосновых посадок, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00257); Днепро-Березинское охото-хозяйство, вблизи д. Чеботовичи Буда-Кошелевского р-на, подножие всхолмления на опушке сосновых посадок, А.Г. Цуриков, 21.10.2003, (00258); Калининский район, г. п. Озаричи, смешанный лес, Ю.М. Бачура, 16.08.2004, (00263); Калининский район, г. п. Озаричи, смешанный лес, Ю.М. Бачура, 16.08.2004, (00264); Калининский район, г. п. Озаричи, смешанный лес, Ю.М. Бачура, 16.08.2004, (00265); Буда-Кошелевский р-н, д. Рудня-Ольховка, просека соснового леса, А.Г. Цуриков, 07.07.2005, (00266); Буда-Кошелевский р-н, д. Рудня-Ольховка, просека соснового леса, А.Г. Цуриков, 07.07.2005, (00268); Припятский заповедник, Млынокское л-во, на почве, (00269); Россия, Оренбургская обл., Бузулукский р-н, Бузулукский бор, 4 км на ю.-в. от с. Карачево, склон холма, на почве в сосняке, Е.С. Корчиков, 15.08.2006, (00267); Россия, Мурманская обл., Хибины, подножье горы Кукисвумчорр, В.Л. Миронов, 16.07.2009, (00270).

Литература

1. Определитель лишайников СССР: Кладониевые – Акароспоровые. – Л. : Наука, 1978. – Вып. 5. – 304 с.
2. Esslinger, T.L. A cumulative checklist for the lichen-forming, lichenicolous and allied fungi of the continental United States and Canada [Electronic resource] / T.L. Esslinger. – Fargo, North Dakota : North Dakota State University, 2011. – Mode of access : <http://www.ndsu.edu/pubweb/~esslinge/chcklst/chcklst7.htm>. – Date of access : 08.10.2011.

УДК 635.925:632.938.1:631.524.86

Морфофизиологическая реакция *Aesculus hippocastanum* L. на условия урбанизированной среды

Л.В. ШЕВЦОВА, Л.А. БОГИНСКАЯ

Статья посвящена изучению морфофизиологической реакции каштана конского обыкновенного (*Aesculus hippocastanum* L.) на аномально жаркое лето 2010 г. и вспышку численности *Cameraria ochridella* Desch. and Dim. Проведена оценка состояния каштана в придорожных насаждениях г. Гомеля по категории состояния, уровню дефолиации, степени дехромации листьев, степени поврежденности вредителем. Выявлены высоко устойчивые к условиям урбанизированной среды и энтомовредителю особи каштана конского.

Ключевые слова: каштан конский обыкновенный, дефолиация, дехромация, морфофизиологическая реакция, минирующая моль, устойчивость в условиях урбанизированной среды.

The article is devoted to morphophysiological reaction of horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.) to abnormally hot summer of 2010 and to outbreak of *Cameraria ochridella* Desch. and Dim. The assessment of horse chestnut trees state has been carried out in roadside stand of Gomel city with the determination of tree state category, levels of defoliation and leaves dehromation, degree of damage from insects. The species showing high resistance to urban environmental conditions have been revealed.

Keywords: horse chestnut, defoliation, dehromation, morphophysiological reaction, leaf miner moth, resistance to urban environmental conditions.

Введение

Конский каштан обыкновенный *Aesculus hippocastanum* L. (далее – конский каштан) – изящное дерево высотой до 36 м с низко опущенной раскидистой широкоовальной куполообразной кроной. Он широко культивируется в зоне умеренного климата во многих странах, включая даже север Канады, Фарерские острова и Норвегию, распространён в посадках по всей Беларуси, во многих районах Европейской части России, в Украине.

Конский каштан – первоклассное дерево для посадки на улицах, бульварах, аллеях садов и парков, так как сохраняет свою декоративность в течение всего вегетационного периода. Он представляет интерес для озеленителей еще в связи и с тем, что у этой древесной породы, во-первых, мощная корневая система со стержневым главным корнем и сильно развитыми боковыми корнями, благодаря чему это дерево достаточно ветроустойчиво. Во-вторых, в корневых волосках конского каштана есть бактерии, усваивающие азот воздуха, поэтому деревья успешно растут на сравнительно бедных азотом почвах. Кроме того, он долговечен (при благоприятных условиях достигает возраста 200–300 лет), почти не повреждается насекомыми, хорошо переносит пересадку даже во взрослом состоянии, теневынослив [1].

К сожалению, состояние насаждений конского каштана в городах Беларуси вызывает глубокую тревогу как у специалистов, так и у населения. Следует отметить, что конский каштан плохо переносит засоленные почвы. Он чувствителен к суховеям, отчего листья у него часто летом сильно обгорают и преждевременно опадают [2]. Листья конского каштана поедают личинки каштановой минирующей моли (*Cameraria ohridella* Desch. and Dim), впервые отмеченной в Европе в 1985 году [3].

Тот факт, что пока невозможно снизить уровень загрязнения окружающей среды для восстановления благоприятных условий для роста и развития конского каштана, а использование химических мер борьбы с фитопатогенами в городских условиях нежелательно с санитарной точки зрения, требует разработки совершенно новых подходов для решения существующей проблемы болезни и гибели каштанов. По нашему мнению, одним из возможных путей профилактики патологических состояний каштана конского является повышение устойчивости создаваемых насаждений конского каштана к повреждающим факторам среды на селекционной основе.

Объекты и содержание исследований

Целью наших исследований было изучить морфофизиологическую реакцию каштана конского на условия урбанизированной среды и выявить устойчивые в этих условиях особи.

В качестве объекта исследования были выбраны придорожные насаждения каштана конского на улице Б. Хмельницкого, по которой проходит четырехполосная автодорога с интенсивным движением городского и грузового транспорта. Обследовано 114 деревьев, из которых большая часть – 105 деревьев – растет на газоне на расстоянии 1,5 м от дороги, а 9 деревьев – в лунках размером 1 м². Травостой на большей части газонов сплошной, и лишь возле одного дерева доля проплешин составила 70%. Возраст деревьев в насаждении 35–40 лет. За предшествующие обследованию пять лет обрезка деревьев не проводилась. Насаждение характеризуется отсутствием затенения со стороны окружающих объектов. Некоторое затенение возникает в течение дня в зависимости от положения солнца на небосводе и за счет смыкания крон деревьев.

Обследование насаждения проводили в начале августа 2010 года. Лето 2010 года стало самым жарким за весь период метеонаблюдений в Беларуси. В Гомеле отклонение температуры воздуха от нормы составило в июне +3,5°C, в июле и августе – +5,8°C. Выпало осадков: в июне – 36 мм (43% от нормы), в июле – 125 мм (152% от нормы), в августе – 24 мм (41% от нормы). Рекордным было лето и по числу жарких дней, и по продолжительности жары. На метеостанции Гомель 8 августа температура воздуха достигла отметки 38,9°C [4].

Оценка состояния дерева проводилась по следующим показателям: категория состояния, уровень дефолиации, степень дехромации, степень поврежденности листовой пластинки минирующей молью *Cameraria ochridella*. Категория состояния деревьев оценивалась по 6-балльной шкале [5]. Уровень дефолиации оценивали по шкале, разработанной в рамках международной программы ICP Forests [6]: 0 степень – дефолиация менее 10%, 1 степень – 10–25%, 2 степень – 25–60%, 3 степень – 60–100%, 4 степень – 100%. Степень дехромации оценивали по шкале, используемой для липы при фитоиндикации солевого загрязнения почв [7]. Доля в кроне поврежденных минирующей молью листьев оценивалась визуально. Количества ходов, образованных деятельностью моли, рассчитывали как среднее на трех лопастях произвольно выбранных листьев из нижней части кроны.

Результаты исследования и их обсуждение

Согласно литературным данным [2], [3] наиболее распространённым заболеванием каштана конского обыкновенного в условиях европейских городов является неинфекционное отмирание краёв листьев, поражающее деревья в насаждениях, расположенных вдоль автомагистралей. Причина этого явления – дефицит доступной почвенной и атмосферной влаги и засоление почвы вдоль шоссе в результате использования специальных смесей для посыпания дорог против снега и льда. В крупных городах, особенно вдоль автомобильных трасс, ослабление деревьев конского каштана происходит ещё и в результате действия аэрополлютантов [6].

Лето 2010 г. было отмечено вспышкой численности *Cameraria ohridella*. Нами была установлена разная степень поражения этим вредителем листового покрова каштана конского в исследуемых насаждениях.

Поражение 51–100% листьев кроны отмечено у 53% обследованных деревьев, которые были отнесены нами в группу неустойчивых к минирующей моли особей. При этом 18% всех деревьев имело крайне высокую степень поражения кроны ($\geq 90\%$). Повреждения 31–50% листьев кроны) отмечено у 16% деревьев (группа неустойчивых к вредителю особей), 11–30% – также у 16% деревьев (группа среднеустойчивых к вредителю особей). Поражение листьев отсутствовало либо составляло 10% и меньше у 10,5% всех деревьев. Таким образом, из всего массива обследованных деревьев выявлено 12 высокоустойчивых к минирующей моли особей. Кроны неповрежденных и сильно пораженных вредителем деревьев смыкались.

Следует отметить, что деление особей каштана конского на группы по устойчивости к *Cameraria ohridella* весьма условно, так как нами было установлено, что степень поражения кроны коррелировала со степенью дехромации листьев в ней. В большинстве случаев вредитель выбирал менее дехромированные листья, поскольку для личинок они в питательном от-

ношении более ценны. При этом на отдельной листовой пластинке (лист у каштана конского пальчатосложный) независимо от степени поражения лиственного покрова в целом могло быть от 1–3 до 10–15 личиночных ходов (рисунок 1).



Рисунок 1 – Личиночные ходы *Cameraria ohridella* в мезофилле листьев каштана

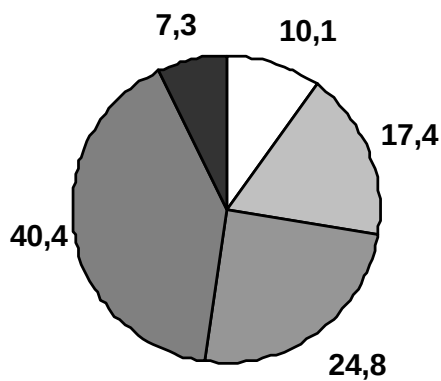
Загрязнители окружающей среды нарушают физиологические процессы и метаболизм растений, что начинает проявляться во внешних, визуально наблюдаемых повреждениях и отклонениях от нормы у ассимиляционных органов и других частей растений. В качестве диагностических признаков оценки жизненного состояния ученые используют сведения о повреждении листьев. Так, например, образование бурых пятен по поверхности и некроз края листа являются характерными признаками поражения древесно-кустарниковых растений солями KCl и NaCl [7]. Изменение окраски листьев (дехромация) связано с уменьшением содержания хлорофилла или его полным отсутствием. После гибели клеток пораженные участки «оседают», высыхают и за счет выделения дубильных веществ окрашиваются в бурый цвет.

Выделяют 4 степени повреждения листьев, соответствующих характеру почвенного загрязнения хлоридами: 1 – по краю листа появляется узкая желтая полоска – в почве отмечается присутствие соли в следовых количествах; 2 – хлороз проявляется в виде широкой краевой полосы – среднее солевое загрязнение почвы; 3 – зона краевого некроза обширна, на границе со здоровой частью листовой пластинки желтая полоска – сильное солевое загрязнение почвы; 4 – большая часть листовой пластинки отмирает – количество соли в почве граничит с пределами выносимости вида. В связи с тем, что определение содержания ионов хлора в почве не проводилось, а изменение окраски листьев в большинстве случаев является неспецифической реакцией на различные стрессовые факторы, полученные нами данные по дехромации позволяют говорить об общей чувствительности конского каштана ко всему комплексу стрессовых факторов.

Результаты исследования показали, что дехромацию 3-й либо 4-й степени в условиях лета 2010 г. имело около 48,1% всех обследованных растений, и лишь у 10,1% из них она отсутствовала. Полученные данные о степени дехромации листьев у каштана конского представлены на рисунке 2.

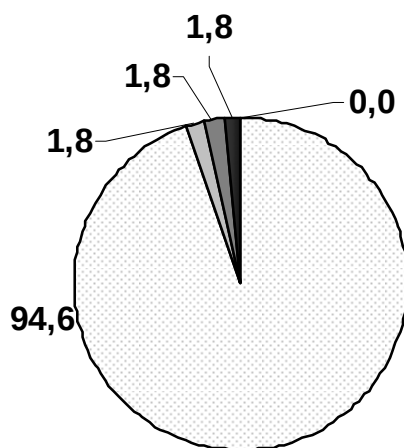
Опадание листьев (дефолиация) в большинстве случаев наблюдается после появления некрозов или хлорозов. Дефолиация приводит к сокращению ассимилирующей площади, а следовательно – к сокращению прироста, а иногда и к пробуждению почек и преждевременному образованию новых побегов. В урбанизированной среде, особенно в насаждениях вдоль городских магистралей с интенсивным движением транспорта, деревья страдают от перегрева корневой системы в летнее время, недостатка влаги и питания в связи с тем, что основная масса всасывающих корней находится под тротуарным покрытием. Однако, несмотря на аномально жаркий август и поражение большей части растений минирующей мо-

лю, у более чем 94,6% обследованных деревьев дефолиация отсутствовала или составляла $\leq 10\%$ (рисунок 3).



□ – дефолиация отсутствует; □ – 1 степень; ■ – 2 степень;
■ – 3 степень; ■ – 4 степень.

Рисунок 2 – Распределение особей каштана конского (%) по степени дехромации листьев



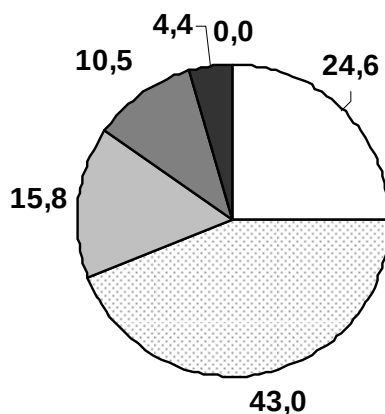
□ – 0 степень; ■ – 1 степень; ■ – 2 степень; ■ – 3 степень; ■ – 4 степень.

Рисунок 3 – Распределение особей каштана конского (%) по степени дефолиации кроны

Полная дефолиация наблюдалась у единичных усыхающих деревьев, расположенных на перекрестках дорог у пешеходных переходов с высокой степенью уплотненности почвы.

Проведенные наблюдения позволили выделить категории состояния конского каштана в придорожных насаждениях на ул. Б. Хмельницкого (рисунок 4).

На основании проведенной оценки нами выделены деревья конского каштана, характеризующиеся следующими показателями: категорией состояния 1 (без признаков ослабления), степень дефолиации 0, степень дехромации 0. Из 114 деревьев указанным требованиям соответствовало 9. Данные деревья будут использованы в качестве маточников для вегетативного размножения с применением метода микроклонального размножения. В дальнейших исследованиях мы предполагаем провести более глубокую оценку устойчивости отобранных форм в культуре тканей *in vitro*.



□ – без признаков ослабления; ▨ – ослабленное; ▩ – сильно ослабленное;
 ▤ – усыхающее; ■ – усохшее в этом году; ▦ – сухой прошлых лет.

Рисунок 4 – Распределение особей каштана конского (%) по категории состояния

Внутривидовая изменчивость реакции растений на стресс – ценный материал для селекции устойчивых генотипов. К сожалению, почти неизученным аспектом устойчивости является иммунитет к заболеваниям как отдельных особей каштана конского, так и насаждений в целом. Результаты исследования доказывают перспективность селекции устойчивых форм этого вида – выявлены высоко устойчивые к *Cameraria ohridella* Desch. and Dim (наиболее распространенный энтомофитовредитель) и условиям урбанизированной среды особи *Aesculus hippocastanum* L. Эта работа должна включать поиск и маркировку высокоустойчивых деревьев, создание банка данных, вегетативное размножение устойчивых особей *in vitro*. Полученные данные подтверждают результаты других исследователей [9], свидетельствующих о том, что каштан конский можно отнести к видам, проявляющим относительную устойчивость к комплексу неблагоприятных факторов, действующих в городских условиях.

Литература

1. Шиманюк, А.П. Дендрология. Изд. 2-е, доп. / А.П. Шиманюк. – М., 1974. – 264 с.
2. Попов, Г.В. Об устойчивости конского каштана обыкновенного (*Aesculus hippocastanum* L.) к вредителям и болезням на Юго-Востоке Украины / Г.В. Попов, И.В. Бондаренко-Борисова // Промышленная ботаника. – 2007. – Вып. 7. – С. 252–258.
3. Milevoj, L. The occurrence of some pests and diseases on horse chestnut, plane tree and Indian bean tree in urban areas of Slovenia / L. Milevoj // Acta agriculture slovenica. – 2004. – Vol. 83, № 2. – P. 297–300.
4. Погода и климат [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://pogoda.ru.net/monitor.php?id=33041&month=8&year=2010>. – Дата доступа : 10.05.2010.
5. Мозолевская, В.Г. Методы лесопатологического обследования очагов стволовых вредителей и болезней леса / В.Г. Мозолевская, О.А. Катаева. – М. : Лесная пром-ть, 1984. – 120 с.
6. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение / под ред. В.А. Алексеева. – Л., 1990. – 200 с.
7. Биоиндикация загрязнения наземных экосистем / под ред. Р. Шуберта. – М., 1988. – 350 с.
8. Гурьева, Е.И. Комплексная оценка древесных пород на городских улицах Воронежа / Е.И. Гурьева // Вестник ВГУ. Сер.: Химия. Биология. Фармация. – 2008. – № 1. – С. 86–92.

УДК 597.5(282.247.321.7)

Определительные таблицы семейств и видов аборигенных рыб и рыбообразных водоемов Беларуси

Г.Г. ГОНЧАРЕНКО, Д.В. ПОТАПОВ

В статье приведены определительные таблицы семейств и видов аборигенной белорусской ихтиофауны, использование которых значительно облегчит задачу определения отловленных в белорусских водоемах представителей ихтиофауны как в полевых, так и в лабораторных условиях. Пользуясь предложенными определительными таблицами, можно определить вид и установить систематическую принадлежность 49 видов рыб и рыбообразных аборигенной белорусской ихтиофауны.

Ключевые слова: рыбы, ихтиофауна Беларуси, определительные таблицы, семейства, виды.

The article presents defining tables of families and species of aboriginal Belarusian fauna, the use of which greatly facilitate the task of defining the species caught in the Belarusian water reservoirs of ichthyofauna, both in the field and in laboratory conditions. Using the proposed defining tables one can determine the type and establish system origin of 49 species of fishes and fish-shaped aboriginal Belarusian fauna.

Keywords: Fishes, fishes fauna of Belarus, defining tables, families, species.

В водоёмах Беларуси в настоящее время обитает более 60 видов рыб и рыбообразных, относящихся к 19 семействам [1]. Из них только 47–49 видов являются аборигенными, то есть составляют исторически сложившиеся ихтиоценозы, специфичные для водоемов Беларуси на протяжении длительного периода [2], [3].

Рыбообразными принято считать представителей класса Круглоротые (Cyclostomata) – примитивных водных позвоночных, не имеющих челюстей и ведущих эктопаразитический образ жизни. В условиях Беларуси встречаются 2 вида круглоротых рыбообразных, относящихся к семейству Миноговые (Petromyzonidae) отряда Миногообразные (Petromyzoniformes).

К собственно рыбам относят первичноводных позвоночных животных, имеющих сформированный челюстной аппарат и полностью приспособленных к обитанию в водной среде. Все нынеживущие рыбы входят в надкласс Pisces, который подразделяется на 2 класса – Хрящевые рыбы (Chondrichthyes) и Костные рыбы (Osteichthyes). Хрящевые рыбы на территории Беларуси не встречаются. Класс Костные рыбы является самым многочисленным и разнообразным среди всех позвоночных животных. На территории Беларуси встречаются представители 6 надотрядов костных рыб, относящихся к подклассу Лучеперые рыбы (Actinopterygii). Несколько обособлен от других надотряд Ганоидные рыбы (Ganoideomorpha), представителем которого в водоемах Беларуси является только один вид из семейства Осетровых (Acipenseridae) – стерлядь. Представители остальных 5 надотрядов объединяются в условную группу надотрядов Костистые рыбы (Teleostei). Таким образом, из всех рыб и рыбообразных белорусской ихтиофауны более 95% являются представителями костистых рыб [1], [2], [4]–[6].

В связи с большим, прежде всего практическим интересом широкого круга экологов, специалистов природоохранных структур и любителей рыбной ловли к проблеме идентификации представителей ихтиофауны создание простого и четкого определителя для видов рыб белорусских водоемов является крайне актуальным.

Поэтому целью данной работы явилось создание определительных таблиц семейств и видов аборигенной белорусской ихтиофауны, пригодных для использования как в полевых, так и в лабораторных условиях.

При составлении определительных таблиц не учитывались виды рыб, появившихся в водоемах Беларуси в результате естественной и искусственной интродукции, так как данные по ним крайне отрывочны и зачастую противоречивы.

Краткая морфологическая характеристика рыб

Тело костных рыб состоит из головы, туловища, хвоста (рисунок 1). Имеются парные плавники (грудные и брюшные) и непарные плавники (спинной, хвостовой и анальный). Хвостовой плавник чаще гомоцеркального типа (имеет одинаковые верхнюю и нижнюю лопасти), однако у осетровых рыб сохраняется эволюционно более древний гетероцеркальный хвост (неравнолопастной, верхняя лопасть крупнее). Жаберную область прикрывают общие костные жаберные крышки, открывающиеся по бокам головы одним жаберным отверстием. Расположение рта различно, но чаще – на конце морды (конечноротость). У костистых рыб тело покрыто костными чешуями, различающимися наружным краем: у циклоидных чешуй наружный край гладкий (например, у карповых рыб), а у ктеноидных чешуй – зазубренный (окуневые рыбы). В отличие от костистых рыб, у ганоидных рыб чешуи ганоидные (представляют собой костные пластинки, покрытые органическим веществом ганоином) [7].

По бокам тела рыб тянутся отверстия органа боковой линии, необходимого для восприятия изменения давления воды.

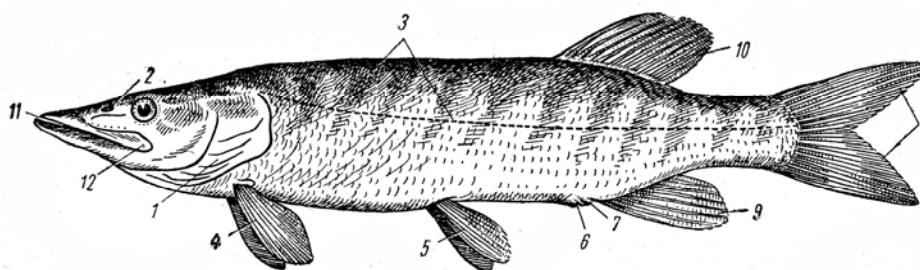


Рисунок 1 – Внешний вид щуки (*Esox lucius* L.) [8]:

- 1 – жаберная крышка; 2 – ноздря; 3 – боковая линия; 4 – грудные плавники;
5 – брюшные плавники; 6 – анальное отверстие; 7 – мочеполовой сосочек;
8 – гомоцеркальный хвостовой плавник; 9 – анальный плавник; 10 – спинной плавник;
11 – ротовое отверстие; 12 – задний край верхнечелюстной кости.

Таблица для определения семейств рыб и рыбообразных белорусской ихтиофауны:

Определительные таблицы составлены по классической (шведской) системе и представляют собой серию последовательных описаний альтернативных признаков, которые необходимо сопоставить друг с другом, и из каждой пары признаков (теза и антитеза) нужно выбрать тот, который наиболее подходит определяемому объекту. Все пункты обозначены в таблицах порядковыми арабскими цифрами, причем в каждом противопоставлении теза обозначается цифрой вне скобок, а антитеза – цифрой в скобках. Определение в таблице следует начинать с тезы 1. Если признак, указанный в тезе, не подходит, надо переходить к другому признаку – тезе, который разыскивается по цифре – антитезе. Если же признак подошел, то переходят к следующей тезе по порядку.

1(2). Челюстей нет. Рот в виде присоски (у взрослых) или треугольной щели (у личинок). На боках тела с каждой стороны по 7 жаберных отверстий. Тело удлиненное, червеобразное, голое. Парных плавников (грудных и брюшных) нет. **Семейство Миноговые (Petromyzonidae)**. В водоемах Беларуси два вида (см. таблицу определения видов).

2(1). Челюсти имеются. На боках тела с каждой стороны по одной жаберной щели, прикрытой жаберной крышкой. Парные плавники имеются (у угревых только грудные).

3(4). Тело покрыто 5 продольными рядами костных жучек (одним спинным, двумя боковыми и двумя брюшными). Рот на нижней стороне головы в виде поперечной щели, впереди рта 4 усика. Рыло удлиненное. Верхняя лопасть хвостового плавника значительно длиннее нижней (гетероцеркальный хвостовой плавник). **Семейство Осетровые (Acipenseridae)** (рисунок 2). В Беларуси единственный редкий вид – **стерлядь (*Acipenser ruthenus*)**. Взрослые особи достигают длины 40–60 см и массы 0,5–2 кг.

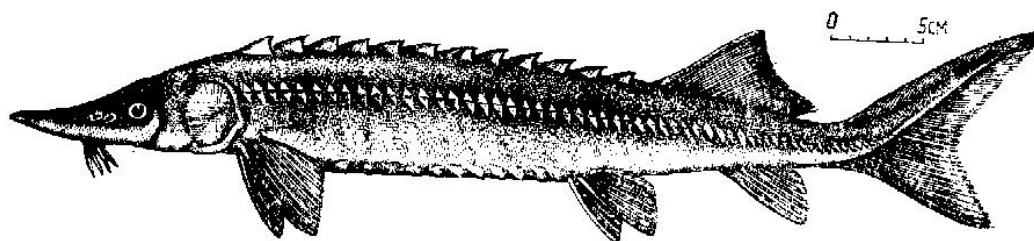


Рисунок 2 – Внешний вид стерляди (*Acipenser ruthenus* L.) [2]
(с характерным гетероцеркальным хвостовым плавником)

4(3). Тело не имеет рядов жучек, покрыто чешуей, шипиками или голое. Хвостовой плавник равнолопастной (гомоцеркальный).

5(12). Позади спинного плавника имеется небольшой жировой плавничок, лишенный лучей.

6(7). Спинной плавник длинный, не менее чем с 17 лучами (считая ветвистые и неветвистые). Верхняя челюсть немного выдается над нижней.....**Семейство Хариусовые (Thymallidae)**. В водоемах Беларуси встречается редкий вид *хариус* (*Thymallus thymallus*). Достигает до 30 см в длину и 250–300 г массы.

7(6). Спинной плавник короткий, не более чем с 16 лучами.

8(9). Боковая линия не полная, далеко не доходит до хвостового плавника. Спинной плавник начинается позади основания брюшных или над ними. Чешуя довольно крупная, легко опадающая. Рот верхний, нижняя челюсть длиннее верхней и выдается впереди неё.....**Семейство Корюшковые (Osmeridae)**.

В Беларуси один вид – *корюшка озерная* (*Osmerus eperlanus*). Размеры взрослых особей не превышают 9–10 см (редко до 15 см).

9(8). Боковая линия полная, доходит до хвостового плавника. Спинной плавник начинается впереди основания брюшных плавников. Тело покрыто плотной, сравнительно мелкой чешуей.

10(11). Окраска на спине и боках выраженная пятнистая. Чешуя мелкая, в боковой линии более 110 чешуек. Рот большой, косой, конечный, усажен многочисленными мелкими зубами. Сочленение нижней челюсти с черепом расположено за задним краем глаза.....**Семейство Лососевые (Salmonidae)**

(рисунок 3). В водоемах Беларуси два вида (таблица определения видов).

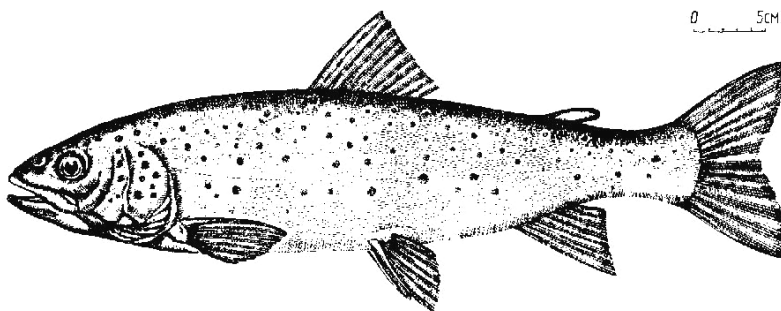


Рисунок 3 – Внешний вид ручьевой форели (*Salmo trutta* Walbaum) [2]
(с характерным жировым плавником)

11(10). Окраска серебристая, без пятен. Чешуя несколько крупнее, в боковой линии менее 100 чешуек. Рот небольшой, обычно верхний, зубы на челюстях отсутствуют, а если есть, то мелкие на языке и межчелюстных костях.....**Семейство Сиговые (Coregonidae)**.

В водоемах Беларуси встречается только один аборигенный вид этого семейства – *ряпушка* (*Coregonus albula*). Самая мелкая из сиговых рыба, в уловах обычны особи длиной 10–15 см и массой 50–70 г. Максимальные размеры – до 25 см, масса – до 300 г.

12(5). Жирового плавника нет.

13(14). Впереди спинного плавника от 2 до 12 свободно сидящих колючек. Брюшные плавники также в виде колючек. Маленькие рыбки.....**Семейство Колюшковые (Gasterosteidae)**. На территории Беларуси два вида (таблица определения видов).

14(13). Впереди спинного плавника свободно сидящих колючек нет. Брюшные плавники мягкие (не в виде колючек) или отсутствуют (угревые).

15(24). На спинной стороне тела единственный спинной плавник.

16(17). Из парных плавников имеются только грудные, брюшных нет. Тело сильно удлинненное, змеевидное, покрыто мелкой, едва заметной чешуей. Длинные спинной и анальный плавники соприкасаются с зачаточным хвостовым.....**Семейство Угревые (Anguillidae)**. Единственный вид в водоемах Беларуси – *угорь речной (Anguilla anguilla)*. Обычными в уловах являются особи размерами до 100–120 см при массе тела до 2 кг (самки). Размеры самцов обычно не превышают 50 см при массе тела до 200–250 г.

17(16). Имеются грудные и брюшные плавники. Спинной плавник отделен от хвостового. Тело иной формы.

18(21). Усиков не менее трех пар.

19(20). Усики короткие, в количестве 3–5 пар, расположены около рта. Анальный плавник небольшой, не более чем с 10 лучами. Тело покрыто мелкой чешуей, иногда скрытой в коже, или голое. Размеры рыб небольшие.....**Семейство Вьюновые (Cobitidae)**.

В водоемах Беларуси три вида (таблица определения видов).

20(19). На верхней челюсти 2 длинных, на нижней 4 более коротких усика. Анальный плавник длинный, с 70–90 лучами. Тело голое.....**Семейство Сомовые (Siluridae)**.

В водоемах Беларуси распространен один вид из этого семейства – *сом (Silurus glanis)*. В уловах обычен сом длиной до 1 м и массой до 6–8 кг. Максимальная длина тела может достигать 5 м, масса – до 200 кг.

21(18). Усиков не более двух пар или совсем нет.

22(23). Спинной плавник сильно отодвинут назад и находится над анальным. Челюсти сильно удлинненные, вооружены многочисленными зубами, нижняя челюсть заметно выдается вперед. Жаберные перепонки не сращены между собой и с межжаберным промежутком.....**Семейство щуковые (Esocidae)**.

В условиях Беларуси встречается один вид – *щука обыкновенная (Esox lucius)*. Обычные размеры в уловах – 50–70 см, масса – до 2 кг. Отдельные экземпляры могут достигать 1,5 м в длину и 35 кг массы.

23(22). Спинной плавник, как правило, начинается посередине тела или немного отодвинут кзади. Сильного удлинения челюстей нет, зубов на челюстях никогда не бывает. Жаберные перепонки приращены к межжаберному промежутку.....**Семейство Карповые (Cyprinidae)** (рисунок 4). В Беларуси более двадцати аборигенных видов (таблица определения видов).

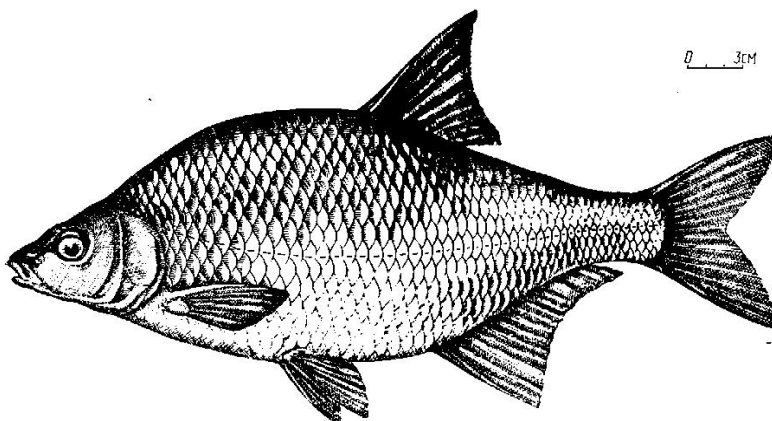


Рисунок 4 – Внешний вид леща (*Abramis brama* L.) [2]

24(15). Спинных плавников два, разделенных или соприкасающихся между собой.

25(26). Первый спинной плавник состоит из неветвистых колючих лучей, соединенных перепонкой. Колючие лучи имеются также во втором спинном, анальном и в брюшных плавниках. Тело покрыто плотной ктеноидной чешуей.....**Семейство окуневые (Percidae)** (рисунок 5). В водоемах Беларуси четыре вида (таблица определения видов).

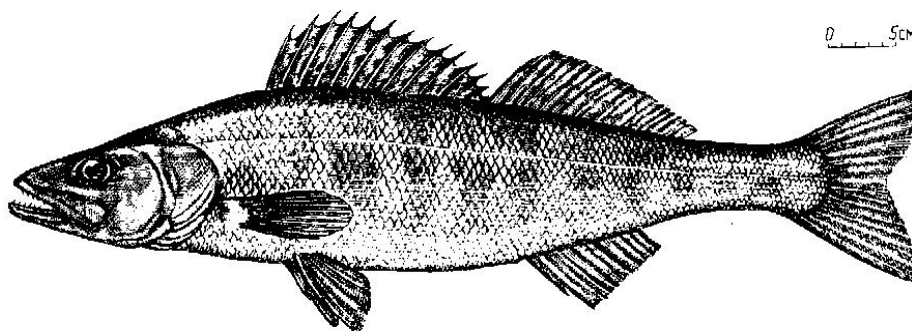


Рисунок 5 – Внешний вид судака (*Sander lucioperca* Oken) [2]

26(25). Колючих лучей нет, все лучи в плавниках мягкие.

27(28). Брюшные плавники на горле, впереди основания грудных. На подбородке один непарный усик.....**Семейство тресковые (Gadidae)**. На территории Беларуси известен единственный вид – **налим (*Lota lota*)**. Размеры взрослых особей обычно 60–70 см, масса – 1,5–2 кг.

28(27). Брюшные плавники расположены между грудными. На подбородке непарного усика нет.

29(30). Брюшные плавники слиты вместе, образуют диск в виде присоски. Тело покрыто мелкой чешуей.....**Семейство бычковые (Gobiidae)**. В водоемах Беларуси встречается один вид этого семейства – **бычок-песчаник (*Neogobius fluviatilis*)**. Небольшая рыбка, достигающая длины 10–12 см.

30(29). Брюшные плавники разделены небольшим промежутком, не слиты в диск. Тело голое, без чешуи.....**Семейство керчаковые, или рогатковые (Cottidae)**. На территории Беларуси известен один вид этого семейства – **подкаменищик (*Cottus gobio*)**. Достигает длины 8–10, изредка 12 см.

Таблица для определения видов в семействах аборигенных рыб и рыбообразных белорусской ихтиофауны:

Семейство Миноговые (*Petromyzonidae*)

1(2). По периферии ротового диска многочисленные щетинковидные зубы, расположенные обычно в несколько концентрических рядов. На нижней губной пластинке 5–9 острых зубов. Боковых губных зубов с каждой стороны по 3–4, средние из них обычно двураздельные, крайние одновершинные или двураздельные.....**минога украинская (*Lampetra mariae*)**. Длина тела достигает 18 см при массе 12 г.

2(1). Немногочисленные щетинковидные зубы расположены только на верхней стороне ротового диска. На нижней губной пластинке зубы в виде тупого валика. Боковых губных зубов по три, из них средние – трехраздельные, крайние – двураздельные.....**минога ручьевая (*Lampetra planeri*)**. Длина взрослых особей – до 19 см, масса тела – до 17 г.

Семейство Лососевые (*Salmonidae*)

1(2). На теле черные пятнышки чередуются с красными, имеющими светлые ободки или без них. В анальном плавнике 7–9 ветвистых лучей.....**форель ручьевая (*Salmo trutta*)**. Размеры варьируют в пределах 25–55 см длины и 0,2–1,5 кг массы.

2(1). У взрослых вдоль боков тянется широкая радужная полоса, особенно у самцов в период нереста. Никогда не имеют красных пятен на теле. В анальном плавнике 10 ветвистых лу-

чей.....**форель радужная** (*Parasalmo mykiss*).
Обычные размеры – 50–80 см при массе 0,8–2 кг.

Семейство Колюшковые (Gasterosteidae)

1(2). Перед спинным плавником 7–12 свободных колючек.....**колюшка девятииглая** (*Pungitius pungitius*). Взрослые особи чаще достигают 5–6 см в длину и массы несколько грамм.

2(1). Перед спинным плавником 2–3 свободных колючки.....**колюшка трехиглая** (*Gasterosteus aculeatus*). Маленькая рыбка, длина тела – до 5 см.

Семейство Вьюновые (Cobitidae)

1(4). Вокруг рта три пары усиков.

2(3). Тело цилиндрическое, под глазом нет складчатого шипа.....**голец** (*Noemacheilus barbatulus*). Обычные размеры – 10–12 см, достигает длины 18 см и массы 25 г.

3(2). Тело лентовидное, под глазом имеется складчатый шип.....**щиповка** (*Cobitis taenia*). Маленькая речная рыбка, крупнейшие экземпляры щиповки редко бывают длиной больше 10 см.

4(1). Вокруг рта пять пар усиков.....**вьюн** (*Misgurnus fossilis*).
Обычная длина – до 18–25 см.

Семейство Карповые (Cyprinidae)

1(8). Спинной плавник длиннее анального более чем в два раза, в нем не менее чем 14 ветвистых лучей.

2(5). Имеются две пары усиков. Глоточные зубы трехрядные.

3(4). Жаберных тычинок на первой жаберной дуге 23–26.....**капн** (*Cyprinus carpio*).
Обычные размеры взрослых особей 40–50 см. Отдельные экземпляры могут достигать 1 м длины и 20 кг массы.

4(3). Жаберных тычинок на первой жаберной дуге 17–25.....**сазан** (*Cyprinus carpio*).
Размеры взрослых особей 40–50 см. Максимальные размеры достигают 1 м длины и 32 кг массы.

5(2). Усиков нет, глоточные зубы однорядные.

6(7). Окраска боков тела желто-золотистая. В боковой линии 32–35 чешуй.....**карась обыкновенный** (*Carasius carasius*). В уловах обычны особи 30–40 см длины и 250–300 г массы. Отдельные особи в озерах могут достигать 50 см длины и массы до 4 кг.

7(6). Окраска боков тела светло-серебристая. В боковой линии 28–33 чешуйки.....**карась серебряный** (*Carasius auratus*).
Обычные размеры взрослых особей в уловах 20–25 см. Отдельные экземпляры достигают 30–40 см и массы 200–250 г.

8(1). Спинной плавник равен по длине или короче анального, в нем менее 14 ветвистых лучей.

9(14). Усики есть.

10(13). Усиков одна пара.

11(12). Тело толстое, довольно высокое. Рот конечный. Чешуя мелкая, погружена в кожу, насчитывается более 80 чешуй в боковой линии.....**лινь** (*Tinca tinca*).
В уловах обычны экземпляры до 30 см длиной и до 1 кг массы. Отдельные особи достигают 70 см длины и 7 кг массы.

12(11). Тело веретенообразное. Рот нижний. Чешуя относительно крупная, не более 50 в боковой линии. Глоточные зубы двухрядные.....**некарь** (*Gobio gobio*).
Обычные размеры до 12–15 см длины и 50 г массы. Очень редко могут достигать 20–22 см длины и 300 г массы.

13(10). Усиков две пары. От других карповых отличается характерным хоботообразным рылом с горбинкой. Глоточные зубы трехрядные.....**усач** (*Barbus barbus*).
Обычные размеры в уловах 50–60 см длины и до 2–3 кг массы.

14(9). Усиков нет.

- 15(22). Боковая линия не полная, далеко не доходит до хвостового стебля (у гольянов может доходить до хвостового стебля, но прерывистой).
- 16(19). Чешуя очень мелкая, в значительной части чешуйки не налегают друг на друга. В анальном плавнике не более 8 ветвистых лучей.
- 17(18). На боках тела мелкие темные пятнышки. Тело сжато с боков, не веретенообразное. Боковая линия хорошо заметна.....**гольян озерный (*Phoxinus phoxinus*)**.
Обычная длина тела около 6 см.
- 18(17). Окраска пестрая, на боках тела большие неопределенных очертаний темные пятна, иногда в виде поперечных полос. Мелких, резко очерченных пятнышек не бывает. Тело веретенообразное, относительно толстое.....**гольян обыкновенный (*Phoxinus phoxinus*)**.
Размеры обычно не превышают 8–9 см длины, могут достигать длины 10 см и массы 10 г.
- 19(16). Чешуя средней величины или крупная, чешуи налегают друг на друга. В анальном плавнике более 8 ветвистых лучей.
- 20(21). Рот верхний, нижняя челюсть с бугорком, входящим в выемку верхней челюсти. Тело умеренно удлиненное, глаза серебристые. Спинной плавник усеченный, анальный выемчатый, относительно короткие, их длина менее 1/5 длины тела.....**верховка (*Leucaspis deliniatus*)**. Обычная длина 4–5 см, единичные особи достигают размеров до 8 см.
- 21(20). Рот полунижний, в нижней челюсти бугорка нет. Тело высокое, глаза желтые с оранжевым пятном наверху. Спинной и анальный плавники умеренных размеров, их длина около 1/3 длины тела.....**горчак (*Rhodeus sericeus*)**.
Длина взрослых особей обычно 5–8 см, масса – всего несколько граммов.
- 22(15). Боковая линия полная, доходит до основания хвостового плавника, не прерывистая.
- 23(24). Боковая линия идет зигзагообразно, позади основания грудных плавников делает крутой изгиб книзу, идет вдоль брюха, а затем снова поднимается до середины тела. Спинной плавник отставлен кзади. Грудные плавники сильно удлинены. На брюхе, начиная от горла, идет кожистый киль, не покрытый чешуей.....**чехонь (*Pelecus cultratus*)**.
Длина тела – 30–40 см, масса – в среднем 150–400 г.
- 24(23). Боковая линия не зигзагообразная, располагается по одному продольному ряду чешуй. Спинной плавник, как правило, посередине тела, грудные плавники умеренной длины. Киль, если он есть, начинается за брюшными плавниками.
- 25(26). Рот на нижней стороне тела, в виде поперечной щели. Нижняя челюсть слегка заострена и обложена хрящом. Губы тонкие.....**нодус (*Chondrostoma nasus*)**.
В уловах обычны особи массой 500–600 г, может достигать 50 см длины и 2 кг массы.
- 26(25). Рот на конце рыла, не в виде поперечной щели.
- 27(40). Анальный плавник длинный, в нем более 15 ветвистых лучей. На брюхе от брюшных плавников до анального отверстия тянется киль, не покрытый чешуей.
- 28(29). За спинным плавником имеется киль, покрытый чешуей. Глоточные зубы однорядные. В анальном плавнике 17–21 ветвистый луч. Тело умеренно высокое.....**сырть (*Vimba vimba*)**. В уловах преобладают особи длиной до 30 см и массой до 400–500 г.
- 29(28). За спинным плавником киля нет.
- 30(35). Глоточные зубы однорядные. В анальном плавнике 21–43 ветвистых луча.
- 31(32). В анальном плавнике 21–30 ветвистых лучей. В боковой линии 49–58 чешуй. Тело высокое, сжато с боков.....**лещ (*Abramis brama*)**.
Обычные размеры леща в уловах – 30–45 см длины и 500–1500 г массы.
- 32(31). Анальный плавник длиннее, в нем 35–43 ветвистых луча.
- 33(34). Радужина глаз серебристая (отсюда название рыбы). В боковой линии 47–54 чешуи. Тело более вытянутое.....**белоглазка (*Abramis sapra*)**.
В уловах обычны особи длиной до 25 см с массой 300–400 г.
- 34(33). Радужина глаз обыкновенная. Окраска спины темно-синяя (отсюда видовое название). В боковой линии 65–73 чешуи.....**синец (*Abramis ballerus*)**.
Отдельные особи достигают 25–35 см длины и 500 г массы.
- 35(30). Глоточные зубы двухрядные. В анальном плавнике менее 20 лучей.

- 36(37). На спине, за затылком, у взрослых имеется бороздка, не покрытая чешуей. Чешуя плотная. Грудные и брюшные плавники у основания желтоватые или красноватые. Тело довольно высокое, сильно сжатое с боков.....**зустера (Blicca bjoerkna)**. В уловах обычны особи длиной до 15–20 см и массой до 100–200 г.
- 37(36). На спине бороздки нет. Чешуя тонкая, легко опадающая. Тело умеренно удлинненное. Размеры рыбы небольшие.
- 38(39). Жаберные тычинки короткие, редкие. Глоточные зубы не зазубренные, на вершине вытянуты в заметный крючок. Вдоль боковой линии тянется узкая двойная полоса из черных точек.....**быстрянка (Alburnoides bipunctatus)**. Длина не превышает 12–13 см, масса – около 15–20 г.
- 39(38). Жаберные тычинки длинные, густо сидящие. Глоточные зубы зазубренные. Вдоль боковой линии темной полосы нет.....**укля (Alburnus alburnus)**. Обычные размеры – около 10 см, лишь отдельные особи достигают 15–20 см длины и 60 г массы.
- 40(27). Анальный плавник короткий, в нем менее 15 ветвистых лучей. На брюхе, за брюшными плавниками, киля нет.
- 41(42). Рот конечный, большой. Нижняя челюсть с бугорком, входящим в выемку верхней челюсти. Крупная рыба.....**жерех (Aspius aspius)**. В уловах преобладают особи размерами 30–40 см длиной и массой 500–700 г. Отдельные особи могут достигать длины 60–80 см и массы 4–6 кг.
- 42(41). Рот небольшой. Бугорка на нижней челюсти и выемки на верхней нет.
- 43(44). Спинной плавник начинается несколько позади вертикали заднего края основания брюшных плавников. Чешуя крупная, около 40 чешуй в боковой линии. Рот конечный, обращен вверх. Плавники имеют красноватую окраску.....**красноперка (Scardinius erythrophthalmus)**. Средняя длина – 15–20 см, масса – 100–200 г.
- 44(43). Спинной плавник начинается над брюшными.
- 45(46). Глоточные зубы однорядные, небольшие, гладкие. За брюшными плавниками расположен слабо выемчатый киль, покрытый чешуей. Грудные, брюшные и анальный плавники от оранжевого до красного цвета. Радужина глаз желтая, с красным пятном наверху.....**плотва (Rutilus rutilus)**. В уловах обычно преобладают особи длиной 15–18 см, массой 100–150 г.
- 46(45). Глоточные зубы двурядные, на вершине с крючком. Чешуя сравнительно крупная.
- 47(48). Анальный плавник усеченный. В боковой линии 53–62 чешуи. У взрослых спина и бока (до боковой линии) темные. Брюшные и анальный плавники красного оттенка.....**язь (Leuciscus idus)**. Обычными в уловах являются рыбы массой 1–1,5 кг при длине 40–50 см. Отдельные экземпляры могут достигать 70 см длины и 6–8 кг массы.
- 48(47). Анальный плавник выемчатый или закругленный. В боковой линии менее 55 чешуй.
- 49(50). Анальный плавник на вершине слегка выемчатый. В боковой линии 46–54 чешуи. Рот маленький, нижний. Хвостовой плавник длинный, сильно выемчатый.....**елец (Leuciscus leuciscus)**. В среднем 15–20 см и 150–250 г. Максимальные размеры – до 30 см длины и 500 г массы.
- 50(49). Анальный плавник закругленный. Рот относительно большой, широкий, конечный. В боковой линии 43–47 чешуи. Лоб широкий, уплощенный. Хвостовой плавник короткий, слабо выемчатый.....**голавль (Leuciscus cephalus)**. Обычными в уловах являются особи длиной до 40 см и массой до 1 кг. Отдельные экземпляры могут достигать длины 80 см и массы 6–8 кг.

Семейство Окуневые (Percidae)

- 1(6). Все зубы одинаковой величины.
- 2(5). Спинные плавники не разделены промежутком.
- 3(4). Рыло короткое, едва длиннее диаметра глаза. В спинном плавнике 11–16 колючек. В боковой линии 36–40 чешуй.....**ерш обыкновенный (Gymnocephalus cernua)**. Длина взрослой рыбы составляет 10–15 см при массе около 20–25 г.

4(3). Рыло удлинненное, в 1,5–2 раза превышает диаметр глаза. В спинном плавнике 17–19 колючек. В боковой линии 50–62 чешуи. На боках тела черные круглые пятна.....*ерш-носарь (Gumnocephalus acerina)*. Обычная длина в уловах – около 13–15 см при массе тела 50 г.

5(2). Спинные плавники разделены промежутком. В последних 4-х лучах первого спинного плавника есть черное круглое пятно.....*окунь речной (Perca fluviatilis)*. Достигают 15–20 см длины при массе 100–150 г.

6(1). На челюстях хорошо выражены клыки. На последних задних лучах первого спинного плавника отсутствует черное пятно.....*судак (Sander lucioperca)*. Рыба крупных размеров. В уловах обычны особи длиной до 50–70 см и массой до 2–4 кг.

Заключение

Таким образом, в работе на основе классической шведской системы, используя анато-морфологические признаки, составлены определительные таблицы для 49 аборигенных видов рыб и рыбообразных, обитающих в естественных водоемах Беларуси. Данный определитель предназначен для использования в ходе исследований, проводимых как в полевых, так и в лабораторных условиях.

Работа проводилась в рамках тем ГБЦМ 11-32 «Разработка молекулярно-генетических технологий для диагностики возбудителей описторхоза в окончательных и промежуточных хозяевах» и ГБ 11-27 «Оценка состояния природных и урбанизированных экосистем юго-востока Беларуси».

Литература

1. Рыбы : популярный энциклопедический справочник / Белорус. Сов. Энцикл., Ин-т зоологии АН БССР / под ред. П.И. Жукова. – Минск : БелСЭ, 1989. – 311 с.
2. Жуков, П.И. Справочник по экологии пресноводных рыб / П.И. Жуков. – Минск : Наука и техника, 1988. – 310 с.
3. Потапов, Д.В. Видовая структура сообществ рыб реки Сож и ее притоков / Д.В. Потапов, Г.Г. Гончаренко // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2011. – № 4(67). – С. 200–206.
4. Шевцова, Т.И. Экология промысловых рыб Беларуси / Т.И. Шевцова, Т.Н. Нехаева, А.Н. Лях. – Минск : Наука и техника, 1986. – 143 с.
5. Киселев, Я.Е. Рыбы наших вод / Я.Е. Киселев. – М. : Мысль, 1984. – 288 с.
6. Сабанеев, Л.П. Рыбы России. Жизнь и ловля пресноводных рыб / Л.П. Сабанеев. – М. : АСТ «Астрель», 2001. – Т. 1. – 480 с. ; Т. 2. – 544 с.
7. Наумов, Н.П. Зоология позвоночных. Ч. 1 : Низшие хордовые, бесчелюстные, рыбы, земноводные / Н.П. Наумов, Н.Н. Карташев. – М. : Высшая школа, 1979. – 333 с.
8. Карташев, Н.Н. Практикум по зоологии позвоночных / Н.Н. Карташев, В.Е. Соколов, И.А. Шилов. – М. : Высшая школа, 1969. – 372 с.

Оценка качества воды и экологическое состояние некоторых малых рек Беларуси

О.В. КОВАЛЕВА, И.Ф. РАССАШКО

Представлены результаты изучения гидрохимических и гидробиологических особенностей малых рек Республики Беларусь, не охваченных регулярными стационарными исследованиями.

В целом, результаты проведенных исследований позволяют заключить, что качество воды ряда изученных малых рек Беларуси по некоторым гидрохимическим показателям не удовлетворяет нормативам. Под влиянием органических загрязнений значительно возрастает видовое разнообразие коловраток, нарушается структура зоопланктонных сообществ. Особенно ярко это проявляется в росте плотности и биомассы, увеличении индекса Пантле и Букка, смене доминантного комплекса видов и сокращении количества доминирующих видов, уменьшении индекса видового разнообразия, снижении соотношений N_{crust}/N_{rot} , B_{crust}/B_{rot} , N_{clad}/N_{cop} , росте доли коловраток в величинах общей плотности и биомассы. При увеличении антропогенного воздействия в реках отмечается смена лидирующих таксономических групп в направлении: Cladocera → Copepoda → Rotifera. Наиболее устойчивые зоопланктонные сообщества сформировались в реках Липа и Грабовка, где видовой состав и величины плотности в течение нескольких лет наиболее стабильны.

Ключевые слова: малые реки, трофический статус, гидрохимические и гидробиологические характеристики, зоопланктон, биоиндикация, Cladocera, Copepoda, Rotifera.

The article presents the results of study of hydrochemical and hydrobiological characteristics of the small rivers of the Republic of Belarus that are not covered by regular stationary studies.

In general the results of the research show that the quality of water of some small Belarusian rivers studied doesn't satisfy the standards on some hydrochemical indicators. Under the influence of organic pollution a specific variety of Rotifera increases, the structure of zooplanktonic communities is broken. Especially brightly it is shown in density and biomass growth, increase in the index of Pantle and Buck, change of a prepotent complex of types and reduction of quantity of dominating types, reduction of the index of a specific variety, decrease in ratios of N_{crust}/N_{rot} , B_{crust}/B_{rot} , N_{clad}/N_{cop} , share growth of Rotifera in general density and biomass. With the increase of anthropogenous influence the rivers are classified by the change of leading taxonomic groups in the direction as follows: Cladocera → Copepoda → Rotifera. The steadiest zooplanktonic communities were created in the rivers of Linden and Grabovka where specific structure and density had been the most stable for many years.

Keywords: small rivers, trophic status, hydrochemical and hydrobiological characteristics, zooplankton, bioindication, Cladocera, Copepoda, Rotifera.

Исследование экологии малых рек имеет большое теоретическое и практическое значение ввиду их распространенности, наиболее ярко выраженной реакции на антропогенное воздействие, роли в функционировании средних и крупных рек и др. Однако, по сравнению с большими реками, озерами и водохранилищами, малые реки остаются наименее исследованными. Усиленная антропогенная нагрузка на малые водотоки приводит к их укорачиванию, обмелению и даже исчезновению, что, в свою очередь, сказывается на крупных реках. Неудовлетворительное состояние малых рек, особенно качество воды в них, вызывает растущую тревогу. Как правило, регулярные стационарные гидрохимические наблюдения ведутся на крупных реках Республики Беларусь. Что касается малых рек, то такие исследования на них, за редким исключением, не проводятся. Изучение гидробиологических характеристик на малых водотоках носит и вовсе эпизодический характер. Вместе с тем, проведение биоиндикации водных экосистем рекомендовано Европейской Рамочной Водной Директивой. Оценка экологического состояния водоемов по структурным и функциональным характеристикам сообществ гидробионтов является одним из приоритетных направлений современной гидробиологии. В ряде исследований показано, что зоопланктонное сообщество, наряду с фитопланктоном и бентосом, может успешно использоваться для диагностики экологического состояния водоемов [1].

Осуществление в Беларуси экологической политики на государственном уровне предполагает наличие объективной систематизированной информации о состоянии окружающей среды, природных ресурсов, их охране. Проведение оценки состояния окружающей среды, выявление тенденций ее изменения осуществляется с применением международных экологических показателей, включая таковые, применяемые в странах Восточной Европы. Данные экологические показатели разработаны Европейской экономической комиссией ООН и отражены в документе «Рекомендации правительства стран Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии по применению экологических показателей и подготовке на их основе оценочных докладов по охране окружающей среды». В соответствии с этими документами подготовлена система основных экологических показателей Республики Беларусь, включающая международные и национальные экологические показатели. Основным их перечень включает биоразнообразие, плотность, структуру сообществ, индекс сапробности и др. В настоящих исследованиях мы руководствовались указанными положениями.

Материал и методика исследований

Исследования проводились в разные сезоны 2006–2011 гг. на семи реках Гомельской и Могилевской областей. Уза – река в Буда-Кошелевском и Гомельском районах Гомельской области, правый приток р. Сож. Длина – 76 км. Испытывает влияние очищенных сточных вод, используется в рекреационных целях. Журбица – река в Буда-Кошелевском районе Гомельской области, левый приток р. Уза. Длина – 6,8 км. Факторами антропогенного воздействия являются сброс сточных вод, рекреационное использование. Столбунка – река в Ветковском районе Гомельской области и Брянской области России, левый приток р. Беседь. Длина – 22 км. Испытывает антропогенное воздействие в виде выпаса скота, поверхностного стока с сельхозугодий, рекреационного использования, расположения на загрязненной радионуклидами территории. Терюха – река в Добрушском и Гомельском районах Гомельской области, левый приток р. Сож. Длина – 57 км. Подвержена влиянию в результате выпаса скота, поверхностного стока с сельхозугодий, рекреационного использования. Грабовка – река в Гомельском районе, правый приток р. Терюха. Длина – 10 км. Факторы антропогенного воздействия – рекреационное использование, выпас скота, сток с сельхозугодий. Липа – река в Буда-Кошелевском районе Гомельской области, правый приток р. Сож. Длина – 62 км. Используется в рекреационных целях, в реку поступает сток с сельхозугодий. Бобруйка – река в Бобруйском районе Могилевской области, правый приток р. Березина. Длина – 14,5 км. Подвержена влиянию сточных вод, используется в рекреационных целях.

Для сбора количественных проб зоопланктона использовали планктонную сеть с номером 70, через которую процеживали 100 л воды. Материал фиксировала 4%-ым формалином. Определение видов проводили под микроскопами «Микмед-5», МБС-10 с использованием определителей [2], [3 и др.]. Для оценки состояния зоопланктонных сообществ использовали ряд структурных показателей: видовое богатство зоопланктона, встречаемость отдельных зоопланктеров, плотность и биомассу, число доминирующих видов, соотношение основных таксономических групп в величинах общей плотности и биомассы: $N_{\text{crust}}/N_{\text{rot}}$, $B_{\text{crust}}/B_{\text{rot}}$, $N_{\text{clad}}/N_{\text{cop}}$, индекс фаунистической общности, индекс видового разнообразия и др. Кроме изучения зоопланктона, осуществляли гидрохимические анализы. Классы качества воды рек по эколого-санитарным (трофо-сапробиологическим) и эколого-токсикологическим показателям устанавливали в соответствии с классификацией водоемов, предложенной В.Н. Жукинским и Л.П. Брагинским [4]. При этом использовали 10 *эколого-санитарных* характеристик (индекс сапробности, насыщение кислородом, прозрачность, содержание взвешенных веществ, цветность воды, pH, концентрации азота аммонийного, нитритного и нитратного, фосфатов) и 8 – *эколого-токсикологических* (содержание цинка, кобальта, кадмия, хрома, железа общего, СПАВ, нефтепродуктов, фторидов). Степень евтрофирования водотоков устанавливали с помощью индекса трофического статуса Карлсона (TSI) [5]. Показатель трофии Nakkarí (E/O) определяли как соотношение числа видов-индикаторов евтрофного и олиготрофного типов [6]. Оценку изменения состава видов и трофического статуса рек проводили с использованием степени трофии, или фаунистического индекса трофности (E),

предложенного А.Х. Мязметсом [7]. Показатели сапробности рассчитывали по методу Пантле и Букка в модификации Сладечека [8].

Результаты исследований и их обсуждение

О.Г. Акушко [9] отмечает, что в последние годы прослеживается негативная тенденция по р. Уза. Согласно данным [10], для р. Уза характерно устойчивое высокое загрязнение (от 2 до 9,4 ПДК) азотом аммонийным, азотом нитритным, фосфором фосфатным, нефтепродуктами. Загрязнение Терюхи обусловлено азотом аммонийным, содержание которого превышает установленный норматив в 1,3–4,2 раза. Проведенные нами гидрохимические исследования показывают, что в изучаемых реках отмечается превышение величин железа – в 1,09–9,01 раз, цветности – в 2,15–4,23 раза. В большинстве рек качество воды также не удовлетворяет нормам по содержанию марганца (1,14–2,72 ПДК), азота аммонийного (1,02–5,26 ПДК), азота нитритного (1,29–2,04 ПДК), цинка (1,11–1,19 ПДК), взвешенных веществ, в ряде рек – фосфора фосфатного (1,21–7,48 ПДК), БПК₅ (1,04–2,12 ПДК), в реках Уза и Бобруйка – нефтепродуктов (1,05–1,14 ПДК). В отдельных случаях (в первую очередь, летом) в реках, подверженных влиянию сточных вод, отмечается снижение величин прозрачности воды по диску Секки, содержания растворенного кислорода ниже допустимого на 2,66–2,83 мг О₂/дм³, повышение величин БПК₅. По величинам эколого-санитарных и экологотоксикологических показателей (таблица 1) класс качества воды в реках изменяется от чистой до грязной (2–5), а разряд качества воды – от вполне чистой до предельно грязной (2б–5б). Средние данные по всем показателям позволяют отнести воду рек Уза и Бобруйка к 4 классу качества воды (загрязненная, разряд качества а–б), воду остальных рек – к 3 классу (удовлетворительной чистоты, разряд качества а–б).

Всего за период исследований в составе зоопланктона рек обнаружено 46 видов и вариететов, относящихся к 14 семействам и 22 родам. Среди указанных видов 26 (56,5%) – кловратки, 14 (30,4%) – ветвистоусые и 6 (13,0%) – веслоногие ракообразные. Преобладание в видовом составе зоопланктона коловраток, в целом, типично для речных экосистем. Количество видов и вариететов, обнаруженных в разных реках, составляет 12 (Журбица), 14 (Бобруйка), 16 (Грабовка), 17 (Терюха, Липа), 19 (Столбунка), 30 (Уза). Индекс видового разнообразия имеет тенденцию к снижению в реках, подверженных влиянию сточных вод. Видовая структура зоопланктона большинства рек Гомельской области сходна – индекс фаунистической общности составляет 0,45–0,68. Данный показатель для р. Бобруйка (Могилевская область) и других рек существенно ниже – 0,18–0,30. Плотность зоопланктона рек изменяется в пределах 1,87–723,45 тыс. экз./м³. При этом, наибольших величин она достигает в р. Уза, увеличиваясь по сравнению с плотностью зоопланктона других рек на 1–2 порядка. Биомасса зоопланктона так же, как и плотность, наибольшая в Узе, в остальных реках величины биомассы на один-четыре порядка меньше. Такой рост количественных показателей объясняется развитием коловраток, что свидетельствует об увеличении загрязненности воды реки и подтверждается возрастающими величинами БПК₅ (рисунок 1).

Таблица 1 – Классы качества воды рек по гидрохимическим и гидробиологическим показателям

Показатели	Реки						
	Уза	Журбица	Столбунка	Терюха	Грабовка	Липа	Бобруйка
Эколого-санитарные характеристики							
Прозрачность, м	4б	3б	3а	3б	3а	3а	3б
Взвешенные вещества, мг/дм ³	5а	3а	4а	4а	3а	3б	4а
Цветность, град.	5б	5б	5б	5б	5б	5б	5б
рН	3а	3а	2б	3а	2б	2б	2б
Азот аммонийный, г/дм ³	4б	4б	3б	3а	3а	3а	3б

Азот нитритный, мг/дм ³	5а	4б	4а	4а	4а	3б	5а
Азот нитратный, мг/дм ³	4а	4а	4а	3а	3а	3а	4а
Фосфаты, мг/дм ³	4б	3б	3б	3б	3б	3б	4б
Насыщение кислородом, %	3б	3а	3а	3а	3а	3а	3б
Индекс сапробности	4а	3б	3б	3б	3б	3б	4а
Эколого-токсикологические характеристики							
Цинк, мг/дм ³	4а	3б	3б	4а	3б	4а	4а
Хром, мг/дм ³	3а	3а	3а	3а	3а	3а	3а
Кобальт, мг/дм ³	3б	3а	3а	3а	3а	3а	3а
Кадмий, мг/дм ³	3а	3а	3б	3а	3а	3а	3а
Железо общее, мг/дм ³	4а	3б	3б	3б	3б	3б	3а
Фториды, мг/дм ³	4а	4а	4а	4а	4а	4а	4а
СПАВ, мг/дм ³	4б	3б	4а	3б	3б	4а	4б
Нефтепродукты, мг/дм ³	4а	4а	4а	4а	4а	4а	4а

Примечания:

1. Классы качества воды: 2 – чистая; 3 – удовлетворительной чистоты; 4 – загрязненная; 5 – грязная.
2. Разряды качества вод: 2б – вполне чистая; 3а – достаточно чистая; 3б – слабо загрязненная; 4а – умеренно загрязненная; 4б – сильно загрязненная; 5а – весьма грязная; 5б – предельно грязная.

Известно, что увеличение доли коловраток в общих величинах количественных показателей зоопланктона наблюдается в водах, подверженных интенсивному антропогенному воздействию. В зоопланктоне исследованных рек доля коловраток в общей плотности и биомассе велика и составляет 43,7–99,9%. Отмечается снижение соотношений $N_{\text{crust}}/N_{\text{rot}}$, $V_{\text{crust}}/V_{\text{rot}}$, $N_{\text{clad}}/N_{\text{cop}}$, при этом, наименьшие величины наблюдаются в реках, испытывающих влияние сточных вод (Уза и Бобруйка). Также при увеличении антропогенного воздействия в реках отмечается смена лидирующих таксономических групп в направлении: Cladocera (Грабовка) → Copepoda (Липа) → Rotifera (Уза, Бобруйка, Журбица, Терюха, Столбунка). Количество доминирующих видов зоопланктона сокращается при увеличении антропогенной нагрузки на реки. Количество доминирующих видов в р. Грабовка наибольшее и составляет 5, в реках Терюха, Столбунка, Журбица, Липа сокращается до 3–4, в реках Уза и Бобруйка доминируют по 2 вида зоопланктона. Тенденция к сокращению количества структурообразующих видов и повышению степени доминирования 1–2 видов свидетельствует об евтрофикации и загрязнении вод.

Отношение числа видов рода *Brachionus* к числу видов рода *Trichocerca* (индекс $Q_{\text{в/т}}$) обладает достаточно высокой информативностью при индикации качества воды. Установлено, что индекс $Q_{\text{в/т}}$ для различных рек изменяется в пределах 0,6–4,0. При этом для рек Грабовка, Липа, Столбунка он составляет менее 1,0 (олиготрофные условия), для рек Журбица и Терюха – 1,3–1,9 (мезотрофные условия), для рек Уза и Бобруйка – 3,2–4,0 (эвтрофные условия).

Рассчитанный по прозрачности воды индекс трофического статуса Карлсона изменяется от 6,1 до 62,3. По индексу TSI трофность исследуемых рек уменьшается в ряду Уза (евтрофная – 63,2) → Бобруйка (евтрофная – 61,1) → Журбица (мезотрофная – 46,9) → Столбунка (мезотрофная – 43,4) → Терюха (мезотрофная – 42,3) → Липа (мезотрофная – 41,7) → Грабовка (мезотрофная – 40,2), что отражено на рисунке 2. По показателю трофии исследованные реки относятся к мезотрофным водоемам и расположились по возрастанию следующим образом: Грабовка → Терюха → Липа → Столбунка → Журбица → Бобруйка → Уза. По шкале А.Х. Мясметса [7] значения коэффициента трофии $E > 4$ характерны для гиперевтрофных, $E = 1–4$ – для евтрофных, $E = 0,2–1$ – для мезотрофных, $E < 0,2$ – для олиготрофных водоемов. По результатам исследований, коэффициент трофии для рек Грабовка, Терюха, Липа, Столбунка составляет 0,9–1, характеризуя их воды как мезотрофные. Значение коэффициента для рек Уза, Бобруйка, Журбица (1,3–1,8) позволяет отнести их воды по этому показателю к евтрофным.

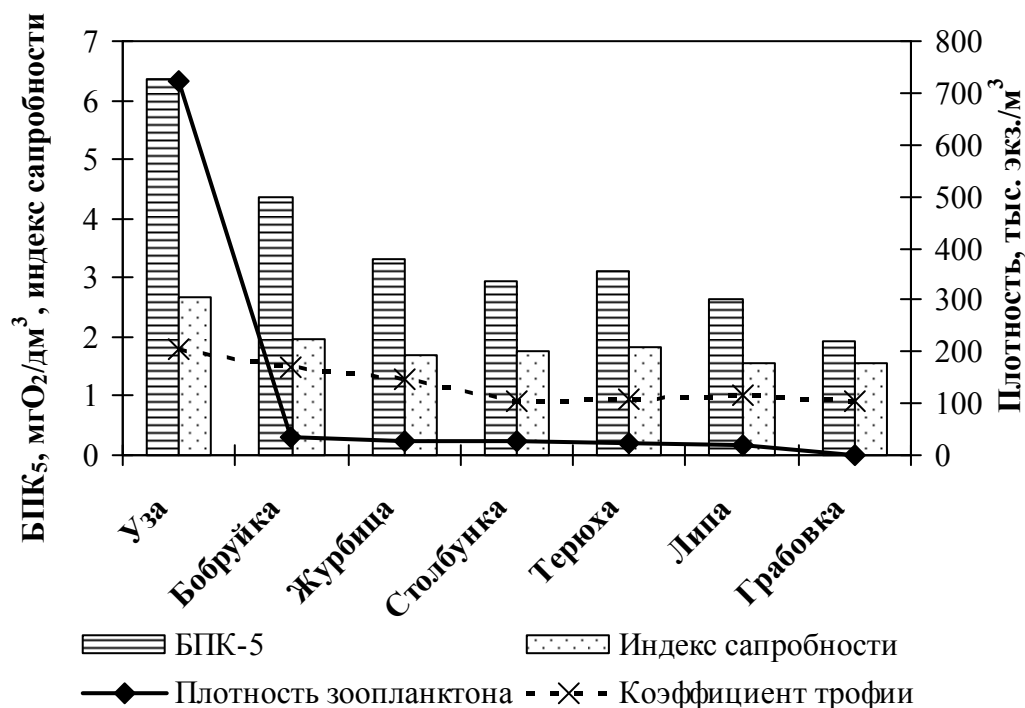


Рисунок 1 – Изменение плотности зоопланктона рек в зависимости от величин БПК₅

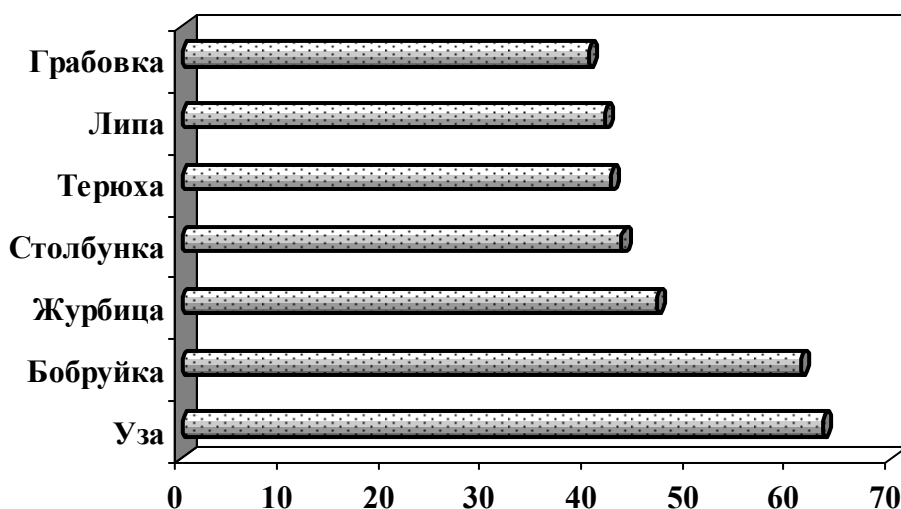


Рисунок 2 – Изменение трофического индекса Карлсона в реках

Рассчитанные индексы сапробности позволяют отнести исследуемые реки к категориям «умеренно загрязненная» (все реки, исключая Узу осенью) и «загрязненная» (Уза в сентябре). В реках Уза, Бобруйка и Журбица также отмечается уменьшение количества олигосапробов (индикаторов чистых вод) и увеличение количества в- и б-мезосапробов (индикаторов загрязненных вод). Следует отметить, что постоянное загрязнение сточными водами вышеперечисленных рек заметно сказывается на фауне планктона, которая включает виды б- и в-мезосапробного комплексов.

Заключение

Результаты проведенных исследований позволяют заключить, что качество воды ряда изученных малых рек Беларуси по некоторым гидрохимическим показателям не удовлетворяет нормативам. Под влиянием органических загрязнений значительно возрастает видовое разнообразие коловраток, нарушается структура зоопланктонных сообществ. Особенно ярко

это проявляется в росте плотности и биомассы, увеличении индекса сапробности, смене доминантного комплекса видов и сокращении количества доминирующих видов, уменьшении индекса видового разнообразия, снижении соотношений $N_{\text{crust}}/N_{\text{rot}}$, $B_{\text{crust}}/B_{\text{rot}}$, $N_{\text{clad}}/N_{\text{cop}}$, росте доли коловраток в величинах общей плотности и биомассы. При увеличении антропогенного воздействия в реках отмечается смена лидирующих таксономических групп в направлении: Cladocera → Copepoda → Rotifera. Наиболее устойчивые зоопланктонные сообщества сформировались в реках Липа и Грабовка, где изученные показатели в течение нескольких лет менее варьируют.

Литература

1. Семенова, А.С. Оценка экологического состояния прибрежной акватории Куршского залива вдоль национального парка «Куршская коса» по показателям зоопланктона / А.С. Семенова // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. – Самарская Лука, 2009. – Т. 18. – № 2. – С. 31–38.
2. Guides to the Identification of the Microinvertebrates of the Continental Waters of the World / Coordinating editor H.J.F. Dumont: Cladocera. The Chydoridae and Sayciinae (Chydoridae) of the World / by N.N. Smimov. – Amsterdam : SPB Academic Publishing, 1996. – 197 p.
3. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Ракообразные / под общ. ред. С.Я. Цалолыхина. – СПб. : Наука, 1995. – Т. 2. – 632 с.
4. Жукинский, В.Н. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши / В.Н. Жукинский, Л.П. Брагинский // Гидробиологический журнал. – 1993. – Т. 29. – № 4. – С. 62–76.
5. Carlson, R.E. A trophic state index for lakes / R.E. Carlson // Limnology and Oceanography. – 1977. – Vol. 22. – № 2. – P. 361–369.
6. Hakkari, L. On the productivity and ecology of zooplankton and its role as food for fish in some lakes in Central Finland / L. Hakkari // Biological Results Reports for the University Juvaskyla. – 1978. – № 4. – P. 3–84.
7. Мязметс, А.Х. Изменения зоопланктона / А.Х. Мязметс // Антропогенное воздействие на малые озера. – Л. : Наука, 1980. – С. 54–64.
8. Pantle, R. Die biologische Uerwachung der Gawasser und die Darstellung der Ergebnisse / R. Pantle, H. Buck // Gas und Wasserfach. – 1955. – Bd. 96, № 18. – S. 604.
9. Акушко, О.Г. О состоянии водных объектов Гомельской области: проблемы и перспективы / О.Г. Акушко // Сотрудничество в области использования природных ресурсов и экологического оздоровления бассейна Днепра : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : БелГУТ, 2011. – С. 3–6.
10. Состояние природной среды Беларуси : экологический бюллетень. – Минск, 2010. – 397 с.

УДК 630*5

Лесные таксы: история и современное состояние

В.Ф. БАГИНСКИЙ, В.В. ЗЕЛЕНСКИЙ, О.В. ЛАПИЦКАЯ

Описана система оплаты за лес на корню и показана эволюция этого процесса. Выявлены основные недостатки современной оплаты за лес на корню в виде попенной платы. Предложено изменить систему установления платежей за древесину на рыночных принципах в зависимости от цены конечной продукции, чтобы она обеспечивала безубыточную работу лесного хозяйства.

Ключевые слова: таксы, цена, попенная плата, древесина, лес на корню, лесное хозяйство.

This paper centers on the system of payment for standing timber and its development. The study also helps to elucidate the principal shortcomings of the present system of payment for standing timber in the form of stumpage price. In order for forestry enterprises to work without any loss, the authors proposed that alterations should be introduced in the system of fixing payment for wood on the market principles depending on the price of the end product.

Keywords: statutory prices, value, stumpage price, wood, standing timber, forestry.

Введение

В Республике Беларусь лес является одним из важнейших природных ресурсов. Лесистость территории страны достигла 38,8%, общая площадь лесов превышает 8 млн. га, а их запас равен 1,58 млрд. м³ [3]. В то же время процентная доля лесопромышленного сектора в формировании валового внутреннего продукта (ВВП) относительно невысока – 2,1%. В 1929 году лесной сектор давал до 60% ВВП [5]. Конечно, здесь сказывается наличие в современной Беларуси высокоразвитой промышленности: машиностроение, металлургия, химия и нефтехимия, радиоэлектроника, чего не было в 20-е годы. Существенный вклад в ВВП вносит агропромышленный сектор. Тем не менее лес должен обеспечивать более высокий вклад в ВВП.

Лесное хозяйство может и должно стать самоокупаемым, а не получать дотации из бюджета. Вспомним, что до середины 20-х годов прошлого века, особенно в 1900–1913 годах, доходы от реализации древесины превышали расходы на лесное хозяйство в 3 раза [14].

Одной из причин недостаточного эффекта от лесного хозяйства является несовершенство лесных такс. Они постоянно повышаются, часто без достаточного научного обоснования, что вызывает законное недовольство лесопользователей. Тем не менее эти периодические повышения не обеспечивают ведения лесного хозяйства на принципах самоокупаемости.

В то же время должно быть продолжено совершенствование экономических отношений в лесном комплексе, что требует нового научного обоснования лесных такс. Поэтому изучение истории и современного состояния порядка и правил отпуска древесины на корню является актуальным.

Материалы и методика

Материалом для настоящих исследований послужили открытые ведомственные материалы Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь и данные по учету лесного фонда. Широко использованы литературные источники, список которых приведен в настоящей статье.

Методика исследований включала общеизвестные лесоводственные, лесоустроительные и экономические методы, а также системный анализ.

Результаты и обсуждение

Система платного отпуска древесины появилась в Европе в XIV–XV веках, а в России значительно позже [12]. Платный отпуск любого ресурса начинает проводиться тогда, когда этот ресурс оказывается востребованным и дефицитным. Первоначально каких-то норм, та-

рифов, единых цен на древесину не было, и реализацию её каждый владелец осуществлял по своему усмотрению. Впервые единое ценообразование было введено в России в государственных лесах в 1769 г. указом Екатерины II [12].

К концу XVIII в. в России сложилась система оценки древесины на корню и организация ее продажи [8], [9], [10], [12]. Цены на древесину на корню делились на таксовые и торговые. В 1883 г. Лесной департамент выпустил «Наставление для составления такс на лесные материалы из казенных лесных дач». В Наставлении приведена общая формула для определения таксовой или корневой стоимости (T):

$$T = \frac{r}{1.01p} - (e + d),$$

где r – цена лесоматериалов на рынках сбыта; e – издержки по заготовке; d – транспортные затраты на доставку потребителям; p – предпринимательская прибыль, %.

Разряды такс устанавливались в зависимости от расстояния, отделяющего лесосеку от магистральных путей вывоза древесины. Таксовая стоимость деловой древесины зависела от крупности, породы и разряда. Наивысшую стоимость имела сосна, на 20% ниже – лиственница, на 25–40% – ель, пихта и в 3–5 раз меньше – лиственные породы.

Описанная система оценки стоимости древесины обеспечивала ведение лесного хозяйства России (в т. ч. и на территории нынешней Беларуси) с высокой доходностью [14]. Конечно, можно сказать, что качество лесного фонда было лучше современного, но это правомерно лишь до конца XIX века. Интенсивные лесозаготовки со второй половины XIX века в пределах современной Беларуси составили 12 млн. м³, в 1900 г. – 16 млн. м³, в 1913 г. – 20 млн. м³. Они привели к снижению лесистости с 44% в 1861 г. до 41% в 1887 г., 37% в 1900 г. и 33% в 1913 г. Соответственно произошло ухудшение качества лесосечного фонда. Поэтому опыт ценообразования на древесину в дореволюционной России представляется полезным и для нашего времени.

После революции осуществлена национализация и создана система централизованного регулирования экономики. В ценообразовании же еще некоторое время продолжали действовать преимущественно рыночные механизмы. Согласно Лесному кодексу, принятому в разных республиках в 1924–25 гг., преимущество в продаже леса на корню отдавалось государственным учреждениям и предприятиям, которые вступали между собой в соревнования на торгах.

Инструкция по составлению такс была выпущена только в 1925 г. и дословно содержала основные положения методики разработки лесных такс, изложенные в «Наставлении» Лесного департамента 1883 г. Предполагалось их вскоре переработать. Несмотря на неоднократные попытки, рассчитать новые лесные таксы не удалось из-за отсутствия специалистов. Разработка новых такс так и не была завершена, и до 1930 года на практике применялись старые «царские» таксы.

В 1930 г. плата на древесину на корню заменена 5% налогом с оборота [8]. Это, с одной стороны, существенно упростило расчеты с лесопользователями, но с другой – устранило экономические стимулы рационального использования лесосырьевых ресурсов, роль которых всегда выполняют корневые цены.

Система корневых цен на древесину впервые изложена В.И. Переходом [11]. Он считал, что основным способом исчисления корневой цены должна стать оценка по стоимости производства. Хозяйственная корневая цена, возмещающая производственные расходы лесного хозяйства, включала в себя и ренту по плодородию и местоположению.

В 1928 г. издан труд М.М. Орлова «Лесоустройство», содержащий большой раздел по корневой ценности леса и лесным таксам [10]. Ученый дал развернутую методику исчисления корневых цен в условиях рыночного хозяйствования в нашей стране. Однако в то время его учение о корневой стоимости леса не только не нашло последователей и практического применения, но и было подвергнуто жесточайшей критике. В числе критиков был и его ученик – М.В. Третьяков. Критиковали М.М. Орлова как сторонника буржуазной теории лесной статистики и постоянства лесопользования.

Возврат к лесным таксам произошел в 1949 г. [1], [8]. Систему исчисления корневых цен к этому времени предложил П.В. Васильев [2]. В качестве методологической основы корневых цен он сформулировал три положения:

1. Лесная такса по своей экономической природе есть не что иное, как отпускная цена древесины, и должна определяться как сумма себестоимости плюс денежное выражение прибавочного продукта. Под себестоимостью следует понимать издержки производства в лесном хозяйстве. При этом в расчет надо брать издержки будущих лет. Прибавочный продукт, включаемый в таксы, – это отраслевые накопления, необходимые для расширенного воспроизводства лесного хозяйства.

2. Лесные таксы должны использоваться в плановой экономике как инструмент управления, регулятор лесных отношений.

3. Наряду с издержками производства и накоплениями лесные таксы также должны включать в себя дифференциальную ренту.

В то же время при практической разработке лесных такс дифференциальная рента не нашла применения. Все издержки лесовыращивания и лесозаготовок представлены как среднеотраслевые. Это означает, что предприятия, работающие в лучших природных условиях, имеют хороший доход, а предприятия, работающие в плохих условиях, терпят убытки. В течение всей истории плановой экономики предприятия лесной промышленности всегда делились на три группы: плано-убыточные, низко и средне рентабельные, с нормальной и высокой рентабельностью. Пропорции между этими группами изменялись от одного пересмотра цен к другому. Роль централизованного управления состояла в том, чтобы выравнивать экономическое положение леспромпхозов, находящихся в разных производственных условиях. Делалось это за счет перераспределения прибыли: у рентабельных предприятий прибыль изымалась и направлялась в бюджет, на дотации убыточным предприятиям и финансовую поддержку низко рентабельных предприятий.

Основное противоречие теории П.В. Васильева состоит в том, что, провозглашая необходимость учета в лесной таксе дифференциальной земельной ренты, он не дает механизма ее исчисления. В практическом отношении существенным недостатком является слабая дифференциация лесных такс, почти не учитывающая действительную разницу в затратах на заготовку и вывозку древесины в различных производственных условиях. Пороки этой теории не случайны, а носят генетический характер, так как она ставит величину лесных такс в соответствие с валовым лесным доходом, сам же доход рассматривается как товарная продукция лесного хозяйства.

Первым, кто претворил в жизнь теорию П.В. Васильева, был Н.П. Анучин. Разработанные им лесные таксы были утверждены Минлесбумпромом СССР в качестве практического пособия для работников лесозаготовительной промышленности и изданы в 1949 г. [1]. Первый прейскурант лесных такс действовал почти 20 лет. В последующие годы таксы пересматривались одновременно со всей системой плановых цен с интервалом примерно 10 лет. После 1949 г. прейскуранты выпускались в 1967, 1974, 1982 и 1990 гг. [25]. При каждом очередном пересмотре таксы увеличивались в 1,5–2 раза, менялась их дифференциация по зонам, породам, сортиментам.

Недостатки плановых лесных такс были очевидны. Главный и решающий из них заключался в том, что таксы не выравнивали экономические условия для лесопользователей, не создавали хозрасчетных механизмов хозяйствования, без которых невозможно рационально использовать лесосырьевые ресурсы. Это стало ясно к концу 70-х годов XX века. Появились новые подходы, хотя они обязаны были учитывать плановый характер экономики. Наиболее значимым здесь явилось предложение В.Л. Джиковича [4]. Он писал, что корневые цены должны исчисляться на рентной основе. В плановой экономике, базирующейся на общественной собственности на средства производства, не может быть абсолютной земельной ренты. Но дифференциальная рента как показатель сравнительной эффективности производства при эксплуатации природных ресурсов различного качества и местоположения должна учитываться.

Рентный подход к определению корневых цен В.Л. Джикович связывал с вопросом об «экономической природе леса» при социализме. Если корневая цена – это лесная рента, то спелый лес не является продукцией лесного хозяйства, а лесной доход, образующийся за счет платы за лесопользование, есть разновидность фиксированного рентного платежа, взимаемого государством на правах собственника лесных ресурсов. Негласным признанием этого положения в плановой экономике является то, что лесной доход по традиции поступал не органам лесного хозяйства, а в государственный бюджет.

Вопрос о том, связаны ли между собой затраты на ведение лесного хозяйства и лесной доход – принципиальный. В.Л. Джикович считал, что хозяйство, ведущееся на базе естественных лесов, не может быть товарным. Размер средств, вложенных в лесное хозяйство, определяется народнохозяйственной целесообразностью на основе единого плана, исходя из экономической эффективности лесохозяйственных мероприятий. Лесной доход является всего лишь одним из источников государственных накоплений точно, как и налог на прибыль хозяйственных предприятий, и не находится в прямой зависимости с расходами на лесное хозяйство.

Переход к рыночной экономике в начале 90-х годов потребовал учесть её законы. Затратная теория в чистом виде здесь не подходит. Поэтому в 1990 г. большой творческий коллектив приступил к разработке методических рекомендаций по определению платы за лесные ресурсы с учетом теории оптимального планирования и практики рыночного ценообразования [7]. Общая идея заключалась в следующем: корневая цена или плата за древесный ресурс должна состоять из платы за право пользования древесным ресурсом и платы за воспроизводство и охрану лесных ресурсов. Первая по экономической сущности является лесной дифференцированной рентой и должна изыматься в виде фиксированного платежа из прибыли предприятий, вторая – включаться в себестоимость продукции. Однако далее теоретических построений у авторов дело не пошло.

Началом перехода к рыночным отношениям явилась либерализация цен, осуществленная в конце 1991 г. В следующем году были введены новые лесные таксы, рассчитанные по методике А.С. Лазарева [8]. Его предложение существенно отличается от внесенного Н.П. Анучиным [1]. Затраты на лесовыращивание в [8] относятся не к расчетной лесосеке, а к лесосечному фонду, что позволяет с помощью такс получить от лесопользователей плату за фактически отпущенную древесину на корню. Рента по местоположению в [8] не дифференцируется в зависимости от породы и крупности древесины, а принимается единой на обезличенный кубометр, что соответствует реальным затратам на вывозку древесины. В таксу введена также рента по плодородию, отражающая породный состав.

В то же время по своей экономической природе новые лесные таксы ничем не отличаются от действовавших ранее. В них также соединены несоизмеримые экономические величины: среднеотраслевые затраты на лесное хозяйство и дифференциальная лесная рента. Если бы экономика оставалась плановой с ценами на лесоматериалы, составленными по среднеотраслевым затратам, то новые таксы [8] постигла бы та же участь, что и принятые в 1949 г.: их пришлось бы немедленно корректировать, убирая из них рентные надбавки. Но либерализация не только создала условия для формирования цен на лесоматериалы в соответствии со спросом, но и сопровождалась гигантской инфляцией. При тысячекратном росте цен недостатки новых такс невозможно было заметить, так как их индексация значительно отставала от рыночных цен на лесоматериалы.

В Беларуси приведенные теоретические и практические положения по построению лесных такс действовали аналогично вышеописанному. В настоящее время лесные таксы в Беларуси построены аналогично изложенному в [7]. Они регулярно индексируются в соответствии с уровнем инфляции и постоянным повышением цен на другие товары и услуги [6].

Обобщая опыт построения лесных такс, можно сделать вывод, что их теоретическая основа не обеспечила разработку оценки древесины на корню, которая отвечает рыночным требованиям. Поэтому должны быть проведены новые исследования по научному обоснованию лесных такс. В их основу следует положить рыночные принципы, т. е. исходить из цены конечной продукции с учётом получения допустимой прибыли при каждом переделе. Например, цена древесины на корню для получения бумаги пройдет стадии: бумага – целлюлоза – балансы – мелкая древесина на корню.

Заключение

Обобщая изложенное, приходим к следующим выводам:

- В дореволюционной России доход от реализации леса на корню превышал расходы на ведение лесного хозяйства в 3 раза. В настоящее время этот доход не покрывает затраты на лесное хозяйство.
- Лесные таксы за исторический период (XIX–XX вв.) существенно изменялись как в теоретическом, так и в практическом плане.
- В настоящее время теоретической основой лесных такс является достижение компенсации расходов на лесное хозяйство с учетом дифференциальной ренты.
- Теоретические требования к лесным таксам в практике лесного хозяйства никогда не были достигнуты.
- Новые разработки лесных такс последних двух десятилетий, хотя и провозглашают примат рыночных требований, но фактически опираются на старые теоретические положения и потому не удовлетворяют современным требованиям.
- Для перехода лесного хозяйства на самоокупаемость требуется совершенствование экономических отношений в лесопромышленном комплексе и обновлении лесных такс.

Литература

1. Анучин, Н.П. Лесные таксы / Н.П. Анучин. – М.–Л. : Гослесбумиздат, 1949. – 96 с.
2. Васильев, П.В. Экономическое содержание лесных такс в СССР (доклад на Межведомственном совещании по составлению лесных такс при Минлесхозе СССР, ноябрь 1947 г.) / П.В. Васильев // Труды ин-та леса АН СССР. – М. : Гослесбумиздат, 1950. – Т. V. – С. 15–26.
3. Государственный учет лесов по состоянию на 1 января 2011 года. – Минск : Минлесхоз Республики Беларусь, 2011. – 91 с.
4. Джикович, В.Л. Экономика лесного хозяйства / В.Л. Джикович. – М. : Лесная промышленность, 1979. – 189 с.
5. Зеленский, В.В. Организация лесохозяйственного производства при переходе к рыночным отношениям / В.В. Зеленский. – Гомель : ИЛ НАН Беларуси, 2005. – 155 с.
6. Комплекс мероприятий по совершенствованию работы лесного хозяйства // Лесное и охотничье хозяйство, 2010. – № 7. – С. 5–6.
7. Кожухов, Н.И. Разработать методические рекомендации по определению платы за лесные ресурсы / Н.И. Кожухов, П.Т. Воронков, И.В. Туркевич // Научный отчет ВНИИЦ «Экология» Госкомприроды СССР, 1990. – 93 с.
8. Лазарев, А.С. Лесной доход / А.С. Лазарев, Л.П. Павлова. – М. : Лесная промышленность, 1997. – 261 с.
9. Моисеев, Н.А. Экономика лесного хозяйства / Н.А. Моисеев. – М. : МГУЛ, 1990. – Ч. 1. – 158 с.
10. Орлов, М.М. Лесоустройство / М.М. Орлов. – М. : Лесное хозяйство и лесная промышленность, 1928. – Т. 2. – 326 с.
11. Переход, В.И. Теория лесного хозяйства (курс лесной экономики со статистикой) / В.И. Переход. – Минск, 1926. – 218 с.
12. Попов, Н.Е. Лесная технология / Н.Е. Попов. – СПб., 1871. – 357 с.
13. Семенченко, Н.И. Развитие научных основ и практики оценки древесины на корню в СССР и за рубежом (обзор) / Н.И. Семенченко, А.С. Лазарев. – М. : ЦБНТИ-лесхоз, 1980. – Вып. 3. – 30 с.
14. Шутов, И.В. О золотом эквиваленте лесного дохода России / И.В. Шутов // Лесное хозяйство, 2011. – № 1. – С. 12–14.

УДК 630*1

Прогноз трансформации площадей сосновых насаждений различных типов леса юго-восточной части Белорусского Полесья в связи с изменением климата

М.С. ЛАЗАРЕВА

В статье показаны основные тенденции трансформации типологической структуры сосновых лесов юго-восточной части Белорусского Полесья. Представлен прогноз динамики площадей различных типов леса сосновых насаждений до 2030 года в связи с изменением климата.

Ключевые слова: сосновое насаждение, тип леса, типологическая структура, климат, Белорусское Полесье, прогноз.

This paper centers on major patterns of transformation of typological structures of pine stands occurring in southeastern Belarussian Polesye and presents projections of the dynamics of the area covered by pineries of different forest types to 2030 in the context of climate change.

Keywords: pinery, forest type, typological structure, climate, Belarussian Polesye, projection.

Введение

Прогноз влияния последствий изменения климата на состав, продуктивность, ресурсный потенциал лесного растительного покрова Беларуси необходим для практики ведения лесного хозяйства с целью определения мер по адаптации отрасли.

Исходя из того, что тип леса является производным не только от рельефа местности, почвенно-гидрологических условий, но и от климата, правомерно поставить задачу прогнозирования климатически обусловленной динамики типов леса на основании сложившихся к настоящему времени в условиях Беларуси рельефа местности и почв.

В настоящее время сосновая формация занимает более 50% лесопокрытой площади Беларуси. Комплексный геоботанический анализ сосновых лесов республики выполнен Н.Ф. Ловчим [1]. Фитоценотическая структура сосновых лесов Беларуси при продвижении с севера на юг претерпевает ряд изменений [2], и по совокупности фитоценологических особенностей сосновые леса Полесья, по мнению некоторых авторов, могут быть выделены в особый полесский подтип [3].

В соответствии с классификацией И.Д. Юркевича [4] в Беларуси выделены следующие типы сосновых лесов: лишайниковый, вересковый, брусничный, мшистый, орляковый, кисличный, приручейно-травяной, черничный, долгомошный, багульниковый, сфагновый, осоково-сфагновый и осоковый.

Коренными сосновыми лесами на почвах недостаточного и умеренного увлажнения являются сосняки лишайниковый, вересковый, брусничный, мшистый, орляковый, кисличный и черничный. Эти типы образуют субформацию – сосновые леса по суходолу. Очень сухие – сосняки лишайниковые, сухие – сосняки вересковые, брусничные, сухие мшистые, оптимально-увлажненные – сосняки кисличные, орляковые, черничные, свежие мшистые.

За последние 15 лет доля сосновой формации в Беларуси сократилась на 6,4% [5].

В целом по прогнозам ученых в результате изменения климата в условиях Беларуси произойдет расширение ареала смешанных, широколиственных лесов и лесостепи, а площади хвойных лесов, наоборот, уменьшатся.

Объекты и методика исследований

Объекты исследования – сосновые насаждения юго-восточной части Беларуси различных типов леса с характерными для них признаками формационного состава, структуры, продуктивности и направлений сукцессионной динамики. На основе материалов лесоустройства по сосновому хозяйству как в целом по Гомельскому ГПЛХО, так и в разрезе лесхозов с учетом типов леса и лесорастительных условий проведена систематизация материала.

Термин «тип леса» используется в традиционном его понимании. В качестве исходного положения признается, что биогеоценоз состоит как из типов леса, так и более мелких структурных элементов – ассоциаций, представленных особенно широко в переходных состояниях.

Существенными для лесного хозяйства сдвигами в климате первой половины текущего столетия признаны повышение средних температур всех месяцев года в среднем от 0,6 до 2,9 °С при не уменьшающейся транспирации насаждений и незначительном увеличении осадков, которые приходятся на зимние месяцы, когда их роль как источника влаги для вегетации текущего года невелика.

Оценки изменения климата на территории Гомельского ГПЛХО до 2030 г. базируются на результатах модели общей циркуляции атмосферы hadCM2 (Великобритания). Базовый период – 1960–1990 гг.

Установление климатически детерминированной динамики типов леса сосновых насаждений проводилось на основе двух ключевых методических принципов теоретического изображения типологических взаимосвязей: схема эдафо-фитоценоотических рядов типов леса В.Н. Сукачева и эдафическая сетка типов лесорастительных условий П.С. Погребняка. В основу положен принцип типологического континуума сосновой формации. Перекрывание отдельных типов леса показывает наличие наиболее часто встречающихся эдафически сопряженных ассоциаций этих типов, что дает возможность теоретически предсказать их динамику [1], [2].

Каждый тип леса представлен совокупностью различных ассоциаций, из которых «центральное» место принадлежит «коренной» ассоциации. Крайние эдафически сопряженные ассоциации, как правило, примыкают к соседнему участку леса и являются переходными. При любых внешних воздействиях, в том числе климатических, эти ассоциации будут наиболее уязвимыми, и теоретически предполагаемые сдвиги типологической структуры, вероятно, произойдут за счет этих ассоциаций. Учитывая направленность «климатических» сукцессий в условиях юго-восточной части Белорусского Полесья, трансформация типов леса может быть ориентирована относительно эдафо-фитоценоотических рядов В.Н. Сукачева по ряду ВС слева направо, по ряду АД вверх (рисунок 1).

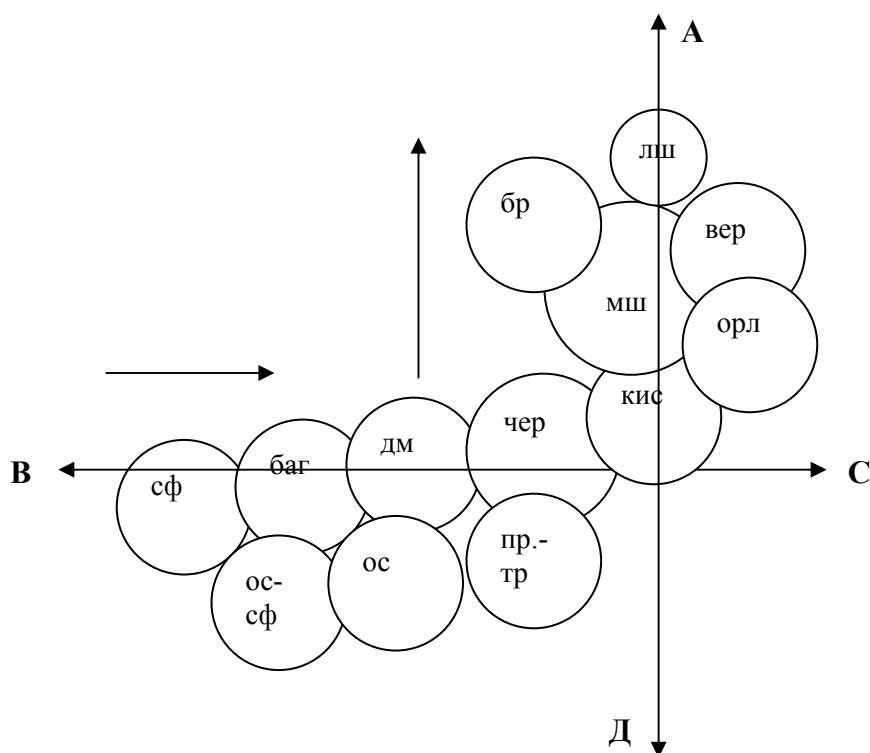


Рисунок 1 – Эдафо-фитоценоотические ряды типов леса коренной сосновой формации (стрелками показаны направления возможной трансформации типов леса под влиянием изменения климата)

При определении вероятности трансформации типологической структуры сосняков в условиях изменения климата и установления групп риска использовался метод логического анализа. В основу разработки прогноза возможных изменений площадей сосновых насаждений положены основополагающие законы природы леса, основные положения, принятые в экологии, лесоводстве, лесной таксации, и имеющийся экспериментальный материал.

На основе динамики распределения площадей сосновых насаждений различных типов леса и с учетом многолетних данных по среднегодовой температуре были рассчитаны базовые относительные показатели «сдвигов» при изменении температуры на 1°C .

Результаты и обсуждение

В условиях юго-восточной части Беларуси сосновая формация занимает площадь 943,8 тыс. га, что составляет более 60% лесопокрытой площади лесного фонда Гомельского ГПЛХО.

Суходольные типы леса распространены на площади более 870 тыс. га (92% от площади сосновой формации Гомельского ГПЛХО). В суходольных сосняках преобладает мшистый тип леса, составляющий 48% площади сосновой формации, далее по мере убывания следуют черничный (18,7%), орляковый (11,4%), вересковый (10,5%), лишайниковый (1,5%), кисличный (1,4%) и брусничный (0,4%) типы леса.

Сосновые насаждения, произрастающие в переувлажненных и болотных условиях занимают 72 тыс. га, из них 51% приходится на сосняки долгомошные, 18% – сосняки багульниковые и по 13–14% – сосняки осоковые и осоково-сфагновые.

Преобладание сосновых лесов в Полесье связано не с зональными климатическими факторами, которые в целом обуславливают неморальный облик растительности и распространение широколиственных формаций, а почвенно-орографической спецификой: однообразием рельефа, высокой заболоченностью территории и преобладанием песчаных и торфяно-болотных почв. Вследствие указанных причин преобладающими субформациями сосновых лесов Полесья являются монодоминантные сосновые и дубово-сосновые леса [3], по характеру наиболее распространенных в Полесье почв продуктивность сосновых насаждений во многом определяется режимом грунтовых вод. Благоприятным для растений является постоянный оптимальный уровень грунтовых вод с колебаниями, не превышающими высоту капиллярного поднятия, что в естественных условиях бывает редко. Расчетная амплитуда колебаний уровня грунтовых вод в сосновых фитоценозах почти вдвое меньше, чем в зонах, где гидрологический режим подвергался интенсивному антропогенному воздействию. В наибольшей степени это воздействие сказывается на территории Полесья в связи с проводимыми здесь в широких масштабах мелиоративными работами [6]. В настоящее время в лесном фонде Гомельского ГПЛХО площади мелиорированных типов сосновых лесов (зеленомошный, долгомошный, осоковый, осоково-сфагновый, сфагновый и багульниковый) составляют более 460 га.

Поскольку изменение количества осадков по среднегодовым показателям не носит принципиального характера, т. к. в большей степени увеличение присуще осенне-зимним месяцам, когда они существенного влияния на рост древесной растительности не оказывают, трансформация типологической структуры сосновых насаждений в большей степени может быть обусловлена изменением температурного режима.

Прогнозные изменения температуры воздуха в среднем для территории лесного фонда Гомельского ГПЛХО к 2020 году составляют выше многолетних на $0,1^{\circ}\text{C}$, однако в разрезе лесхозов имеются особенности. Территория области по температурным изменениям разделяется на две части: западную и восточную. В западной части области среднегодовая температура воздуха может быть ниже многолетней на $1,0^{\circ}\text{C}$ и более на территории лесного фонда Милашевичского, Житковичского, Лельчицкого и Петриковского лесхозов и на $0,3\text{--}0,4^{\circ}\text{C}$ – на территории Ельского, Наровлянского и Мозырского лесхозов соответственно. Отклонение в сторону уменьшения температуры возможно связано с орографическими факторами, т. е. большей долей площадей, характеризующихся пониженным рельефом местности. Так, на

территории Милашевичского лесхоза площади долгомошных, багульниковых, осоковых и др. болотных типов леса в 4 раза превышают среднее значение по области.

На территории лесного фонда ряда лесхозов отклонения температуры от многолетних данных минимальны: Калининский и Октябрьский – ниже многолетних на 0,2–0,1 °С, Василевичский и Комаринский – выше на 0,1 °С, Хойникский – отклонений не прогнозируется.

В то же время на территории восточной части области наблюдается увеличение температуры воздуха по сравнению с многолетними данными: от 0,4–0,8 °С (Светлогорский лесхоз) до 0,8–1,1 °С (Лоевский, Речицкий, Ветковский, Гомельский, Ветковский, Буда-Кошелевский, Жлобинский и Рогачевский лесхозы) и более 1,1 °С (Чечерский спецлесхоз).

К 2030 году отклонения температуры от средних многолетних данных в среднем по Гомельскому ГПЛХО могут составить 0,8 °С. Возможность изменений температуры в сторону уменьшения сохраняется на территории Милошевичского, Житковичского и Лельчицкого лесхозов (0,9–0,7 °С). В Петриковском лесхозе температура приближается к многолетней (ниже на 0,1 °С). Наблюдается отклонение в сторону увеличения в Ельском и Наровлянском (0,3), Мозырском опытном (0,4), Калининском (0,5), Октябрьском (0,6), Хойникском (0,7), Комаринском и Василевичском (0,8), Светлогорском (1,1). В таких лесхозах, как Лоевский, Речицкий опытный, Ветковский, Жлобинский, Буда-Кошелевский опытный, Гомельский, Рогачевский и Чечерский специализированный, прогнозируется увеличение температуры воздуха по сравнению с многолетней более 1,1 °С.

Используя модель изменения климатических показателей до 2030 года в разрезе лесхозов Гомельского ГПЛХО и с учетом относительных показателей «сдвигов» при изменении температуры воздуха на 1 °С, была разработана модель динамики типологической структуры основных насаждений до 2020 и 2030 года. В таблице представлен фрагмент модели динамики типологической структуры сосновых насаждений на примере ГСЛХУ «Чечерский спецлесхоз».

Таблица 1 – Модель динамики типологической структуры сосновых насаждений до 2020 года

Типы леса	Типы леса														
	лишайниковый	вересковый	брусничный	мшистый		орляковый	кисличный	черничный		долгомошный	багульниковый	осоковый	осоко-сфагн	сфагновый	приручейно-гр
				сухой	свежий			свежий	влажный						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Чечерский спецлесхоз															
Лишайниковый	1,00	0,12													
Вересковый	0,12	0,88	0,14	0,08											
Брусничный		0,14	0,86	0,09											
Мшистый сухой		0,08	0,09	0,83	0,19										
Мшистый свежий				0,19	0,81	0,10		0,17							
Орляковый					0,10	0,90	0,07								
Кисличный						0,07	0,93								
Черничный свежий					0,17			0,83	0,19						
Черничный влажный								0,19	0,81	0,19					0,12
Долгомошный									0,19	0,81	0,14				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Багульниковый										0,14	0,86	0,12			
Осоковый											0,12	0,88	0,02		
Осоково-сфагновый												0,02	0,98		
Сфагновый														1,00	
Приручейно-травяной									0,12						0,88

Наибольшая реакция на изменение климата может ожидаться от группы суходольных типов леса и, прежде всего, мшистых. Продолжение процессов увеличения сухости в сосняках мшистых, вересковых и брусничных в сочетании с бедными почвенными условиями создаст предпосылки к развитию дигрессивных типов леса и снижению продуктивности. Учитывая, что мшистые типы леса имеют самое большое распространение по всей территории республики, в будущем возможны потери запаса ценной древесины. Если в 2020 году на территории ГСЛХУ «Чечерский спецлесхоз» ухудшение условий произрастания мшистых типов леса возможно примерно на 17% площади, то к 2030 году – около 23%. В настоящее время брусничные типы леса представлены в Беларуси в незначительном количестве и сконцентрированы преимущественно в северной подзоне, в условиях Гомельского ГПЛХО они составляют 0,4% площади сосновой формации региона. К 2030 году за счет мшистых типов леса возможно увеличение площади брусничных типов – до 3% и вересковых – до 12%. Возможно увеличение в 1,3 раза площади лишайниковых типов леса. Трансформация типов леса в наименьшей степени коснется кисличников, т.к. данные типы леса произрастают в оптимальных для сосны почвенно-гидрологических условиях. Это в некоторой степени относится и к орляковым типам леса.

К 2030 году в результате трансформации типологической структуры сосновых насаждений в лесном фонде Гомельского ГПЛХО на площади примерно 50 тыс. га возможно снижение продуктивности, в основном за счет группы суходольных типов леса. Значительная доля мшистых свежих типов леса (около 15 тыс. га) может перейти в сухие, со снижением продуктивности от I класса бонитета ко II. Брусничные типы леса могут снизить продуктивность от II до III классов, вересковые – от III до IV классов бонитета.

В результате климатически детерминированной динамики типологической структуры в условиях Гомельского ГПЛХО можно ожидать и некоторого увеличения продуктивности сосняков долгомошных, отчасти черничных и в некоторой степени – насаждений болотной субформации. В связи с переходом влажных черничных типов леса в свежие возможно изменение их продуктивности от II класса бонитета к I (на 30 тыс. га). Увеличение продуктивности от III класса бонитета до II возможно в сосняках долгомошных в связи с их переходом во влажные черничные типы леса (на 10 тыс. га). Багульниковые типы леса могут увеличить продуктивность с IV класса бонитета до III. Увеличение продуктивности осоковых, осоково-сфагновых типов леса не значительно (от V^a до V, от V^b до V^a).

Таким образом, изменение типологической структуры сосновых лесов в связи с изменением климата может оказать в целом существенное влияние на продуктивность насаждений.

Заключение

Установлены направления трансформации типов леса сосновой формации в связи с изменением климата, что позволило определить «группы риска», к которым, прежде всего, отнесены такие суходольные типы леса, как мшистый, брусничный и вересковый.

На основании прогноза трансформации площадей различных типов леса сосновых насаждений юго-восточной части Белорусского Полесья до 2030 года установлено, что возможно снижение продуктивности, в основном за счет группы суходольных типов леса, в лесном фонде Гомельского ГПЛХО на площади примерно 50 тыс. га. В то же время нарастание «аридности» может способствовать улучшению условий произрастания, прежде всего, за счет черничных (30 тыс. га) и отчасти долгомошных и багульниковых типов леса.

Литература

1. Ловчий, Н.Ф. Экологический анализ структуры и продуктивности сосновых лесов Беларуси / Н.Ф. Ловчий. – Минск : Беларуская навука, 1999. – 263 с.
2. Гельтман, В.С. Географический и типологический анализ лесной растительности Белоруссии / В.С. Гельтман. – Минск : Наука и техника, 1982. – 326 с.
3. Юркевич, И.Д. Леса Белорусского Полесья / И.Д. Юркевич, Н.Ф. Ловчий, В.С. Гельтман. – Минск : Наука и техника, 1977. – 288 с.
4. Юркевич, И.Д. Выделение типов леса при лесоустроительных работах / И.Д. Юркевич. – Минск : Наука и техника, 1980. – 120 с.
5. Рожков, Л.Н. Проблемы воспроизводства сосны в Белоруссии / Л.Н. Рожков // Лесн. и охот. хоз-во. – 2003. – № 2. – С. 6–7.
6. Петров, Е.Г. Экологический режим сосновых биогеоценозов: Березинский биосферный заповедник / Е.Г. Петров и др. – Минск : Наука и техника, 1988. – 160 с.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступило 15.05.12

Производные мелколиственные насаждения от широколиственных лесов Беларуси

М.С. ЛАЗАРЕВА, Л.К. КЛИМОВИЧ, Н.В. МИТИН,
Н.В. МАЛЬЦЕВА, Т.А. КОЛОДИЙ, А.В. КЛИМОВ

В статье представлены результаты исследований зонально-типологических особенностей распространения мелколиственных насаждений, производных от широколиственных лесов Республики Беларусь. Определены площади производных мелколиственных насаждений, возможных для перевода их рубками промежуточного пользования в хозяйственно-ценные широколиственные.

Ключевые слова: широколиственные леса, мелколиственные насаждения, производные насаждения, тип леса.

The article presents the results of research on zonal-typological peculiarities of spreading of small-leaved plantations derived from broad-leaved forests in the Republic of Belarus. There have been defined the spaces of derived small-leaved plantations which can be transferred by tree feelings of temporary use into economically precious broad-leaved.

Keywords: broad-leaved forests, small-leaved plantations, derived plantations, forest type.

Введение

Широколиственные древесные виды являются одними из наиболее ценных в составе лесов Беларуси. Однако площади, занятые ими, меньше потенциально возможных, а такие виды, как ясень, клен, вяз и липа, постепенно исчезают из лесного фонда республики.

Древесные виды, сменяющие дуб, характеризуются следующими биоэкологическими особенностями: способностью возобновления, характером распространения семян, морозостойкостью, засухоустойчивостью, отношением к богатству почвы [1]. Так, у осины выражена корнеотпрысковая способность, обильное плодоношение, дальний разлет семян, морозостойкость, быстрота роста, устойчивость к переувлажнению почвы. Береза – среднетребовательна к богатству и увлажнению почвы, отличается обильным плодоношением и дальним разлетом семян, для этой породы характерно порослевое возобновление, облиствение более раннее, чем у дуба, устойчивость к заболеваниям, быстрый рост в молодом возрасте (до 10–15 лет).

Несмотря на то, что мягколиственные породы часто заглушают дуб, их примесь в дубовых молодняках в определенных соотношениях желательна. Во всех случаях смешанные насаждения дуба устойчивее и продуктивнее чистых по составу, характеризуются высоким качеством древесины не только дуба, но и других твердолиственных пород [2]–[4]. В этой связи установление оптимальных соотношений древесных пород в смешанных насаждениях с учетом их биологических особенностей роста, условий произрастания, полноты является актуальным.

А.М. Кожевников с соавторами [5] отмечали, что в условиях Беларуси снытевые и кисличные березняки, осинники следует рассматривать как производные от дубрав в подзонах грабовых и елово-грабовых дубрав и от дубрав и ельников – в подзоне дубово-темнохвойных лесов. Черноольшаники и грабняки кисличные и снытевые сменили высокопродуктивные дубравы в подзоне грабовых дубрав, сероольшаники в подзоне дубово-темнохвойных лесов сменили ельники и дубравы.

Увеличение производных типов леса влечет за собой диспропорцию в структуре лесного фонда за счет уменьшения коренных дубовых и хвойных насаждений и, в конечном итоге, снижение продуктивности и хозяйственной ценности лесов. Анализ соотношения коренных и производных лесных формаций Беларуси свидетельствует, что последние занимают неоправданно большое участие [5], [6]. Смена пород является в настоящий период одной из основных причин относительно низкой доли площади дубрав в лесах республики.

Объекты и методика исследований

Объектом исследований являются производные от широколиственных мелколиственные насаждения республики, относящиеся к наиболее продуктивным сериям типов мелколиственных лесов (кисличные, снытевые, крапивные, черничные, орляковые и папоротниковые), в которых дуб, ясень, клен и др. могут произрастать по I–II классам бонитета в соответствии с типологией И.Д. Юркевича [7].

Методика исследований базируется на общепринятых лесоводственных, лесотаксационных и биоценологических методах [8]. Анализ экспериментального материала проводился системно [9], [10].

Исследования проводились в разрезе лесорастительных районов: подзона дубово-темнохвойных лесов – Западно-Двинский, Ошмянно-Минский и Оршанско-Могилевский лесорастительные районы, подзона грабово-дубово-темнохвойных лесов – Неманско-Предполесский и Березинско-Предполесский лесорастительные районы, подзона широколиственно-сосновых лесов – Бугско-Полесский и Полесско-Приднепровский лесорастительные районы. Выделение производных насаждений, пригодных для перевода в хозяйственно-ценные, осуществлялось в разрезе ГПЛХО. Соотношение границ лесорастительного районирования с границами административных областей показано на рисунке 1.

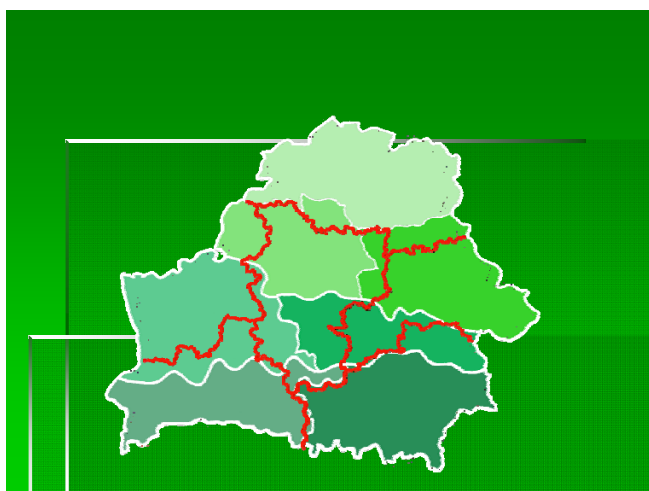


Рисунок 1 – Соотношение границ лесорастительного районирования с границами административных областей

Производные насаждения отличаются большим разнообразием составов, вариантов смешения пород, структурой, полнотой, условиями произрастания и продуктивностью. Для оценки их распространения и состояния нами применялись следующие критерии отбора выделов, подходящих для назначения насаждений путем перевода в хозяйственно-ценные насаждения:

- лесорастительные условия, в которых дуб и другие широколиственные древесные виды достигают I–II классов бонитета – D_{2-4} , серии типов леса – снытевые, кисличные и крапивные;
- наличие в составах производных насаждений широколиственных видов – дуб, ясень, клен, липа, иногда вяз, до 20 лет – от 1 единицы состава, 21–40 – от 2 единиц и старше 41 года – от 3 единиц состава;
- наличие во втором ярусе производных насаждений широколиственных видов – дуб, ясень, клен, липа, иногда вяз, более 5 единиц состава;
- наличие в составе подроста производных насаждений широколиственных видов – дуб, ясень, клен, липа, иногда вяз, в количестве не менее 1,0 тыс. шт./га;
- полнота насаждений 0,7(0,6) и выше в зависимости от возраста.

Результаты и обсуждение

В Беларуси резервом для увеличения доли дубравно-широколиственных групп формаций являются площади производных мелколиственных и грабовых насаждений [11]. Про-

изводные мелколиственные насаждения распространены по всей территории республики, в то время как производные грабовые приурочены, в основном, к югу Беларуси.

Как показали исследования, в среднем встречаемость деревьев дуба в составах производных мелколиственных насаждений (березняки, осинники и ольсы снытевых, кисличных и крапивных типов леса) в Полесско-Приднепровском геоботаническом округе составляет 30%; примерно 20% – в Бугско-Полесском, Ошмяно-Минском и Оршанско-Могилевском, до 15% – в Березинско-Предполесском, Неманско-Предполесском и Западно-Двинском округах. Наличие в составах производных мелколиственных насаждений ясеня, клена, вяза и липы в большей степени отмечено в центральной части республики, 11–17% – в Березинско-Предполесском, Неманско-Предполесском, 7–8% – в Полесско-Приднепровском и Западно-Двинском геоботанических округах, 3% – в Оршанско-Могилевском и 1,4% – в Ошмяно-Минском геоботаническом округе.

Ценотическая роль граба в производных мелколиственных насаждениях наиболее выражена в Полесско-Приднепровском лесорастительном районе.

Граб обыкновенный в Беларуси является компонентом широколиственных (дубовых, ясеневых, липовых), широколиственно-еловых и широколиственно-сосновых или же производных от них мелколиственных лесов, занимающих почвы повышенного плодородия [12]. Граб обычно встречается во втором ярусе елово-грабовых и грабовых дубрав, но при антропогенных локальных сукцессиях формирует производные типы леса. В процессе смены пород значительна роль мелколиственных пород – березы и осины, в результате чего формируются производные березняки со вторым ярусом граба и осиново-грабовые ассоциации [13].

На основании материалов лесоустройства были определены площади грабовых и мелколиственных насаждений, в том числе по породам, в которых могут произрастать широколиственные древесные виды. Спектр условий произрастания включает С₂₋₄ и Д₂₋₄ (снытевый, кисличный, крапивный, черничный, орляковый и папоротниковый серии типов леса).

Установлено, что в лесном фонде Витебского ГПЛХО мелколиственные древесные виды, произрастающие в богатых лесорастительных условиях, составляют 51% лесопокрытой площади, в Брестском, Гомельском, Могилевском и Минском – 31–37% и в Гродненском ГПЛХО – 25%. В лесном фонде Витебского ГПЛХО мелколиственные насаждения занимают 401 тыс. га, Минского – 267, Гомельского – 254, Могилевского – 235, Брестского – 180 и Гродненского 132 тыс. га.

Распространение граба по территории республики неравномерное и имеет зональную обусловленность. Наибольшее распространение граба отмечается по юго-востоку республики на территории Гомельского ГПЛХО: 3,7 тыс. га, в том числе по ГЛХУ «Хойникский лесхоз» – 578 га, ГЛХУ «Василевичский лесхоз» – 396 га, ГЛХУ «Светлогорский лесхоз» – 387 га, ГЛХУ «Петриковский лесхоз» – 350 га. Имеются лесхозы, в которых граб почти отсутствует (ГСЛХУ «Ветковский спецлесхоз» – 12 га).

На территории Брестской области граб занимает 3,4 тыс. га, из них 43% грабняков произрастают в условиях ГЛХУ «Столинский лесхоз» и «Пинский лесхоз». В лесном фонде Минского ГПЛХО граб занимает 2,7 тыс. га и сосредоточен, в основном, в ГЛХУ «Старобинский лесхоз» (718 га), ГЛХУ «Копыльский лесхоз» (676 га) и ГЛХУ «Любанский лесхоз» (401 га). При продвижении на север граб сдает свои позиции. В условиях Гродненского ГПЛХО он встречается преимущественно в районе Новогрудского лесхоза (413 га), Волковысского – 425 га, Щучинского – 252 га и Слонимского лесхозов – 230 га. Общая площадь граба в Гродненском ГПЛХО составляет 1,6 тыс. га. Площадь граба в условиях Могилевского ГПЛХО составляет 960 га, из них 80% насаждений граба встречаются в условиях Осиповичского (483 га) и Бобруйского лесхозов (284 га).

На территории лесного фонда Витебского ГПЛХО граб отсутствует.

В пределах каждого лесхоза проведен анализ распределения площадей мелколиственных насаждений по сериям типов леса. В распределении площадей мелколиственных насаждений по сериям типов леса в разрезе ГПЛХО прослеживается зональная обусловленность (рисунки 2).

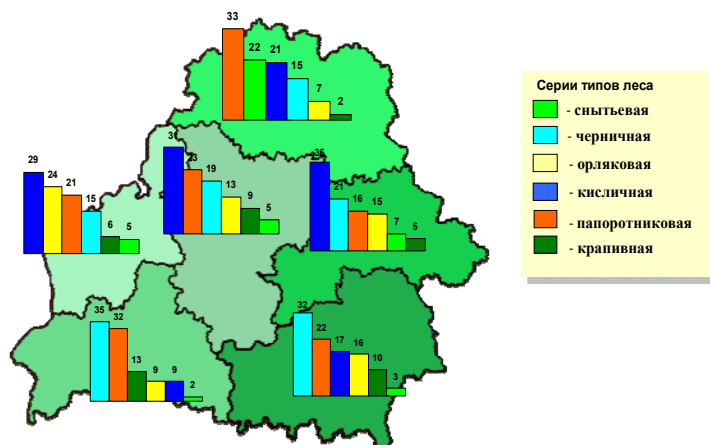


Рисунок 2 – Распределение площадей мелколиственных насаждений по сериям типов леса, %

В южной части республики преобладают черничные (Брестское – 35,1%, Гомельское ГПЛХО – 32,2%) и папоротниковые (Гомельское ГПЛХО – 31,1%, Брестское – 22,0%) серии типов леса. В центральной части республики в силу эдафических факторов преобладание переходит к кисличным сериям типов леса, которые занимают более 82 тыс. га, что составляет 31%. В южной части республики (Брестское и Гомельское ГПЛХО) наиболее продуктивные снытьевые серии типов леса занимают 2–3% лесопокрытой площади (по мелколиственному хозяйству), в то время как по северу республики их доля составляет более 20%.

Установлено, что каждая серия типов леса мелколиственных насаждений характеризуется определенной породной представленностью и в отдельных случаях – зональной обусловленностью.

На рисунке 3а показана породная структура серии черничных типов леса, свидетельствующая о преобладании березняков черничных (90–95%). Аналогичная закономерность отмечается и для серии орляковых типов леса.

В серии крапивных типов леса преобладают черноольшаники крапивные: в северной части республики их доля составляет 80–86%, в центральной части – 72% и в южной – 84% от площади мелколиственных насаждений крапивной серии типов леса.

В серии папоротниковых типов леса преобладают березняки, однако ольха черная также сохраняет ценотическую роль, снижая долю участия по направлению от юго-востока к северу республики. Возрастает доля участия других мелколиственных видов (осина, ольха серая). Так, в южной части республики (Гомельское и Брестское ГПЛХО) площади березняков папоротниковых составляют более 50%, черноольшаников папоротниковых – 45%.

В центральной части республики доля участия березняков папоротниковых увеличивается от 50% площади названной серии типов леса в Гродненском ГПЛХО до 60–64% в Могилевском и Минском ГПЛХО.

Площади черноольшаников изменяются от 30% в Могилевском и Минском до 44% в Гродненском ГПЛХО.

Возрастает ценотическая роль осинников папоротниковых – до 10% (Могилевское ГПЛХО).

В Гродненском ГПЛХО сероольшаники папоротниковые занимают 734 га, что соответствует 3% площади названной серии типов леса.

По северу республики (Витебское ГПЛХО) березняки папоротниковые занимают 66% площади, сероольшаники – 18%, черноольшаники – 12% и осинники – 4%.

В сериях кисличных типов леса в южной части республики (Гомельское и Брестское ГПЛХО) преобладают березняки кисличные, составляя в среднем 67%, присутствуют осинники и черноольшаники кисличные – 13% и 11%, а также грабняки кисличные – 10%. В центральной части республики серии кисличных типов леса на 65% (Гродненское ГПЛХО) и около 75% (Минское и Могилевское) представлены березняками, примерно 20% – осинниками. В Гродненском ГПЛХО доля сероольшаников кисличных составляет 6% площади серии кисличных типов леса.

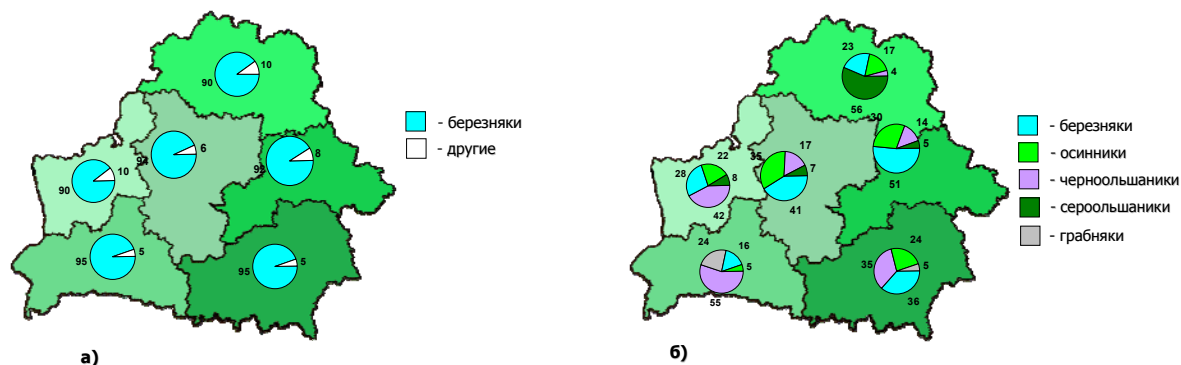


Рисунок 3 – Породная структура мелколиственных лесов Беларуси в разрезе серий типов леса:
а) серия черничных типов леса; б) серия снытевых типов леса

С улучшением лесорастительных условий (серии снытевых типов леса) на всей территории республики возрастает доля участия ольхи черной и серой, осины и граба (на юге) и четче прослеживается зональная обусловленность в их распространении. Из рисунка 3б видно, что в юго-западной части республики площадь черноольшаников снытевых составляет 55% от площади серии снытевых типов леса и постепенно снижается до 4% к северу.

В то же время сероольшаники снытевые в условиях Витебского ГПЛХО занимают 56% площади, в центральной части республики их доля снижается до 5–8%.

Следует отметить, что по северу республики насаждения с преобладанием в составе ольхи серой занимают: от 2% в лесорастительных условиях C_3 до 6% – C_2 , 16–18% – в D_2 , C_4 и более 55% в условиях D_3 .

В целом по республике площадь мелколиственных и грабовых насаждений, произрастающих в оптимальных для широколиственных видов условиях, т. е. серии снытевых, крапивных и кисличных типов леса, составляет более 560 тыс. га.

В богатых лесорастительных условиях мелколиственные насаждения характеризуются большим разнообразием составов, вариантов смешения пород, структурой, полнотой и продуктивностью. Нередко в состав названных выше насаждений входят и широколиственные виды, в зависимости от возраста их доля составляет от 10 до 30%, а иногда и более. Деревья широколиственных видов часто имеют естественное происхождение, следовательно, представляют генетическое разнообразие, свойственное коренным популяциям, и в данных условиях местопроизрастания являются наиболее устойчивыми против неблагоприятных факторов внешней среды.

Установлено, что насаждения, которые рубками промежуточного пользования можно перевести в хозяйственно-ценные, составляют в среднем по республике примерно 7,5% от площади дубравно-широколиственных лесов, в т. ч. в разрезе ГПЛХО (рисунок 3): Витебское – 22% (в скобках указан размах варьирования по лесхозам), Гродненское – 5%, Минское – 11%, Могилевское – 12%, Гомельское – 4% и Брестское – 7% от площади дубравно-широколиственных лесов.

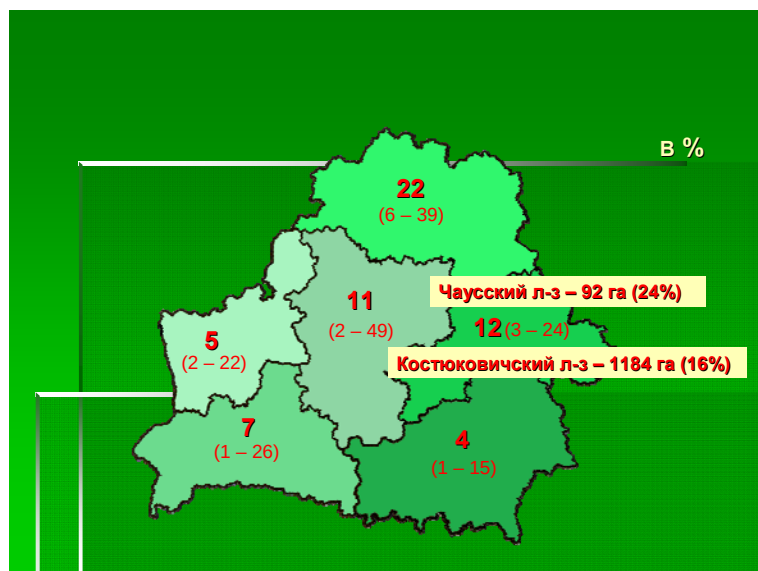


Рисунок 4 – Доля насаждений, возможных для перевода рубками промежуточного пользования в хозяйственно-ценные

Проведена группировка данных в соответствии с упомянутыми выше критериями, просмотрен каждый выдел и лесоводственно-таксационные показатели насаждений, возможных для перевода рубками промежуточного пользования в хозяйственно-ценные, внесены в разработанную базу данных. На рисунке 5 показано окно ввода данных.

Рисунок 5 – Окно базы данных

Установлено, что в лесном фонде Гомельского, Брестского и Гродненского ГПЛХО в производных мелколиственных насаждениях снытевых, кисличных и крапивных серий типов леса на 55–60% площади отмечается присутствие в составах древостоев (от 1 до 3 единиц) дуба, ясеня, клена и других, на 30–40% площади имеется благонадежный подрост целевых пород. Наличие второго яруса из ценных древесных видов (дуб, ясень и др.) в лесхозах Брестского ГПЛХО отмечено на 3,5% площади производных насаждений, Гродненского и Гомельского – на 10–12%.

В лесном фонде Витебского, Минского и Могилевского ГПЛХО в производных мелколиственных насаждениях снытевых, кисличных и крапивных серий типов леса на 40–50% площади встречаются (от 1 до 3 единиц состава) дуб и широколиственные виды, на 30% площади в лесхозах Могилевского ГПЛХО встречается подрост целевых пород, в Минском –

примерно 45%, в Витебском – 53%. Обратная тенденция отмечается по встречаемости целевых пород в составе 2 яруса: Могилевское ГПЛХО – на площади более 20%, Минское – 10% и Витебское – 4%.

Присутствие твердолиственных пород в составе мелколиственных насаждений до 20-летнего возраста по югу республики (в лесном фонде Гомельского и Брестского ГПЛХО), а также в восточной (Могилевское ГПЛХО) и центральной ее части (Минское ГПЛХО) составляет 30–35% от площади производных насаждений регионов. В лесном фонде Гродненского ГПЛХО доля насаждений до 20 лет с участием в составе твердолиственных пород составляет более 55%, а в Витебском – 11%.

Как показали исследования, общая площадь производных мелколиственных и грабовых насаждений республики с наличием дуба и широколиственных пород в составе, 2-м ярусе или в подросте составляет примерно 22 тыс. га, в т. ч. грабовых насаждений – 1,4 тыс. га.

Заключение

В распространении различных серий типов леса по территории Беларуси прослеживается зональная обусловленность. Установлено, что каждая серия типов леса мелколиственных насаждений характеризуется определенной породной представленностью и в отдельных случаях зональной обусловленностью. Серии черничных и орляковых типов леса на 90–95% представлены березняками. В папоротниковых и крапивных возрастает ценотическая роль ольхи черной. С улучшением лесорастительных условий (серии снытевых и кисличных типов леса) на всей территории республики возрастает доля участия ольхи черной и серой, осины и граба (по югу) и четче прослеживается зональная обусловленность в их распространении.

В целом по республике площадь мелколиственных и грабовых насаждений, произрастающих в оптимальных для широколиственных видов условиях, т. е. серии снытевых, крапивных и кисличных типов леса, составляет более 560 тыс. га. Площади мелколиственных насаждений, производных от широколиственных лесов, с наличием дуба, ясеня, клена, вяза и липы в составах древостоя, второго яруса и подроста в целом по республике составляют около 22 тыс. га, что указывает на реальный резерв увеличения площадей дубравно-широколиственных лесов.

Литература

1. Калининченко, Н.П. Дубравы России. Монография / Н.П. Калининченко : сб. трудов. – М. : ВНИИЦлесресурс, 2000. – 536 с.
2. Моисеенко, С.Т. Дубравы БССР и задачи по повышению их устойчивости / С.Т. Моисеенко // Состояние и перспективы дальнейшего улучшения воспроизводства и повышения продуктивности дубрав в Белорусской ССР : тез. докл. научн.-практ. конф. – Минск : Ураджай, 1980. – С. 3–5.
3. Поджаров, В.К. Современное состояние дубрав и пути их восстановления / В.К. Поджаров // Состояние и перспективы дальнейшего улучшения воспроизводства и повышения продуктивности дубрав в Белорусской ССР : тез. докл. научн.-практ. конф. – Минск : Ураджай, 1980. – С. 8–10.
4. Егоренков, М.А. Агротехника создания культур дуба черешчатого / М.А. Егоренков // Состояние и перспективы дальнейшего улучшения воспроизводства и повышения продуктивности дубрав в Белорусской ССР : тез. докл. научн.-практ. конф. – Минск : Ураджай, 1980. – С. 29–30.
5. Кожевников, А.М. Дубравы Беларуси: состояние, проблемы и пути улучшения ведения хозяйства в них / А.М. Кожевников, В.Ф. Решетников, П.В. Колодий // Дуб – порода третьего тысячелетия : сб. науч. трудов ИЛ НАНБ. – Гомель : ИЛ НАНБ, 1998. – Вып. 48. – С. 40–49.
6. Юркевич, И.Д. География, типология и районирование лесной растительности / И.Д. Юркевич, В.С. Гельтман. – Минск : Наука и техника, 1965. – 288 с.

7. Юркевич, И.Д. Выделение типов леса при лесоустроительных работах / И.Д. Юркевич. – Минск : Наука и техника, 1980. – 120 с.
8. Сукачев, В.Н. Основы лесной типологии и биоценологии / В.Н. Сукачев. – М. : Наука, 1972. – Т. 1. – 418 с.
9. Багинский, В.Ф. Лекции по системному анализу для лесоводов / В.Ф. Багинский. – Брянск : БГИТА, 1997. – 157 с.
10. Буш, К.К. Применение системного анализа в лесоведении / К.К. Буш, И.К. Иевинь // Лесоведение. – 1975. – № 1. – С. 15–19.
11. Юркевич, И.Д. Леса Белорусского Полесья (геоботанические исследования) / И.Д. Юркевич, Н.Ф. Ловчий, В.С. Гельтман. – Минск : Наука и техника, 1977. – 288 с.
12. Гельтман, В.С. Географический и типологический анализ лесной растительности Белоруссии / В.С. Гельтман. – Минск : Наука и техника, 1982. – 326 с.
13. Юркевич, И.Д. Грабняки Припятского заповедника / И.Д. Юркевич, А.З. Тютюнов // В кн.: Припятский заповедник. – Минск, 1976. – С. 10–44.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступило 15.05.12

Кадровый состав охотничьего хозяйства Беларуси

А.Е. ПАДУТОВ

В статье рассматриваются вопросы кадрового состава охотничьего хозяйства республики. Показано, что охотничье хозяйство испытывает недостаток кадров высшей квалификации и необходимо изменить систему их подготовки.

Ключевые слова: охота, охотничье хозяйство, кадровый состав высшей квалификации, подготовка специалистов для охотничьего хозяйства.

The article analyzes the staff of the hunting organizations of the Republic. Hunting organizations have few highly qualified specialists. The system of their training should be changed.

Keywords: hunting, hunting organizations, specialists of high qualification, staff education for hunting organization.

Введение

Охота – один из самых древних видов деятельности человека, который на протяжении многих веков давал ему пищу одежду и кров. Не утратила она своего значения и сейчас как один из видов активного отдыха, возможность непосредственного общения с природой. Однако в отличие от прошлого в настоящее время на первый план выдвигается не охота как промысел диких животных, а охотничье хозяйство как система мер, направленных на улучшение охраны, воспроизводства и рационального использования охотничьих ресурсов в интересах общества. Однако рациональное использование охотничьих животных и современное ведение охотничьего хозяйства невозможно без специально подготовленных кадров.

Целью данной работы было провести анализ кадрового потенциала охотничьего хозяйства Беларуси.

Материал и методы исследований

Для проведения анализа использовались материалы годовых отчетов отдельных хозяйств, областных управлений и данные Белстата.

Минимальное количество специалистов высшей квалификации (охотоведов), необходимое для функционирования охотничьего хозяйства, определялось из расчета, что в хозяйстве должен быть хотя бы один охотовед. Необходимо обратить внимание, что это количество минимально необходимых охотоведов. На самом деле, для качественного ведения охотничьего хозяйства их число должно быть значительно больше, особенно в крупных хозяйствах площадью более 40–50 тысяч гектар.

Результаты и обсуждение

Анализ имеющихся материалов показывает, что в 2000-х годах сложилась неоднозначная ситуация в охотничьих хозяйствах с квалифицированным кадровым составом. Даже рассчитанное минимально необходимое количество охотоведов в республике в целом обеспечивалось ориентировочно на 70% (таблица 1). Наилучшее в этом отношении положение наблюдается в лесохозяйственных хозяйствах Управления по особо охраняемым природным территориям при Управлении делами президента Республики Беларусь. Можно считать, что хозяйства этого ведомства полностью обеспечены охотоведами не только по минимальной, но и по реальной необходимости. В охотничьих хозяйствах других ведомств имеется существенный недостаток охотоведов. Особенно заметен недостаток специалистов в хозяйствах РГОО «Белорусское общество охотников и рыболовов» и ОО «Белорусское военно-охотничье общество». Здесь даже минимально необходимая потребность в охотоведах обеспечена не более чем на 40%. В 2010 году ситуация с обеспеченностью охотоведами в хозяйствах несколько улучши-

лась. В целом по Беларуси этот показатель достиг 90% от минимально необходимого. В первую очередь, это произошло за счет хозяйств Белорусского общества охотников и рыболовов.

Таблица 1 – Обеспеченность охотничьих хозяйств охотоведами

Ведомство	Минимально необходимое количество	Наличие	Обеспеченность (%)
2006 год			
РБ	254	183	72
Минлесхоз	80	81	101
РГОО «Белорусское общество охотников и рыболовов»	105	42	40
ОО «Белорусское военно-охотничье общество»	12	2	16,7
РГОО «БФСО “Динамо”»	3	3	100
Управление делами президента Республики Беларусь	9	17	188,9
Прочие	45	38	84,4
2007 год			
РБ	251	179	71,3
Минлесхоз	80	79	98,8
РГОО «Белорусское общество охотников и рыболовов»	105	37	35,2
ОО «Белорусское военно-охотничье общество»	12	2	16,7
РГОО «БФСО “Динамо”»	3	2	66,7
Управление делами президента Республики Беларусь	9	21	233,3
Прочие	42	38	90,5
2008 год			
РБ	252	178	70,6
Минлесхоз	80	78	97,5
РГОО «Белорусское общество охотников и рыболовов»	105	41	39
ОО «Белорусское военно-охотничье общество»	12	4	33,3
РГОО «БФСО “Динамо”»	3	2	66,7
Управление делами президента Республики Беларусь	9	19	211,1
Прочие	43	34	79,1
2009 год			
РБ	255	185	72,5
Минлесхоз	78	78	100
РГОО «Белорусское общество охотников и рыболовов»	104	39	37,5
ОО «Белорусское военно-охотничье общество»	12	3	25
РГОО «БФСО “Динамо”»	3	2	66,7
Управление делами президента Республики Беларусь	9	19	211,1
Прочие	49	44	89,8

2010 год			
РБ	257	238	92,6
Минлесхоз	78	77	98,7
РГОО «Белорусское общество охотников и рыболовов»	104	95	91,3
ОО «Белорусское военно-охотничье общество»	12	4	33,3
РГОО «БФСО “Динамо”»	2	1	50,0
Управление делами президента Республики Беларусь	9	16	177,8
Прочие	52	45	86,5

В то же время наблюдаемое улучшение носит лишь формальный характер. Так, например, доля работающих в хозяйстве охотоведов, имеющих высшее образование, невысока (таблица 2). В целом по Беларуси они составляют в разные годы 50–60%.

Таблица 2 – Кадровый состав высшей квалификации в охотхозяйствах Беларуси

Ведомство	Всего охотоведов	С высшим образованием	% с высшим образованием
2006 год			
РБ	183	104	56,8
Минлесхоз	81	54	66,7
РГОО «Белорусское общество охотников и рыболовов»	42	14	33,3
ОО «Белорусское военно-охотничье общество»	2	2	100
РГОО «БФСО “Динамо”»	3	0	0
Управление делами президента Республики Беларусь	17	12	70,6
Прочие	38	22	57,9
2007 год			
РБ	179	112	62,6
Минлесхоз	79	55	69,6
РГОО «Белорусское общество охотников и рыболовов»	37	15	40,5
ОО «Белорусское военно-охотничье общество»	2	2	100
РГОО «БФСО “Динамо”»	2	0	0
Управление делами президента Республики Беларусь	21	14	66,7
Прочие	38	26	68,4
2008 год			
РБ	178	95	53,4
Минлесхоз	78	48	61,5
РГОО «Белорусское общество охотников и рыболовов»	41	16	39,0
ОО «Белорусское военно-охотничье общество»	4	2	50,0
РГОО «БФСО “Динамо”»	2	1	50,0
Управление делами президента Республики Беларусь	19	12	63,2
Прочие	34	16	47,1

2009 год			
РБ	185	105	56,8
Минлесхоз	78	49	62,8
РГОО «Белорусское общество охотников и рыболовов»	39	20	51,3
ОО «Белорусское военно-охотничье общество»	3	2	66,7
РГОО «БФСО «Динамо»	2	1	50,0
Управление делами президента Республики Беларусь	19	11	57,9
Прочие	44	22	50,0
2010 год			
РБ	238	87	36,6
Минлесхоз	77	37	48,1
РГОО «Белорусское общество охотников и рыболовов»	95	20	21,1
ОО «Белорусское военно-охотничье общество»	4	3	75,0
РГОО «БФСО «Динамо»	1	1	100
Управление делами президента Республики Беларусь	16	9	56,3
Прочие	45	17	37,8

При этом в 2010 году на фоне общего улучшения обеспеченности хозяйств охотоведами резко снизилась среди них доля специалистов высшей квалификации (до 36,6%). То есть по республике в целом более 60% охотоведов, работающих в хозяйствах, а по РГОО «Белорусское общество охотников и рыболовов» около 80% не имеют вообще высшего образования. Кроме того, статистические данные не позволяют провести анализ, какая доля охотоведов имеет не просто высшее образование, а высшее специальное образование. А ведь от этого зависит успешность работы всего хозяйства. Одно дело, если охотовед имеет подготовку как инженер охотничьего хозяйства, и совсем иное, если он имеет, например, высшее гуманитарное образование.

Таким образом, в охотничьем хозяйстве Беларуси, несмотря на внешнюю благополучность, ощущается существенный недостаток кадров высшей квалификации. Все вышеизложенное свидетельствует, что необходима реорганизация системы подготовки и переподготовки кадров для охотничьего хозяйства Беларуси. В настоящее время подготовка кадров высшей квалификации для охотничьего хозяйства в республике осуществляется только в БГТУ. Количество студентов, обучающихся по специальности «инженер охотничьего хозяйства», очень ограничено. По-видимому, одной из мер улучшения ситуации с кадровым потенциалом могло бы быть временное увеличение набора студентов на эту специальность. Кроме того, необходима переподготовка специалистов, уже работающих в должности охотоведов. Для тех из них, кто не имеет вообще высшего образования, такая переподготовка возможна на базе заочного обучения в БГТУ. Для специалистов, имеющих непрофильное высшее образование, достаточно организовать 1,5–2-летние курсы переподготовки с выдачей сертификата об их окончании. Такие курсы можно организовать, как на базе высших учебных заведений, проводящих подготовку специалистов лесного хозяйства, так и на базе системы повышения квалификации при Министерстве лесного хозяйства.

УДК 630*41:630*44

Санитарное состояние древесных насаждений г. Гомеля

А.Е. ПАДУТОВ, М.В. КОЗЯТИНСКАЯ, Н.В. МАЛЫЦЕВА, Т.В. ЕМЕЛЬЯНЕНКО

Впервые проведен анализ санитарного состояния древесных насаждений г. Гомеля. На основании обследования 4094 деревьев на 41 пробной площадке показано, что в целом древесные насаждения города находятся в ослабленном состоянии. Выявлено 36 видов заболеваний и поражений древесных растений в г. Гомеле. Определен ряд причин ослабления насаждений в результате хозяйственной деятельности.

Ключевые слова: городские насаждения, санитарное состояние, раковые и сосудистые заболевания, болезни листьев и хвой, гнили стволов, неинфекционные поражения растений.

The analysis of the sanitary condition of Gomel woody plantations has been carried out for the first time. The survey based on 4094 trees on 41 sample plots showed that in general tree plantations of the city are in a weakened state. There have been identified 36 types of diseases and injuries of woody plants in the city of Gomel, as well as a number of reasons for the deterioration of plantations as a result of economic activity.

Keywords: urban plantings, sanitary condition, cancer and vascular diseases, diseases of leaves and needles, rotten trunks, noncommunicable infection of plants.

Введение

Процессы урбанизации, протекающие активно во всем мире, в том числе и в Республике Беларусь, сопровождаются обострением экологических проблем. В условиях интенсивного загрязнения городской среды растительность является самовозобновляющейся составляющей природного комплекса, нейтрализующей техногенное загрязнение, создающей благоприятные микроклиматические условия. Все компоненты природного комплекса в городах выполняют значимые экологические и социальные функции (санирующие, средообразующие, природоохранные, рекреационные, архитектурно-планировочные и другие). Крупные массивы парков и скверов служат рефугиумами для животных и птиц, повышая биологическое разнообразие урбанизированных территорий.

Экологический потенциал городских ландшафтов во многом детерминирован структурой растительности, ее видовым составом, полнотой, возрастом древостоев, состоянием и устойчивостью их к факторам городской среды. Из основных факторов, определяющих состояние и устойчивость насаждений городов, помимо природных (климатических, фитопатологических), следует отметить интенсивность антропогенных нагрузок на растительность, устойчивость насаждений к факторам городской среды, видовую и возрастную структуру насаждений, их текущее жизненное состояние.

Развитый городской ландшафт имеет и г. Гомель. Общая площадь зелёных насаждений в Гомеле более 2 тыс. га. В городе 11 парков, 60 скверов и 9 бульваров, лесопарки, насаждения санитарно-защитных зон, линейные посадки вдоль улиц и на приусадебных участках. На одного жителя приходится более 40 м² зелёных насаждений общественного пользования. В то же время эти насаждения практически не изучались, и отсутствуют какие-либо данные о структуре насаждений г. Гомеля и их жизненном состоянии.

В связи с этим, целью данной работы было впервые выявить основные группы и виды болезней деревьев и проанализировать общее санитарное состояние зеленых насаждений г. Гомеля.

Материал и методы исследований

Исследования проводились в 2009–2011 годах. Методика исследования, в соответствии с целью работы, была основана, в первую очередь, на закладке пробных площадок. В г. Гомеле была заложена 41 пробная площадка по 100 деревьев в каждой (за исключе-

нием участка № 13 – 110 деревьев, участка № 20 – 59 деревьев, участка № 22 – 119 деревьев, участка № 41 – 106 деревьев) (рисунок 1). В целом, на этих участках обследовано 4094 дерева.

В Центральном районе было заложено 9 участков (всего в данном районе учтено 900 деревьев), 15 участков – в Железнодорожном районе (1506 деревьев), 6 участков – в Новобелицком районе (610 деревьев), 11 участков – в Советском (в учет вошло 1078 деревьев).

Учет деревьев проводился по нескольким критериям, и устанавливались следующие показатели: средний диаметр, степень дехромации, степень дефолиации, категория санитарного состояния по Европейской системе определения санитарного состояния лесов согласно Программе международного сотрудничества по оценке и мониторингу влияния воздушных загрязнений на леса (ICPForest) [1], а также определялись заболевания и повреждения каждого дерева, входящего в учет.

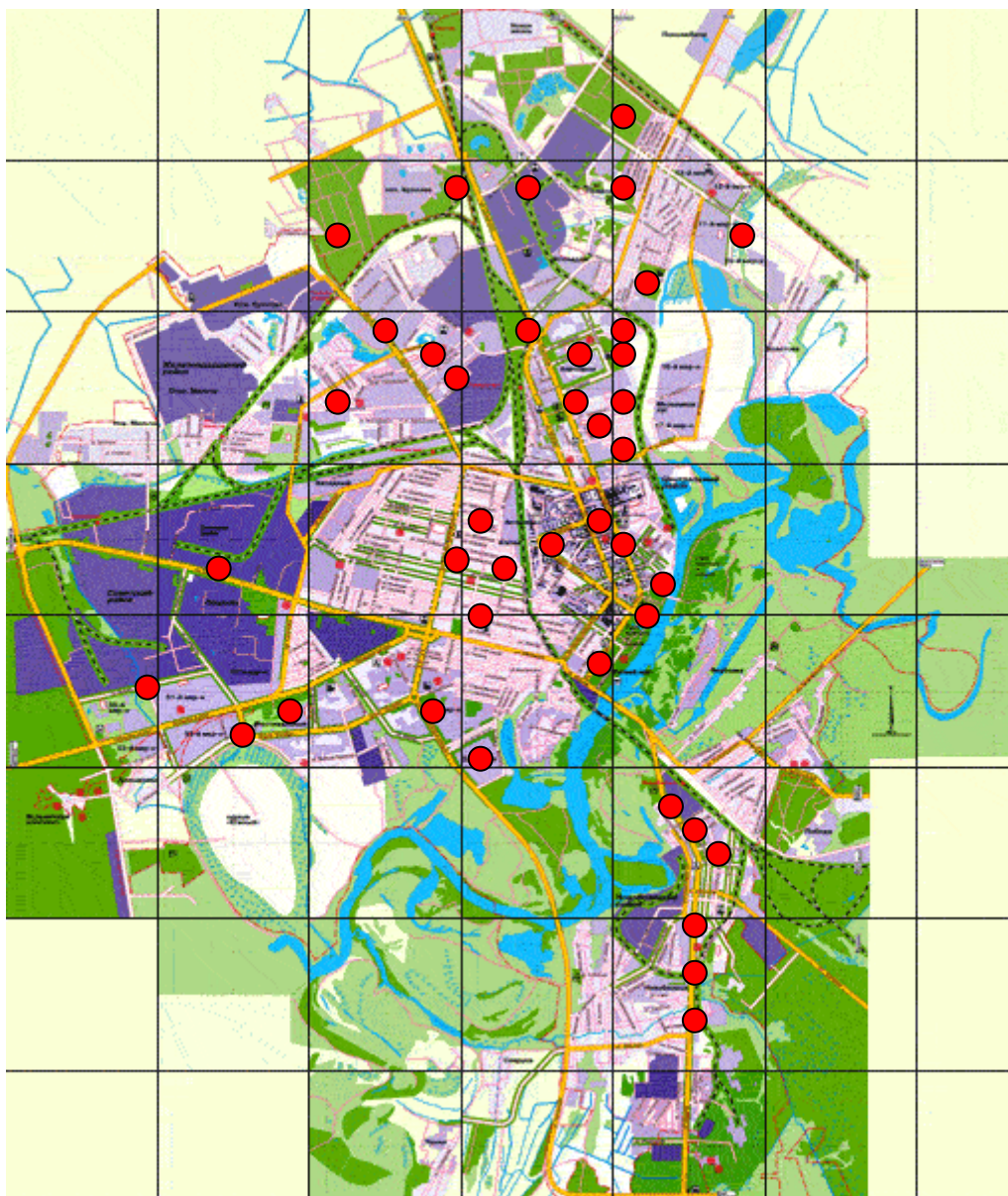


Рисунок 1 – Карта-схема размещения пробных площадок

Категории санитарного состояния насаждений определялись как средневзвешенные величины категорий санитарного состояния деревьев, в него входящих. Нормативы категорий санитарного состояния насаждений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Категории санитарного состояния насаждений

Характеристика насаждения	Индекс санитарного состояния
Здоровые	0–0,5
Ослабленные	0,6–1,5
Сильно ослабленные	1,6–2,5
Отмирающие	2,6–3,5
Сухостой	> 3,6

Для изучения динамики развития краевого некроза листьев каштана конского дополнительно в разных районах г. Гомеля было заложено 13 пробных площадок по 50 деревьев в каждом. Количественные показатели развития некроза определялись через каждые 15 дней.

Выявление видового состава болезней и повреждений древесных растений проводилось не только на пробных площадях, но и в результате визуального осмотра всех остальных зеленых городских насаждений. В этом случае фиксировалось лишь наличие болезни без определения ее количественных показателей.

Определение групп и видов болезней проводилось по их симптоматике с использованием ряда определителей и справочников [2]–[8]. На данном этапе работы микробиологические исследования не проводились и видовой состав возбудителей выявленных видов или групп болезней не определялся, за исключением тех, для которых достаточно симптоматики.

Необходимо отметить, что при наличии в городских насаждениях нескольких родственных видов деревьев (например, берез, кленов, вязов и др.), они не разделялись на отдельные виды, а выделялись как родовая группа (например, береза, клен, вяз, дуб, ель и т. д.).

Результаты и обсуждение

В процессе закладки пробных площадей выявлено 19 родовых групп древесных растений, доля участия которых представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Породный состав деревьев на пробных площадках

Род	Всего деревьев, шт.	% от всего числа деревьев
Береза	357	8,73
Вяз	7	0,17
Граб	1	0,02
Груша	3	0,07
Дуб	9	0,22
Ива	39	0,95
Каштан конский	491	12,00
Клен	1187	28,30
Липа	728	17,78
Орех	5	0,12
Робиния	87	2,12
Рябина	33	0,81
Сирень	1	0,02
Тополь	827	20,20
Ясень	1	0,02
Ель	120	2,93
Лиственница	29	0,71
Сосна	138	3,37
Туя	31	0,76
Итого	4094	100

Из данных таблицы 2 видно, что среди обследованных деревьев в г. Гомеле преобладают клены, тополя и липы.

В результате обследования получены данные по санитарному состоянию отдельных деревьев и выявлены показатели санитарного состояния насаждений отдельно по каждой пробной площади и району.

Санитарное состояние древесных насаждений г. Гомеля изменяется в широких пределах. Имеются среди обследуемых насаждений здоровые насаждения – 19 участков. Древо-стой на одном из участков в районе Гомельского жиркомбината является отмирающим. Остальные обследованные насаждения были ослабленными или сильно ослабленными.

Сводная ведомость санитарного состояния насаждений по районам и городу в целом представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Санитарное состояние насаждений по районам города г. Гомеля

Район	Средний диаметр, см	Индекс санитарного состояния насаждений	Примечания
Центральный	29,71	1,28	Ослабленное
Железнодорожный	29,04	0,82	Ослабленное
Новобелицкий	20,91	1,04	Ослабленное
Советский	32,74	0,38	Здоровое
ИТОГО	28,10	0,88	Ослабленное

Таким образом, установлено, что в наиболее хорошем состоянии находятся насаждения, расположенные в Советском районе. Насаждения в этом районе являются здоровыми (хотя и имеются несколько ослабленных древостоев), а индекс санитарного состояния составляет 0,38. В целом, в городе Гомеле насаждения ослаблены и требуют повышенного внимания к их сохранению.

Кроме оценки санитарного состояния, у каждого дерева определялся вид заболевания. При этом все заболевания и повреждения были разделены на 5 групп: 1) болезни и поражения листьев и хвои; 2) некротические и сосудистые заболевания; 3) раковые заболевания; 4) гнили стволов; 5) различного рода механические повреждения коры (далее – МПК) (таблица 4).

Большинство древесных пород подвержено некротическим и сосудистым заболеваниям. Часто встречаются болезни листьев и раковые заболевания. Анализ вклада отдельных древесных пород в общую сумму заболеваний по группам болезней показывает, что наиболее часто болезни и поражения листьев встречается у каштана конского (60,7% от всех обследованных деревьев). Некротическими и сосудистыми заболеваниями чаще других повреждаются тополя и липы (37,3% и 23,2%). Раковые заболевания (65,1%) и гнили стволов (76,3%) наиболее характерны для тополей. Механические повреждения встречаются практически на всех породах, но особенно часто на кленах (41,5%) и тополях (18,0%). Это вполне объяснимо, поскольку данные породы деревьев одни из самых распространенных в городе Гомеле.

Таким образом, согласно результатам обследования, почти половина (46,3%) всех деревьев на заложённых пробных площадках в г. Гомеле в той или иной степени поражены болезнями. Характер заболеваний здесь различный. Все заболевания, которые были выявлены, можно представить следующим образом:

1. Инфекционные болезни:

1.1. Болезни листьев и хвои – бурая пятнистость листьев каштана; бурая пятнистость листьев берёзы; бурая пятнистость листьев тополя; светло-бурая пятнистость листьев дуба; черная пятнистость листьев клена; мучнистая роса листьев дуба; мучнистая роса листьев клена; чернь листьев липы; парша листьев осины; деформация листьев вяза; побурение хвои ели, пузырчатая ржавчина хвои сосны.

Таблица 4 – Доля деревьев каждого вида, у которых выявлена конкретная группа заболеваний от общего числа деревьев этого вида (в %)

Порода	Болезни и поражения листьев, %	Некротические и сосудистые заболевания, %	Раковые заболевания, %	Гнили, %	МПК, %
Береза	1,40	5,60	–	0,28	1,12
Вяз	–	–	14,28	–	14,28
Граб	–	–	–	–	–
Клен	1,68	11,46	1,26	0,08	6,40
Липа	3,16	38,05	1,92	0,96	3,16
Туя	38,71	41,94	–	–	–
Ива	–	46,15	–	–	5,13
Каштан конск.	38,70	23,62	–	–	3,26
Робиния	–	12,64	1,15	–	3,45
Рябина	3,03	39,39	–	–	18,18
Ель	10,00	37,5	0,83	–	5,83
Дуб	55,55	22,22	–	–	–
Тополь	–	53,73	8,07	3,49	3,97
Лиственница	6,90	27,59	–	–	–
Ясень	–	–	–	–	100
Орех	–	–	40,00	–	–
Груша	–	–	33,33	–	33,33
Сирень	–	–	–	–	–
Сосна	3,16	6,59	–	–	7,24

1.2. Болезни побегов и ветвей – инфекционное усыхание ветвей различного происхождения; сосновый вертун; поражение омой.

1.3. Раковые болезни стволов – опухолево-язвенный рак тополя и осины; ступенчатый рак лиственных пород; бактериальный опухолевый рак лиственных пород; поперечный опухолевый рак дуба; бактериальная водянка березы; наросты разного происхождения.

1.4. Гнили стволов – белая волокнистая гниль (вызванная ложным дубовым трутовином, ложным осиновым трутовином, скошенным трутовином); бурая призматическая гниль (вызванная серно-желтым трутовином).

2. Неинфекционные повреждения:

Среди неинфекционных повреждений деревьев в г. Гомеле наиболее часто встречаются: неинфекционный краевой некроз листьев каштана конского, липы и клена; морозные трещины стволов; изгиб и слом стволов под тяжестью снега; механический обдир коры деревьев; вставания стволов в преграды; огневой опал стволов; вырезание надписей на стволах.

Неинфекционный краевой некроз листьев является самым распространенным видом повреждений листьев в городе. Особенно сильно в Гомеле в 2010–2011 годах были поражены листья каштана конского, лип и кленов. Причиной такого повреждения является недостаток водного баланса, когда интенсивная транспирация воды не компенсируется притоком воды их корневых систем. Это может быть при слабом развитии самих корневых систем, их повреждении в результате земляных работ, истощенности и засоленности почвы, неумеренной обрезки сучьев или обрезки без последующей обработки раны. Особенно усугубилась ситуация с усыханием листьев в городе в последние два года, в связи с аномальной жарой в летний период. Обследование каштановых аллей на 13 пробных площадках (по 50 деревьев на площадке) показало, что доля пораженных листьев практически везде начала резко возрастать после поднятия температуры воздуха свыше 28–30 °С. График развития краевого некроза листьев каштана конского на первой пробной площадке представлен на рисунке 2.

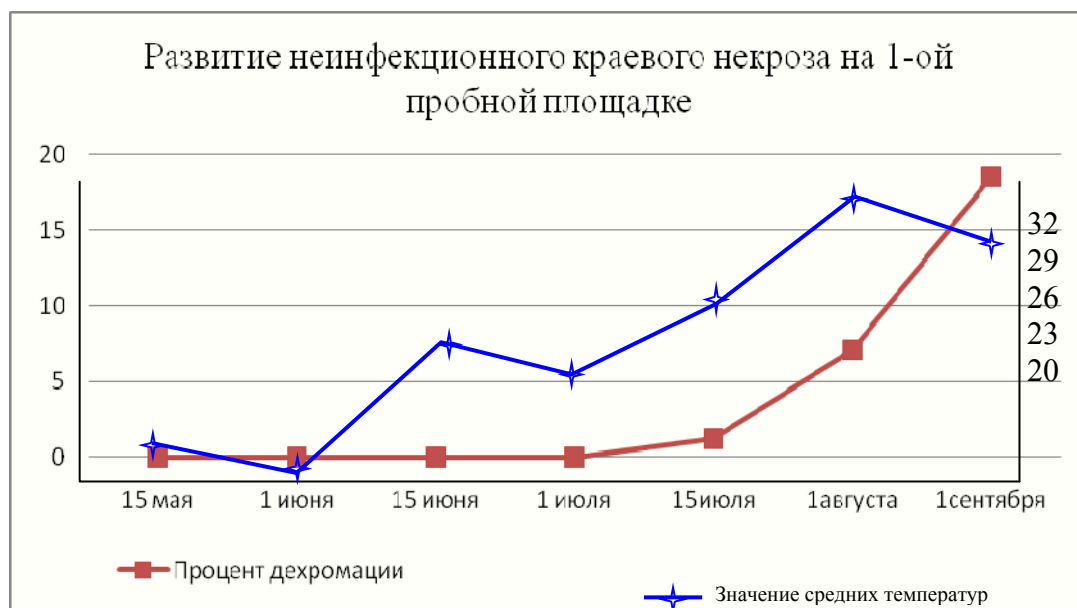


Рисунок 2 – Развитие неинфекционного краевого некроза листьев каштана конского на первой пробной площадке

Аналогичная ситуация наблюдалась и на других пробных площадках, за исключением площадок 3 и 4, где в связи с развитием бурой инфекционной пятнистости листьев каштана дехромация листьев началось раньше (в конце мая).

Среди повреждений стволов антропогенного характера особую роль играют травмы стволов и обдиры коры в результате деятельности механизмов.

Порядок проведения строительных и земляных работ в зоне зеленых насаждений определяется «Правилами по сохранности, сносу и пересадке зеленых насаждений в городах и населенных пунктах Республики Беларусь (Правила 0212.1-99)», утвержденными Приказом Министра природных ресурсов и охраны окружающей среды 29.12.1998 № 400. В разделе 3 этого документа подробно указано, какие мероприятия необходимо проводить для защиты деревьев в процессе строительства, при складировании материалов, при проведении земляных работ. Однако эти требования практически не выполняются, что приводит к повреждению стволов и корней деревьев.

Серьезной причиной деградации насаждений является кардинальная обрезка деревьев с целью формирования их крон во взрослом возрасте. Для изучения этого вопроса были заложены две пробные площади в Железнодорожном районе (микрорайон Старый аэродром, улицы 50 лет БССР, Юбилейная и Малайчука). На первой пробной площади (106 деревьев) ранее была проведена кардинальная обрезка ветвей тополя белого (вначале на высоте 4, а затем на высоте 8 метров). На второй (контрольной) площадке (129 деревьев тополя белого), расположенной рядом, обрезка ветвей никогда не проводилась. В результате выявлено, что на опытном участке (с кардинальной обрезкой стволов) лишь 9,4% деревьев являются здоровыми, а 90,6% – поражены опухолево-язвенным раком тополей. В то же время на соседней (контрольной) площадке 64,6% деревьев оказались здоровыми и только 35,4% поражены опухолево-язвенным раком. Это связано с тем, что при кардинальной обрезке были сильно ослаблены деревья, а необработанные раны стали местом проникновения инфекции.

В процессе обследования городских насаждений выявлена еще одна причина повреждения деревьев в процессе хозяйственной деятельности, ранее не упоминавшаяся в литературе. Это многолетнее повреждение стволов деревьев триммерами и мотокосами при кошении газонов и аллей. В результате образуются раневые язвы, которые сильно ослабляют деревья и являются путем проникновения в дерево опасных раковых и гнилевых инфекций. Особенно это опасно для молодых деревьев и деревьев с тонкой корой таких, как каштан конский, клен, липа.

Таким образом, в результате проведенных исследований определено, что в городе имеются насаждения, относящиеся ко всем категориям санитарного состояния: здоровые; ослабленные; сильно ослабленные и деградирующие. В целом, городские насаждения необходимо охарактеризовать как ослабленные. Выявлено более 30 видов заболеваний и поражений древесных растений в г. Гомеле. В наибольшем количестве встречаются некротические и сосудистые заболевания. Несколько меньше присутствуют раковые заболевания и болезни листвы и хвои. Больше других пород болезнями поражены в городе тополя.

Большое значение в ослаблении городских насаждений имеют причины антропогенного характера. В первую очередь это: травмирование стволов и корневых систем деревьев в результате несоблюдения Правил 0212.1-99 при проведении строительных работ и прокладке подземных коммуникаций; кардинальная обрезка стволов взрослых деревьев; обрезка ветвей без последующей их обработки, травмирование молодых и тонкокорых деревьев триммерами и мотокосами, недостаточный полив древесных растений в летний период.

Литература

1. Пуховский, А.С. Программа-методика организации и проведения работ по оценке и мониторингу влияния воздушного загрязнения на леса / А.С. Пуховский. – Минск : Белгослес, 1994. – 62 с.
2. Груздев, Г.С. Защита зеленых насаждений в городах / Г.С. Груздев, Л.А. Дорожкина, С.А. Петриченко. – М. : Стройиздат. – 541 с.
3. Бондарцева, М.А. Определитель грибов России. Порядок афиллофорные / М.А. Бондарцева. – СПб., 1998. – 391 с.
4. Журавлев, И.И. Определитель грибных болезней деревьев и кустарников / И.И. Журавлев, Т.Н. Селиванов, Н.А. Черемисинов. – М. : Лесная промышленность, 1979. – 247 с.
5. Черемисинов, Н.А. Грибы и грибные болезни деревьев и кустарников. Справочное пособие по определению грибов по растениям-хозяевам / Н.А. Черемисинов, С.Ф. Негруцкий, И.И. Лешковцева. – М. : Лесная промышленность, 1970. – 392 с.
6. Комарова, Э.П. Определитель трутовых грибов Белоруссии / Э.П. Комарова. – Минск : Наука и техника, 1964. – 342 с.
7. Мельник, В.А. Определитель грибов России / В.А. Мельник. – СПб., 2000. – 371 с.
8. Атлас болезней лесных пород Беларуси / О.С. Гапиенко [и др.] ; МЛХ РБ – Минск : ред. журн. «Лесное и охотничье хозяйство», 2011. – 160 с.

УДК 582.28..[630*12..582.475](476-12)

Макромицеты сосновых лесов Юго-Восточной Беларуси в 2011 г.

В.В. ТРУХОНОВЕЦ, Т.И. КОЖЕДУБ, Т.В. ПЕРЕВОЛОЦКАЯ

В статье приводятся данные исследований 2011 года по изучению макромицетов в сосновых лесах Гомельской области. Показана структура макромицетов сосновых лесов, их встречаемость, особенности влияния типа леса на видовой состав грибов.

Ключевые слова: макромицеты, грибы, видовой состав, тип леса.

The article presents the data of the research on study of macromycetes in pine forests of the Gomel region carried out in 2011. It shows the the structure of pine forest macromycetes, their occurrence, special influence of forest type on species composition of fungi.

Keywords: macromycetes, fungi, species composition, forest type.

Введение

Изучение биологического разнообразия макромицетов входит в число приоритетных направлений современной биологии. Важной составляющей таких исследований являются инвентаризация видовой состава грибов, биоценотическая и эколого-географическая их приуроченность.

Грибы-макромицеты встречаются в основном в тех лесах, где существует наиболее благоприятная среда для их развития и распространения. Величину урожая в различных типах леса определяют грибы доминанты, образующие основную биомассу плодовых тел. По видовому разнообразию и суммарному урожаю съедобных грибов сосняки относятся к наиболее продуктивным грибным месторождениям. Сосна образует сообщества с другими породами, а также чистые сосняки, где микроклимат напочвенного покрова отличается от такового в других лесах. Основные площади грибных угодий Южной Беларуси находятся в Гомельской области. Изучение биологического разнообразия грибов, особенностей распределения и формирования трофических групп в лесных экосистемах служат одной из объективных оценок всего биоценоза в целом.

Цель исследований: изучить видовой состав и встречаемость макромицетов в сосновых лесах Юго-Восточной Беларуси.

Методика и объекты исследований

При подборе стационарных объектов использовали «Методику определения запасов плодов дикорастущих ягодных растений и грибов на территории Республики Беларусь» [1]. Проведено изучение материалов по наличию грибоносных площадей и по объемам заготовки дикорастущих грибов в Юго-Восточной Беларуси. Выявлено, что до аварии на Чернобыльской АЭС наибольшее количество грибов заготавливалось (дано в порядке убывания) в Ветковском, Гомельском, Лельчицком и Житковичском районах. В результате радиоактивного загрязнения лесов и способности грибов аккумулировать радионуклиды после чернобыльской аварии заготовка грибов в Ветковском районе была прекращена, в других районах – значительно сокращена. Поэтому для изучения микоценозов в сосновой формации нами были отобраны Гомельский, Милошевичский, Житковичский и Ветковский лесхозы. В данных лесхозах были заложены стационары, пробные площади и трансекты. Площадь стационара составляет 0,25 га, размер – 100 x 25 м. Каждый стационар состоит из 5-ти пробных площадей размером 20 x 25 м. Размер пробной площади в виде трансекты – 10 x 100 м, площадь – 0,1 га. Пробные площади и трансекты закладывались в выделах с вероятным появлением плодовых тел грибов. Такие выдела находили на основании опроса населения, лесной охраны и заготовительных организаций, с учетом биолого-экологических особенностей грибов. Определение вида грибов проводили по карпофорам. Пробные площади оформлялись в на-

туре, наносились на план, привязывались к квартальной сети. На каждой пробной площади описывались основные таксационные показатели – состав насаждения, тип условий место-произрастания, возраст, полнота, бонитет, средний диаметр, высота, подрост, подлесок. В Люденевичском лесничестве Житковичского лесхоза заложено 8 пробных площадей в виде трансект. В Милошевичском лесхозе заложены 2 стационара в Милошевичском и 3 стационара в Тонежском лесничествах в сосняках лишайниковых, вересковых и черничном. В Ветковском лесничестве Ветковского лесхоза заложены 2 стационара, в Терюхском лесничестве Гомельского лесхоза – 3 стационара.

Встречаемость грибов определяли по формуле:

$$B = P_z / P * 100,$$

где B – встречаемость гриба, %; P_z – количество пробных площадей, на которых обнаружен вид гриба; P – общее количество пробных площадей.

Наблюдения за плодоношением проводились в летне-осенний период 2011 года через каждые 10–15 суток. На пробных площадях собирали и взвешивали все виды макромицетов. В период наиболее обильного плодоношения грибов учеты проводили еженедельно. Определение вида грибов проводили по карпофорам. При определении видовой, трофической принадлежности и пищевых качеств макромицетов придерживались положений, изложенных в работе О.С. Гапиенко с соавторами [2]. Основные метеорологические показатели, а именно: среднесуточную, максимальную и минимальную температуру воздуха, количество выпадающих осадков, относительную влажность воздуха – получили в ГУ «Гомельский облгидромет».

Результаты и их обсуждение

В результате исследований, проведенных в 2011 г. в различных типах сосновых лесов Юго-Восточной Беларуси, выявлено 75 видов макромицетов, относящихся к 26 родам, 15 семействам. Ведущими по численности видов в сосновых лесах являются порядки *Cortinariales*, *Russulales* и *Boletales*. Из родов по числу видов выделяются *Russula*, *Lactarius*, *Cortinarius*, *Clitocibe*, *Triholoma* и *Amanita*. Трофические группы грибов представлены микоризными грибами (76,0% от всего количества видов), подстилочными сапротрофами (10,7%), ксилотрофами (8,0%), гумусовыми сапротрофами (5,3%). Наиболее широко представлены съедобные грибы (69,4% от всего количества видов), менее – ядовитые (17,3%) и несъедобные (13,3%). Наибольшее число микоризных видов грибов отмечено в порядках *Cortinariales*, *Russulales* и *Boletales*. В сосновых лесах наиболее часто встречались такие микоризные грибы, как лисичка обыкновенная (встречаемость 57,6%), мухомор красный (33,9%), сыроежка жгучеедкая (33,9%), горькушка (28,8%), мухомор поганковидный (28,8%), черный груздь (18,6%), подберезовик обыкновенный (18,6%), польский гриб (18,6%).

В Житковичском лесхозе в сосняках вересковых собрано 13 видов грибов, в сосняках мшистых – 17 видов. Наиболее часто встречались польский гриб, горькушка, сыроежка жгучеедкая, лисичка обыкновенная, зеленка, масленок поздний, моховик зеленый, свинушка тонкая, мухомор красный, мухомор поганковидный.

В Милошевичском лесхозе в сосняках лишайниковых и вересковых отмечено по 18 видов грибов, в сосняке черничном – 8 видов. При проведении учетов отмечены белый гриб, подосиновик, подберезовик обыкновенный, горькушка, лисичка обыкновенная, желчный гриб, поплавок желтый, мухоморы серо-розовый, красный, поганковидный, пантерный, сыроежки жгучеедкая, желтая, красивая, пищевая, бледная поганка, а также другие виды грибов. Следует отметить значительное участие сосны Банкса в составе исследуемых насаждений в вересковом типе леса.

В Ветковском лесхозе в 40-летнем смешанном сосняке вересковом выявлено 32 вида грибов. Из сыроежек наиболее представлены ломкая, зеленая и пищевая. Встречались также такие виды грибов, как груздь черный, млечник серо-розовый, польский гриб, подгруздок черный, белый гриб, волнушка розовая, желчный гриб, горькушка. В сосняке черничном собрано 16 видов грибов: белый гриб, лисичка обыкновенная, груздь черный, подберезовик

обыкновенный, моховик зеленый, подзеленка, подгруздок черный, сыроежки зеленая, красно-зеленая, жгучеядкая, ломкая, свинушка тонкая, зонтик пестрый, дождевик жемчужный, желчный гриб, мухомор поганковидный.

В Гомельском лесхозе в сосняке мшистом собрано 26 видов грибов, в орляковом – 11 видов грибов. В сосняке мшистом отмечены такие виды, как лисичка настоящая, подберезовик обыкновенный, дождевик жемчужный, масленок поздний, моховик зеленый, млечники серо-розовый и камфорный, горькуша, моховик зеленый, говорушка булавовидная, сыроежки зеленая, красная, желтая, ломкая и пищевая, поплавок желтый, колпак кольчатый, свинушка тонкая, бледная поганка и другие виды грибов. В сосняке орляковом собраны колпак кольчатый, млечник серо-розовый, поплавок желтый, лисичка обыкновенная, горькушка, сыроежки ломкая и пищевая.

В целом можно отметить существенное влияние типа леса на видовой состав грибов. Следует также отметить, что наименьшим видовым разнообразием отличаются однопорodные насаждения. Присутствие в составе соснового древостоя сопутствующих лиственных пород деревьев увеличивает количество видов грибов. Появляются грибы, связанные микоризой с березой, осиной, дубом такие, как подберезовик обыкновенный, волнушка, подосиновик. Учитывая неблагоприятные погодные условия в период плодоношения, исследуемый год следует считать низкоурожайным. Основное плодоношение грибов отмечено после небольших дождей в третьей декаде августа, первой-второй декаде октября. При анализе полученных результатов необходимо учитывать сбор населением грибов, причем сборщики грибов отмечены в очень удаленных кварталах Милошевичского лесхоза (Лельчицкий район) и в загрязненных радиоцезием лесах Ветковского района. При этом в основном собирают лисичку, белый гриб, подосиновик. В 2011 году отмечена высокая червивость грибов. Для сыроежек в некоторые сборы она достигала 100%.

Заключение

В сосновых лесах Беларуси в 2011 году выявлено 75 видов макромицетов, относящихся к 26 родам, 15 семействам. Наиболее широко были представлены съедобные грибы (69,4% от всего количества видов), менее – ядовитые (17,3%) и несъедобные (13,3%). Чаще всего встречались лисичка обыкновенная, мухомор красный, сыроежка жгучеядкая, горькушка, мухомор поганковидный, черный груздь, подберезовик обыкновенный, польский гриб. Наибольшим видовым разнообразием грибов отличались сосняки мшистые, вересковые и лишайниковые, наименьшим – сосняк черничный и сосняк орляковый. Основное плодоношение грибов отмечено после небольших дождей в третьей декаде августа, первой-второй декаде октября.

Литература

1. Методика определения запасов плодов дикорастущих ягодных растений и грибов на территории Республики Беларусь / В.В. Гримашевич // Сборник нормативных документов по вопросам охраны окружающей среды. Вып. 46. – Минск : БелНИЦ «Экология», 2004.
2. Макромицеты, микромицеты и лишайнизированные грибы Беларуси. Гербарий института экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича (MSK-F, MSK-L) / О.С. Гапиенко [и др.] ; науч. редакторы акад. В.И. Парфенов, канд. биол. наук О.С. Гапиенко. – Минск : ИВЦ Минфина, 2006. – 501 с.

Полимерные композитные материалы для защиты биологических объектов от электромагнитных полей и излучений на основе термопластов и биополимеров

В.А. Банный, Л.А. Евтухова, В.А. Игнатенко

Представлены частотные зависимости ослабления (S) энергии нормально падающей плоской электромагнитной волны для образцов РПМ: представляющие листовые и профильные монолитные широкополосные радиопоглотители на основе наполненных термопластов; сформированы радиопоглощающие слоистые пластики, армированные электропроводящими тканями, а также полимерные композитные РПМ, наполненные волокнами или стеклосферами и хитином. Потери энергии в хитинсодержащих пленках носят диэлектрический и интерференционный характер. С увеличением толщины материала до 10 мм значение ослабления возрастает.

Ключевые слова: хитин, радиопоглотители, электромагнитная волна, композитные материалы.

The article shows the frequency dependence of attenuation (S) energy of normally incident plane of electromagnetic wave for the absorber samples: representing the monolithic sheet and profile-based broadband radiation absorbers based on thermoplastics, there have been formed radiation absorbing laminates reinforced with conductive fabrics, as well as polymer composite absorbers filled with glass spheres and fibers or chitin. Energy losses in chitin films are dielectric and interferential in nature. With the increase in material thickness up to 10 mm the attenuation increases.

Keywords: chitin, radiation absorbers, electromagnetic wave, composite materials.

Введение

Одним из негативных последствий технического прогресса является постоянное повышение уровня электромагнитного загрязнения окружающей среды. К естественному фоновому радиоизлучению добавились новые источники электромагнитного излучения (ЭМИ): системы навигации и радиолокации, сотовая и спутниковая связь, радиотехнические установки, бытовая и медицинская радиотехника и др. Во многих из этих технических систем используется энергия электромагнитных волн сверхвысоких частот (СВЧ), охватывающая полосу радиочастот от 3 до 30 ГГц.

Воздействие электромагнитного излучения на биологические и технические объекты является существенным фактором, влияющим на их жизнедеятельность и функционирование. Биовоздействие имеет наиболее серьезные последствия в диапазоне микроволн – деци-, санти- и миллиметровой длины [1]. Поскольку в настоящее время значительно возросло количество разнообразных источников ЭМИ и расширяется используемый частотный диапазон, то актуальной является проблема защиты от воздействия электромагнитных сигналов в широкой полосе частот. При разработке материалов, поглощающих энергию ЭМИ, большое внимание уделяется доступности и дешевизне компонентов. Одним из таких компонентов является хитин – наиболее распространенный в природе полисахарид. По химическому строению хитин напоминает другой природный биополимер – целлюлозу, из которой построены твердые оболочки клеток растений, некоторых грибов и бактерий. Гораздо меньше известно, что он входит в состав грибов. Грибы – отнюдь не растения, а нечто, сочетающее в себе фундаментальные свойства как растений, так и животных. Хитин – своего рода «животная» целлюлоза. Для такой аналогии есть и биохимическое обоснование: глюкозные остатки хитина несут нехарактерную для растительной целлюлозы ацетамидную группу. Она-то и придает хитину уникальные свойства. Впервые хитин выделили из грибов, точнее – из мухомора, и назвали фунгином (от латинского *fungus* – гриб). Позже фунгин нашли в надкрыльях майского жука и переименовали в хитин (от «хитона» – древнегреческой верхней одежды).

Во время первой мировой войны дела с продовольствием в Германии обстояли неважно и в ход пошли жиры даже из низших грибов. Остававшийся хитин бережливые немцы

не выбрасывали, а обрабатывали щелочью и получали хитинксантогенат, который затем использовали в текстильной промышленности для изготовления особо прочных нитей. В природе хитина не меньше, чем целлюлозы: и того, и другого полимера примерно по 100 миллиардов тонн, эти запасы возобновляемые, если относиться к ним по-хозяйски. Главный источник целлюлозы – высшие растения, т. е. древесина, которую легко добывать и культивировать, а источники хитина в лесах и других системах – низшие и высшие грибы. И хотя с грибами работать легче, настоящие, получающие реальную прибыль заводы по производству хитина и его производных работают исключительно на морском сырье (крабы, водоросли и насекомые). Такие заводы есть в США и Японии, кое-что аналогичное пытались наладить на Дальнем Востоке РФ.

По сравнению с другими организмами – производителями хитина – грибы быстрее растут, и накопление их биомассы не зависит от сезона и капризов погоды. Выращивать их можно на сравнительно дешевых субстратах, например, жидких отходах целлюлозно-бумажной промышленности, крахмалсодержащих отходах пищевой промышленности и т. п. Кроме того, при микробиологическом производстве лимонной кислоты, антибиотиков и многих других полезных веществ остается грибная биомасса, которую можно приспособить для получения хитина.

Цель работы состояла в исследовании закономерностей взаимодействия ЭМИ СВЧ-диапазона нетепловой интенсивности с биологическими объектами, а также композитными материалами на основе полиэтилена (ПЭ), выполняющими функции электромагнитного экрана (ЭМЭ) в оценке эффективности хитина и в качестве компонента полимерных композитных материалов, поглощающих энергию ЭМИ СВЧ-диапазона.

Методика исследований

Объектами служили клетки микроорганизмов: *Saccharomyces cerevisiae* (ГОСТ 171-81), яйца непарного шелкопряда (*Lymantria Dispar* L); пленочные, листовые композитные материалы на основе ПЭ (ГОСТ 16337-77, ГОСТ 16803-070). В качестве наполнителя использованы дисперсные карбонильное железо (КЖ, ТУ 6-09-300-78) и хитин ($d \geq 315$ мкм), а также дисперсный магнитно-мягкий феррит (ММФ, ТУ 6-09-5111-84, марка 2500 НМС, размер частиц не превышает 200 мкм), карбонильное железо (ТУ 6-09-300-78). ПЭ-связующее вещество смешивали с наполнителем и подвергали гранулированию на установке, снабженной двухшнековым экструдером.

Гранулят перерабатывали в листовые конструкционные поглотители с использованием типовых технологий формирования изделий из термопластов. Пленочные и листовые монолитные материалы формировали методами «горячего» прессования и литьем под давлением.

Параметры ослабления (S) энергии СВЧ-излучения, проходящего через исследуемые пробы и образцы композитов, оценивали рефлектометрическим методом в диапазоне частот 2–27 ГГц при нормальном падении электромагнитной волны – в волноводных трактах измерителей (Р2-50; Р2-60; Р2-61; Р2-65; Р2-66) КСВ_н и ослабления. Метаболические процессы в клетках оценивали стандартным методом микробиологического тестирования.

Результаты исследований и их обсуждение

Сложное строение биологических клеток, состоящих из слоистых диэлектрических мембран, клеточной электролитической среды, ячеистого ядра, обуславливает диэлектрические потери энергии ЭМИ и ее интерференционное рассеяние на границах мембран и других структурных неоднородностях. Не менее важным фактором избирательного воздействия СВЧ-излучения на исследуемые биообъекты является наличие в мембранах клеток и кутикуле радиопоглощающего вещества – хитина. Специфические структура, физико-химические свойства кутикулы шелкопряда и значительная концентрация в ней хитина (до половины сухого веса) создают условия поглощения энергии ЭМИ. Экспериментально установлено, что при взаимодействии нетеплового СВЧ-излучения и клеток микроорганизмов *Saccharomyces cerevisiae* метаболизм клеток не оказывает влияния на способность этих клеток к радиопоглощению. Это расширяет возможности применения биополимеров в качестве компонентов

ЭМЭ. Показана возможность использования биомассы и хитина в качестве компонентов биоразлагаемых радиопоглощающих материалов (РПМ) [2], [3].

Защита от радиочастотных ЭМИ с использованием металлических экранов не во всех случаях является эффективной. Не удастся избежать дифракционных и интерференционных явлений при облучении. Глубина проникновения ЭМИ в вещество (скин-эффект) зависит от электропроводности этого вещества и частоты радиоволн. Однако, проникая в проводящее вещество, ЭМИ индуцирует в нем токи Фуко, которые могут стать причиной мощных наводок даже в идеально экранированных электронных схемах. Видно, что для электромагнитной защиты целесообразно применять ЭМЭ поглощающего типа.

Среди широкой номенклатуры РПМ свою нишу занимают материалы на основе наполненных термопластов, в частности ПЭ [4]. Они привлекают технологичностью и малой удельной массой. Изготовлены листовые и профильные монолитные широкополосные радиопоглотители на основе наполненных термопластов; сформированы радиопоглощающие слоистые пластики, армированные электропроводящими тканями, а также полимерные композитные РПМ, наполненные волокнами или стеклосферами. Результаты радиофизических измерений для некоторых образцов РПМ представлены на рисунке 1.

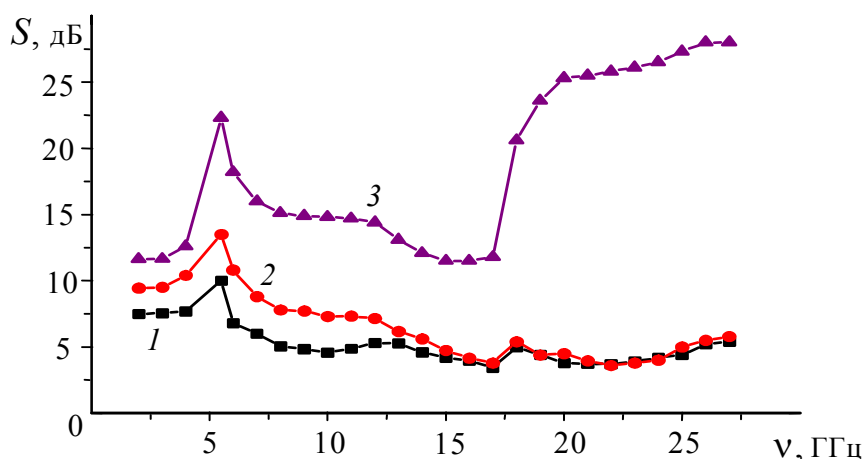


Рисунок 1 – Частотные зависимости ослабления (S) энергии нормально падающей плоской электромагнитной волны для образцов РПМ толщиной 3 мм

Состав образцов: 1 – ПЭ + ММФ (50% масс, $d = 50 \dots 200$ мкм); 2 – ПЭ + ММФ (50% масс, $d = 50 \dots 200$ мкм) + стеклосферы (10% масс, $d = 200 \dots 500$ мкм); 3 – ПЭ + ММФ (50% масс, $d = 50 \dots 200$ мкм) + углеродная ткань Бусофит ТР 3/2.

Таким образом, в совокупности средств радиозащиты свою нишу занимают РПМ и ЭМЭ на основе наполненных термопластов. РПМ являются одним из эффективных средств решения проблем электромагнитной безопасности и совместимости радиоэлектронных систем, а также призваны обеспечить современные требования электромагнитной экологии. В практике создания средств защиты от техногенных ЭМИ природный хитин, наряду с другими функциональными наполнителями, может быть использован как компонент композиционных РПМ.

Хитин широко распространен в природе и занимает среди биополимеров второе по значению место после целлюлозы. Хитин является структурным материалом экзоскелета членистоногих (насекомых, ракообразных и др.), моллюсков и ряда морских организмов, нематод, содержится во многих грибах. Хитин представляет собой линейный полисахарид, неразветвленные цепи которого состоят из элементарных звеньев 2-ацетоамидо-2-дезоксид-Д-глюкозы, соединенных 1,4-в гликозидными связями [5].

С помощью оптической микроскопии исследованы структура и размеры частиц хитинового наполнителя. На рисунке 2 представлено микроскопическое изображение частиц хитина в водной среде. Видна слоистая структура хитина, что указывает на его способность к пленкообразованию.

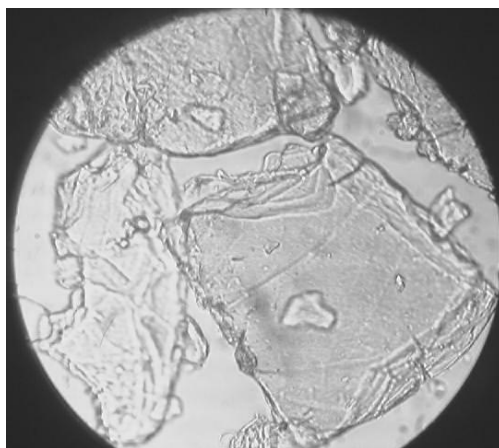


Рисунок 2 – Оптико-микроскопическое изображение частиц хитина в воде (увеличение 320 крат)

На рисунке 3 представлены измеренные радиофизические характеристики хитинсодержащих материалов (пленочные образцы толщиной 1 мм и образцы прямоугольного сечения 23 x 10 мм толщиной 10–14 мм), изготовленных методом термического прессования ($P = 2$ МПа, $T = 160$ °С) из смесей порошкообразного ПЭ и хитина.

Низкие значения ослабления энергии ЭМИ объясняются малой толщиной пленки, но они соизмеримы с величинами S для ПЭ пленок, содержащими в качестве наполнителя КЖ (при одинаковой степени наполнения 50% масс) [6]. В отличие от пленок, наполненных КЖ, где ослабление энергии ЭМИ вызвано магнитными и омическими потерями, связанными с высоким значением магнитной проницаемости наполнителя, потери энергии в хитинсодержащих пленках носят диэлектрический и интерференционный характер [7]. С увеличением толщины материала до 10 мм значение ослабления возрастает.

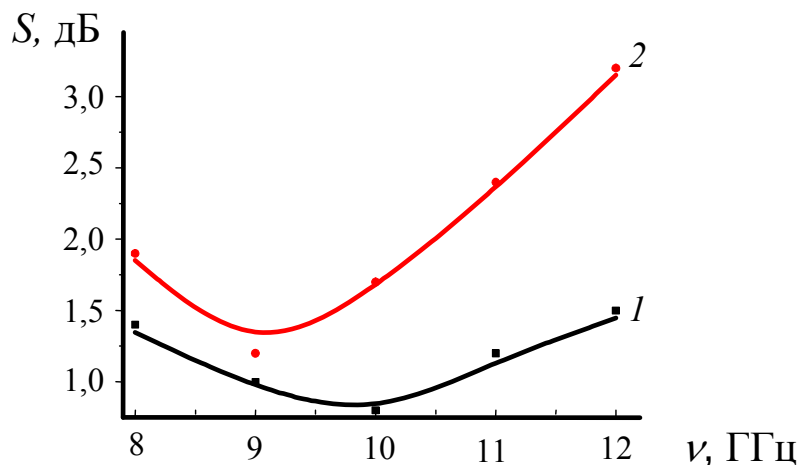


Рисунок 3 – Частотные зависимости ослабления S энергии ЭМИ, нормально падающего на образцы листовых пленочных СВЧ-поглотителей

Состав образцов листовых пленочных СВЧ-поглотителей: ПЭ + хитин (50% масс). Толщина образца: 1 – 1 мм; 2 – 10 мм.

Заключение

Особенности строения хитина и комплекс присущих ему свойств (биоразлагаемость, радиопоглощающая, сорбционная и структурообразующая способности, склонность к волокно- и пленкообразованию и др.) создают благоприятные предпосылки его практического приложения в различных областях техники. В частности, хитин представляет интерес как наполнитель полимерных композитных материалов, поглощающих энергию СВЧ-излучения.

Литература

1. Исмаилова, Г.Э. Биофизическое действие микроволн / Г.Э. Исмаилова, Э.Ш. Эсмаилов // Электромагнитные поля. Биологическое действие и гигиеническое нормирование : материалы междунар. совещ. – М., 1998. – С. 347–354.
2. Банний, В.А. Взаимодействие СВЧ-излучения нетепловой интенсивности с культурой дрожжевых клеток / В.А. Банний, А.В. Макаревич, Д.А. Орехов // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2002. – № 5. – С. 102–105.
3. Ермолович, О.А. Хитин как функциональный наполнитель композиционных полимерных материалов / О.А. Ермолович, В.А. Банний, А.В. Макаревич // Материалы, технологии, инструменты. – 2005. – Т. 10. – № 2. – С. 58–60.
4. Банний, В.А. Радиопоглощающие материалы на основе наполненного полиэтилена / В.А. Банний, И.В. Царенко // Вестник Гомельского государственного университета им. П.О. Сухого, 2009. – № 4(39). – С. 3–8.
5. Хитин и хитозан: получение, свойства и применение / под ред. К.С. Скрябина. – М. : Наука, 2002. – 368 с.
6. Банний, В.А. Взаимодействие радиоволн СВЧ диапазона с полимерными гетерогенными системами и разработка электромагнитных экранов на основе полиэтилена : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.07 / В.А. Банний. – ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси. – Гомель, 2005. – 132 с.
7. Банний, В.А. Взаимодействие СВЧ-излучения с полимерным композитным электромагнитным экраном: физические модели и эксперимент / В.А. Банний, В.А. Гольдаде, Л.С. Пинчук // Материалы, технологии, инструменты. – 2008. – № 2. – С. 45–51.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступило 15.05.12

УДК 574.2:53.082.9:550.837.3

Генотоксическое действие ЭМИ диапазона мобильной связи (900 МГц)

В.С. СТЕЛЬМАХ, Г.А. МЕДВЕДЕВА, Д.Н. ДРОЗДОВ

В работе проведена оценка генотоксического действия электромагнитного поля дотепловой интенсивности *in vivo* на частоту микроядер в полихроматофильных эритроцитах костного мозга. В ходе эксперимента было установлено, что между контрольной и экспериментальной группой достоверное различие наблюдается на первом этапе эксперимента (30 сутки), после чего достоверного различия в группах выявить не удалось. Электромагнитное излучение диапазона мобильной связи стандарта GSM при времени экспозиции 30 суток увеличивает частоту микроядер в клетках костного мозга в 1,7 раз.

Ключевые слова: генотоксическое действие, микроядро, ЭМИ, электромагнитные поля, эритроциты.

The article presents the estimation of genotoxic action of an electromagnetic field of pre-heat intensity *in vivo* on frequency of micronuclei in polychromatophilous erythrocyte in a bone brain. During the experiment it was established that between control and experimental groups the authentic distinction is observed at the first stage of experiment (30th day) then the authentic distinction in groups was not possible to reveal. Electromagnetic radiation of a range of mobile connection of GSM standard at a 30-day time of exposition increases the frequency of micronuclei in a bone brain in 1.7 times.

Keywords: genotoxic action, micronucleus, EMR, electromagnetic fields, erythrocytes.

Введение

Электромагнитное излучение прочно вошло в современную жизнь человека. Беспроводные технологии стали неотъемлемым атрибутом жизни и молодежи, и взрослого населения, городских и сельских жителей. В результате под влиянием электромагнитного поля радиочастотного диапазона современный человек, в той или иной мере, находится постоянно. И это нельзя недооценивать, поскольку использование электромагнитного излучения радиочастотного диапазона, которое излучают современные мобильные средства связи, обладает целым рядом характерных особенностей. С.И. Бобраков (2001), М.Ю. Маслов (2002), Ю.Г. Григорьев (2005, 2010) выделяют следующие особенности: круглосуточное хроническое облучение происходит на максимальном приближении, частота и продолжительность воздействия контролируется пользователем, воздействию ЭМП РЧ подвергается не только сам пользователь, но и окружающие его люди. Такое воздействие может не только негативно сказаться на функциях органов, но и вызывать генетические изменения в клетках, обладая, таким образом, генотоксическим действием [1].

Согласно литературным данным [2], повреждение генетического материала может происходить путем активации ряда процессов: образование свободных радикалов (окислительный стресс), микротермальные эффекты в клеточных структурах (экспрессия генов теплового шока), воздействие на ДНК-репарационные механизмы. К настоящему времени опубликовано большое количество работ по оценке генотоксического действия неионизирующих электромагнитных полей, в большинстве которых не выявлено неблагоприятных эффектов или получены противоречивые результаты [3], [4], [5]. Однако работы, в которых было выявлено повышение частоты злокачественных новообразований головного мозга у пользователей сотовых телефонов, не позволяют снять вопрос о возможном генотоксическом действии неионизирующих электромагнитных полей [6].

При поддержке Европейского Союза в рамках проекта «REFLEX» (2000–2004 гг.) были проведены совместные исследования 12-ю научными группами, направленные на оценку биологического действия радиочастотных ЭМП РЧ *in vitro* (на субклеточном и клеточном уровнях) с использованием стандартизованных методологических подходов. Результаты этих исследований позволили прийти к следующим выводам:

- ЭМП РЧ (1800 МГц) индуцирует генотоксические эффекты, а именно одонитевые и двунитевые разрывы ДНК, и приводит к повышению частоты микроядер в клетках HL-60;
- ЭМП РЧ при воздействии с SAR 2 Вт/кг приводит к повышению частоты хромосомных aberrаций в культуре фибробластов человека и нарушению репарации ДНК.

Несмотря на существование множества гипотез о механизмах действия электромагнитного излучения диапазона мобильной связи на молекулярном и клеточном уровнях организации живых систем, до сих пор отсутствует целостная концепция, способная с единых позиций объяснить эффекты и механизмы действия ЭМИ на многоклеточный организм в целом. В связи с этим представляется актуальным проведение модельного эксперимента по изучению действия ЭМП РЧ на систему крови млекопитающих для изучения действия ЭМИ диапазона мобильной связи на геном соматических клеток.

Целью данной работы являлась оценка возможного генотоксического действия электромагнитного поля дотепловой интенсивности *in vivo* и определение частоты микроядер в полихроматофильных эритроцитах костного мозга.

Методика исследований

Метод предложен независимо Heddle и Schmid в начале 70-х годов. Сущность феномена состоит в том, что во время деления клеток ацентрические фрагменты хромосом и оставшие хромосомы, не вошедшие в дочерние ядра, формируют в цитоплазме клеток одно, реже два ДНК-содержащих образования, получивших название микроядер (МЯ). Кроме того, возникновение микроядер может быть результатом обособления фрагментов обменов хромосомного типа (нестабильная транслокация), или образованию МЯ способствует нарушение функции ахроматинового веретена при разъединении хромосом в анафазе.



Рисунок 1 – Формирование микроядер в делящейся клетке

Таким образом, учет частоты клеток с микроядрами указывает на цитогенетическую активность изучаемого фактора. Самый надежный результат дает анализ МЯ в созревающих эритроцитах костного мозга – полихроматофильных эритроцитах (ПХЭ). Дифференциальное окрашивание позволяет легко отличить эти недавно прошедшие митоз клетки от зрелых эритроцитов.

Исследование выполнено на неполовозрелых белых беспородных крысах-самцах стадного разведения (возраст на момент начала эксперимента – 1 месяц). Все животные, содержавшиеся в типовых условиях, были разделены на 2 группы: интактные животные (контроль) и животные, которые в дневное время подвергались воздействию переменного электромагнитного излучения диапазона мобильной связи (897,2 МГц, 35-й канал, 0,2–0,3 мВт/см²; источник излучения – установка, имитирующая сигнал мобильного телефона в режиме разговора, вместо речи использовали модулированный по стандарту GSM псевдослучайно сгенерированный шум, предварительно сглаженный по Гауссу) ежедневно по 8 часов в день (16 30-минутных фракций с 5-минутными интервалами) непрерывно на протяжении 60 суток. Животные выводились из эксперимента сразу после 1, 2 месяцев облучения и на 3, 7, 14 и 28-е сутки после окончания облучения.

Материалом исследования служили клетки костного мозга. Для получения суспензии клеток костного мозга бедренную кость промывали 5 мл раствора Хэнкса без фенолового

красного, содержащего 10% сыворотки, 0,5% раствор антибиотиков (Antibiotic/antimicotik cocktail, Sigma) и гепарин (2,5 Ед/мл). Уровень микроядер в полихроматофильных эритроцитах костного мозга определялся по стандартной методике с использованием метанольной фиксации и окраски Гимза [7].

Статистическая обработка результатов исследования проведена с использованием элементов дискриптивного и дисперсионного анализа. Для оценки достоверности различия частоты микроядер на 1000 клеток использовался параметрический (критерий Стьюдента) метод статистики. За величину уровня статистической значимости различий принимали $p \leq 0,05$. Статистическая обработка данных проводилась с помощью пакета прикладных программ Statistica 6.0.

Результаты исследований и их обсуждение

С помощью светового микроскопа проводился подсчет полихроматофильных эритроцитов и клеток с микроядрами. Оценка проводилась при помощи метода подсчета микроядер на 1000 клеток в контрольной и экспериментальной группе. На рисунке 2 представлена фотография полихроматофильного ретикулоцита без микроядра (слева) и ретикулоцита с микроядром (справа).

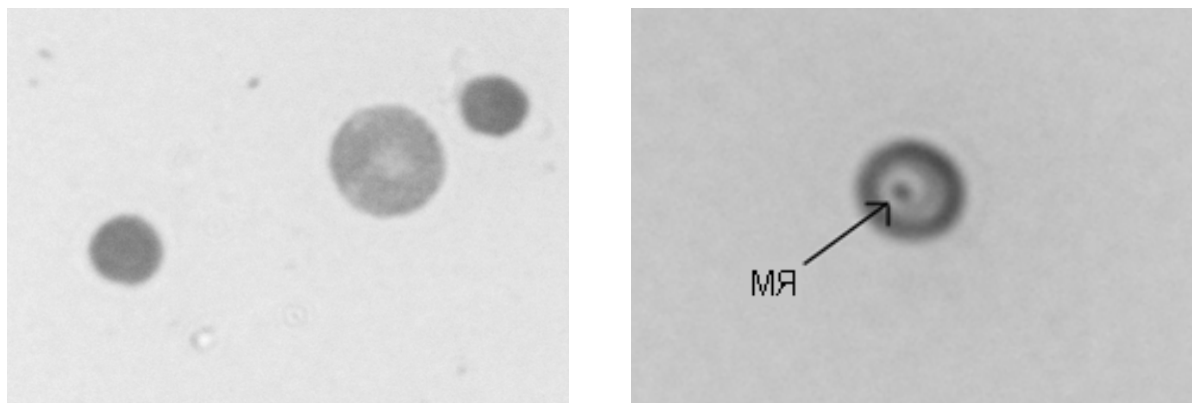


Рисунок 2 – Полихроматофильные ретикулоциты

В ходе исследования было установлено, что средняя частота микроядер как в контрольной, так и в группе облученных животных не превысила 3 микроядра на 1000 клеток, что не превышает спонтанный фоновый уровень появления микроядер в ретикулоцитах. Несмотря на отсутствие достоверных отличий в содержании ядерных клеток в костном мозге и экспериментальной группе животных, повышение коэффициента вариации показателя у облученных животных свидетельствует о запуске механизмов ответного реагирования на данный стресс-фактор. Полученный результат согласуется с работой [1]. В таблицах 1 и 2 приведены результаты, полученные в контрольной и экспериментальной группе.

Таблица 1 – Уровень микроядер в полихроматофильных эритроцитах костного мозга в контрольной группе

Частота микроядер на 1000 клеток, %					
30-е сутки	60-е сутки	63-е сутки	67-е сутки	74-е сутки	90-е сутки
0,2	0,2	0,4	0,3	0,4	0,4
0,2	0,2	0,3	0,2	0,1	0,3
0,2	0,4	0,3	0,2	0,4	0,4
0,2	0,1	0,2	0,1	0,3	0,3
0,3	0,2	0,4	0,3	0,2	0,7
0,3	0,3	0,3	0,4	–	0,3

Таблица 2 – Уровень микроядер в полихроматофильных эритроцитах костного мозга в экспериментальной группе

Частота микроядер на 1000 клеток, %					
30-е сутки	60-е сутки	63-е сутки	67-е сутки	74-е сутки	90-е сутки
0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,4
0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,5
0,6	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2
0,5	0,4	0,2	0,6	0,2	0,1
0,5	0,1	0,5	0,4	0,4	0,3
0,6	0,2	0,2	0,2	0,3	0,6

Значение коэффициента вариации в экспериментальной группе более чем в 1,5 раза превышает варьирование в контрольной группе. Кроме того, значение коэффициента вариации в контрольной группе нарастала от 20% до 40%, а в экспериментальной группе – от 40% до 55%.

Частота клеток с микроядрами в костном мозге облученных ЭМИ животных достоверно возрастает на 30-е сутки, среднее значение в контрольной группе $0,23 \pm 0,02$, в экспериментальной группе – $0,45 \pm 0,07$. На рисунке 3 представлена динамика частоты ПХЭ с микроядрами в контрольной и экспериментальной группе на разных этапах эксперимента.

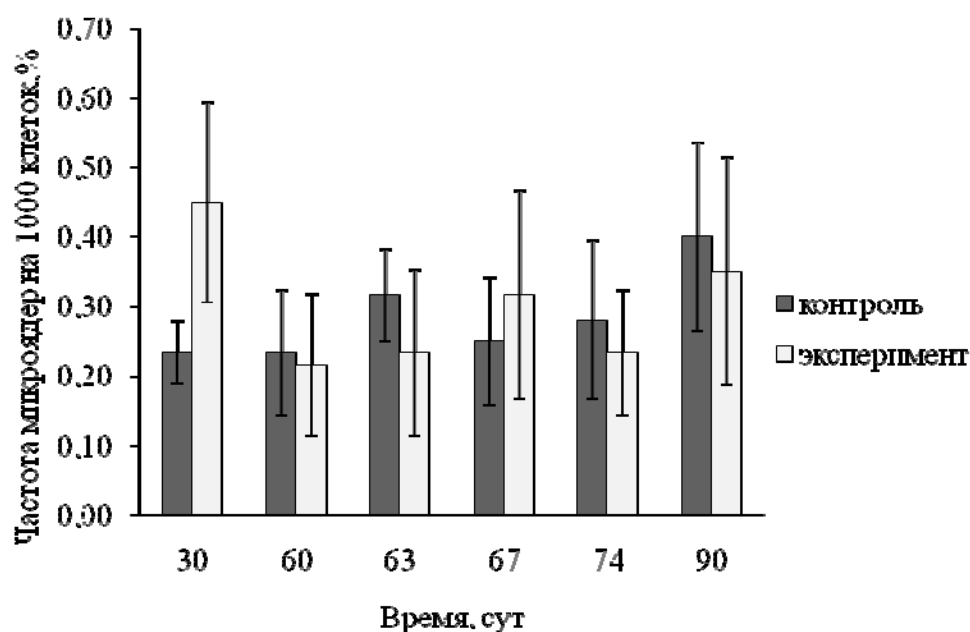


Рисунок 3 – Динамика частоты ПХЭ с микроядрами

Из рисунка 3 видно, что между контрольной и экспериментальной группой достоверное различие наблюдается на первом этапе эксперимента (30 сутки), после чего достоверного различия в группах выявить не удалось. Снижение количества ПХЭ с микроядрами происходит к 60–74 суткам, что можно объяснить высокой пролиферативной активностью клеток костного мозга. Электромагнитное излучение диапазона мобильной связи (897,2 МГц, $0,2–0,3$ мВт/см²) стандарта GSM при времени экспозиции 30 суток увеличивает частоту ПХЭ с микроядрами в костном мозге в 1,7 раз.

Литература

1. Шилкова, Т.В. Оценка влияния электромагнитного поля радиочастотного диапазона низкой интенсивности на содержание микроядер в эритроцитах костного мозга /

Т.В. Шилкова, Д.З. Шибкова // Адаптация биологических систем к естественным и экстремальным факторам среды : материалы III Междунар. науч.-практ. конференции, Челябинск, 22–23 нояб. 2010 г. – С. 66–68.

2. Hardell, L. Pooled analysis of two case-control studies on the use of cellular cordless telephones the risk of benign brain tumors diagnosed during / L. Hardell // *Int. J. Oncol.*, 2006

3. Risk Evaluation of Potential. Environmental. Hazards From Low Frequency Electromagnetic Field Exposure Using Sensitive in vitro Methods // REFLEX Final, report. – 2004. – 291 p.

4. Красовский, Г.Н. Методические указания по изучению мутагенной активности химических веществ при обосновании их ПДК в воде / Г.Н. Красовский, В.С. Журков. – М. : МЗ СССР, 1986. – № 411086.

5. Конопля, Е.Ф. Воздействие электромагнитных излучений миллиметрового диапазона на геном соматических клеток / Е.Ф. Конопля, Л.Н. Николаевич, В.И. Шалатонин // *Радиационная биология. Радиоэкология.* – 2004. – Т. 44, № 4. – С. 432–437

6. Ruediger, H.W. Genotoxic effects of RF electromagnetic fields / H.W. Ruediger. – *Pathophys.* – 2009. – Vol. 16(2–3). – P. 89–102.

7. Лукьяница, В.В. Магнитное поле, его характеристика, влияние на биологические объекты и исследования в медицине / В.В. Лукьяница // Учебное пособие для студентов мед. вузов. – Минск : МГМИ, 1997. – 38 с.

8. Рыбалко, С.Ю. Медико-биологические аспекты воздействия электромагнитного излучения мобильного телефона / С.Ю. Рыбалко, И.А. Грецкий // *Крымский журнал экспериментальной и клинической медицины.* – 2011. – Т. 1, № 1(1).

9. Diem, E. Non-thermal DNA breakage by mobile-phone radiation in human fibroblasts and in GFSH-R17 ragranulosa cells in vitro / E. Diem, C. Schwarz, F. Adlkofer, O. Jahn, H. Rudiger. – *Mutat Res.* – 2005. – Vol. 583(2). – P. 178–183.

10. Sharma, V.P. Mobile phone radiation inhibits Vigna radiata root growth by inducing oxidative stress / V.P. Sharma, H.P. Singh, R.K. Kohli, D.R. Batish. – *Sci. Total Environ.* 2009. – Vol. 407(21). – P. 5543–5547.

11. Vian, A. Microwave Irradiation Affects Gene Expression in Plants / A. Vian, D. Roux, S. Girard, P. Bonnet, F. Paladian, E. Davies, G. Ledoigt. – *Plan Sign Behav.* – 2006. – Vol. 1(2). – P. 67–70.

12. Hintzsche, H. 900 MHz radiation does not induce micronucleus formation in different cell types / H. Hintzsche, C. Jastrow, T. Kleine-Ostmann, T. Schrader, H. Stopper // *Mutagenesis.* – 2012. – Vol. 27(2).

13. Ferreira, A.R. Ultra high frequency-electromagnetic field irradiation during pregnancy leads to an increase in erythrocytes micronuclei / A.R. Ferreira, T. Knakievicz, M.A. Pasqualia, D.P. Gelaina, F. Dal-Pizzolo, C.E.R. Fernandez, A.A. Sallese, H.B. Ferreirab, J.C.F. Moreira // *Life Sci.* – 2006. – Vol. 80(1). – P. 43–50.

14. Пряхин, Е.А. Влияние неионизирующих ЭМИ на животных и человека : монография / Е.А. Пряхин, А.В. Аклев. – Челябинск : Полиграф-Мастер, 2006. – 220 с.

УДК [546.56:546.47:546.48:546.815]:[631.416:631.453](476-21)

Содержание и закономерности накопления меди, цинка, кадмия и свинца в почвах промышленной зоны г. Гомеля*

Н.И. Дроздова, Ю.М. Жученко, Т.В. МАКАРЕНКО, В.Г. СВИРИДЕНКО

Почвы юго-западной промышленной зоны г. Гомеля по суммарному содержанию меди, цинка, кадмия и свинца относятся к первой категории загрязнения. Приоритетным загрязнителем в данных условиях является медь (1–24 ПДК). Выявлена отрицательная аномалия по содержанию в почве цинка (ниже фоновых значений). Получены уравнения линейной регрессии Пирсона для расчетов концентрации тяжелых металлов по измеренным агрохимическим показателям.

Ключевые слова: тяжелые металлы, медь, цинк, кадмий, свинец, почвы промышленной зоны, категория загрязнения, закономерности накопления.

The experimental data were obtained proving that the soils of the southwest industrial zone of Gomel city belongs to the first category of pollution on the total content of copper, zinc, cadmium and lead. Under these conditions copper is considered to be the priority pollutant. The concentration of mobile forms of copper runs up to 1–24 MPC. We have revealed a negative anomaly on the content of copper in soil (which is lower than background values). We have also obtained Pearson's linear regression equation for the calculations of the concentration of heavy metals to the measured agrochemical indicators.

Keywords: heavy metals, copper, zinc, cadmium, lead, soils of industrial zone, category of pollution, regularities of accumulation.

Введение

Почвы городских агломераций, и особенно промышленных зон, характеризуются сложным составом загрязнителей и возможным проявлением при этом их кумулятивных эффектов. Тяжелые металлы из различных источников попадают на поверхность почвы, где их дальнейшее перераспределение, а также образуемые формы определяются рядом физических и химических параметров почвы. Установлено, что почвы урбанизированных территорий могут существенно отличаться от своих аналогов в данной природной зоне [1]. Среди важнейших изменений следует отметить подщелачивание городских почв, увеличение содержания органического вещества, изменение макро- и микроэлементного состава почв, что несомненно будет оказывать влияние на процессы накопления и распределения токсикантов, формы их существования. К числу веществ обязательного контроля в промышленных зонах относятся медь, цинк, кадмий и свинец.

Цель работы: изучение содержания и закономерностей распределения тяжелых металлов в почвах на примере юго-западной промышленной зоны г. Гомеля.

Объект и методы исследования

Объектом исследования являлись образцы дерново-подзолистой почвы, отобранные на пробных экспериментальных площадках, находящихся вблизи производств, которые могут выступать потенциальными источниками загрязнения.

На рисунке 1 представлена карта одной из промышленных зон г. Гомеля, на которой обозначено место расположения экспериментальных площадок и указано расстояние до предполагаемых источников загрязнений тяжелыми металлами: завод «Центролит» – 900 м в направлении на юго-запад; Химзавод – 1900 м в направлении на запад; ЗЛиН – 900 м в направлении на северо-запад от экспериментальных площадок.

Все площадки характеризовались нарушенной структурой почвы с фрагментами водной эрозии, вызванной талыми водами, бедным растительным покровом. Площадки 1 и 2 граничат с шоссе с интенсивным движением транспорта (ул. Барыкина), площадка 3 расположена в 130 м от дороги.

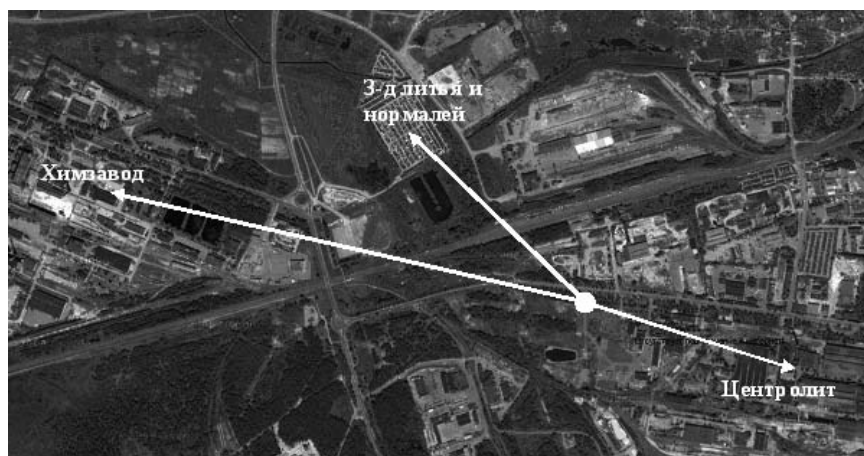


Рисунок 1 – Расположение экспериментальных площадок относительно предполагаемых предприятий-загрязнителей

Для исследования агрохимических свойств почвы использовали потенциометрический метод (определение pH), титриметрический (определение гумуса по методу Тюрина, гидролитической кислотности, суммы обменных оснований), фотометрическое определение подвижного фосфора по методу Кирсанова. Содержание подвижных форм тяжелых металлов определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе Solaar M-6.

Результаты и их обсуждение

Одним из важнейших индикаторов типовой принадлежности почвы, ее состояния и степени трансформации является реакция почвенного раствора. Известно, что с реакцией почвенной среды тесно связаны процессы превращения минеральной и органической составляющих почв, в том числе образование и устойчивость комплексных соединений, их подвижность, миграция и аккумуляция веществ в почвенном профиле. Для ненарушенных почв Беларуси характерна преимущественно кислая и слабокислая реакция среды: pH_{KCL} для большинства почв составляет 4,2–5,8. В пределах исследованных экспериментальных площадей отмечен широкий диапазон варьирования значений pH, колеблющихся от 5,9 до 8,8. По данным [1] величина pH для почв г. Гомеля колеблется в пределах от 3,0 до 5,6. Это означает, что по сравнению с естественными почвами явно выражено смещение в сторону подщелачивания, что может быть обусловлено осаждением строительной, дорожной и другой пыли, содержащей карбонаты кальция и магния. Подщелачивание возможно также и за счет золы, образующейся при сгорании большинства видов топлива и имеющей щелочную реакцию среды.

В определенной степени на изменение кислотно-щелочных условий почв городских ландшафтов указывает также величина гидролитической кислотности. В Беларуси в естественных условиях почвы чаще всего характеризуются низкой величиной гидролитической кислотности (в среднем 2,41 мг-экв/100 г). В пределах исследуемой территории гидролитическая кислотность колебалась в широком диапазоне от 0,34 до 1,25 мг-экв/100 г. Содержание подвижного фосфора значительно варьировало и составляло 1,5–12,2 мг/100 г почвы. Выполненные нами исследования показывают, что почвы экспериментальных площадей содержат незначительное количество гумуса (0,52–1,58%), что не характерно для урбанизированных почв. Возможно, это связано с особенностями пробных площадок, обладающих скудной растительностью.

Нормирование содержания тяжелых металлов в почве является чрезвычайно сложным из-за невозможности полного учета всех факторов природной среды. Предложено множество шкал экологического нормирования. В работе для оценки содержания тяжелых металлов в почве промышленной зоны использованы величины ПДК и ОДК, представленные в действующих нормативных документах [2]–[3] (таблицы 1–2).

Таблица 1 – Градация дерново-подзолистых супесчаных почв по содержанию подвижных форм тяжелых металлов

Содержание ТМ	Содержание элементов, мг/кг почвы			
	Cd	Pb	Cu	Zn
Фоновое	0,03 и менее	3,0 и менее	8,0 и менее	28,0 и менее
Повышенное	0,05–0,15	3,1–10,0	8,0–35,0	28,1–45,0
Высокое	0,16–0,30	10,1–15,0	35,1–70,0	45,1–60,0
Очень высокое (ОДК)	Более 0,30	Более 15,0	Более 70,0	Более 60,0

В соответствии с принятой схемой нормирование тяжелых металлов в почвах подразделяется на транслокационное (переход элементов в растения), миграционное водное (переход в воду) и общесанитарное (влияние на самоочищающую способность почв и почвенный микробиоценоз).

Таблица 2 – ПДК тяжелых металлов и допустимые уровни их содержания по показателям вредности (мг/кг почвы) (ГН 2.1.7.2041-06)

Наименование элемента	ПДК, с учетом фона	Показатели вредности		
		Транслокационный	Водный	Общесанитарный
Подвижные формы				
Медь	3,0	3,5	72,0	3,0
Цинк	23,0	23,0	200,0	37,0
Свинец	—	—	—	6,0

В таблице 3 представлены результаты определения подвижных форм меди, цинка, кадмия и свинца в почвах юго-западной промышленной зоны г. Гомеля в районе ОАО «Гомельский литейный завод “Центролит”». Анализ результатов показывает, что концентрации подвижных форм элементов существенно варьировали в пределах экспериментальной площади. Кроме того, выявлено как закономерность уменьшение их содержания в почве в осенний период (сентябрь) в сравнении с летним периодом (июнь). Так, содержание подвижных форм кадмия в летний период (июнь) характеризовалось как повышенное и высокое, отмечалось превышение кларка элемента (0,03 мг/кг почвы) в 5–10 раз. Осенью (сентябрь) концентрация подвижных форм кадмия в пределах экспериментальной площади варьировала от 0,035 до 0,158 мг/кг почвы, что соответствовало повышенному уровню содержания элемента и находилось в пределах 1,2–5,3 величины кларка.

В целом в пределах экспериментальной площадки установлено превышение ПДК подвижных форм меди в летний и осенний периоды в 1,2–24 и 1–7,5 раза соответственно. Образцы более 20% пробных площадей характеризовались повышенным уровнем содержания подвижных форм меди.

Содержание подвижных форм свинца (мг/кг) в летний и осенний периоды варьировало от 0,84 до 12,52 и от 1,35 до 5,31 соответственно. Таким образом, концентрация свинца не превышала кларковых значений (3 мг/кг почвы) и общесанитарных показателей вредности (6 мг/кг почвы) и только в отдельных случаях (не более 20%) характеризовалась как повышенная.

Концентрация цинка (мг/кг почвы) составляла 1,20–18,50 в летний и 1,01–6,62 в осенний периоды. Показатели указывают на обедненность почв относительно данного элемента, что может быть одной из причин угнетенного состояния растительной компоненты.

Для оценки уровня техногенного загрязнения среды ионами тяжелых металлов используют коэффициент концентрации, равный отношению концентрации элемента в загрязненной почве к его фоновой концентрации. При загрязнении почвы несколькими металлами степень загрязнения оценивается по величине суммарного показателя загрязнения Z_c :

$$Z_c = \sum K_{ci} - (n-1),$$

где n – число определяемых элементов; K_{ci} – коэффициент концентрации элемента.

Существует следующая градация загрязнения почвы тяжелыми металлами исходя из значений суммарного показателя загрязнения: 1 категория – значения $Z_c < 16$, 2 категория – 16–32, 3 категория – 32–128, 4 категория – более 128. Для почвы исследуемой нами промышленной зоны индекс суммарного загрязнения находился в пределах $Z_c \ll 16$, что позволяет отнести их к первой категории загрязнения.

Таблица 3 – Содержание подвижных форм ТМ в почве юго-западной промышленной зоны г. Гомеля

№	Пробная площадка	Определяемые показатели, мг/кг			
		Cd	Pb	Cu	Zn
Лето					
1	1	0,287	8,46	72,76	18,50
2	2	0,263	5,10	11,19	7,16
3	3	0,208	1,49	7,44	2,14
4	4	0,221	1,56	4,19	1,67
5	4 а	0,268	6,64	25,19	9,34
6	5	0,167	1,07	4,91	2,05
7	6	0,177	1,16	7,96	2,07
8	7	0,233	2,05	16,22	3,08
9	8	0,239	2,12	18,25	3,05
10	9	0,246	2,56	7,56	4,05
11	10	0,141	0,96	1,65	1,35
12	11	0,129	0,84	3,60	1,59
13	12	0,192	1,22	2,24	1,20
14	13	0,196	1,33	3,95	2,61
15	14	0,189	1,22	7,38	3,28
16	15	0,202	1,45	4,33	2,38
17	16	0,225	1,80	4,48	1,93
18	17	0,294	8,86	22,43	13,31
19	18	0,229	1,90	5,70	8,05
20	19	0,308	12,52	18,89	13,18
21	20	0,201	1,31	4,84	2,36
Осень					
22	1	0,070	2,53	9,35	1,78
23	4	0,095	3,83	8,00	4,58
24	5	0,035	1,63	2,83	1,03
25	6	0,054	1,50	8,31	5,00
26	7	0,039	2,62	9,19	2,22
27	8	0,129	5,31	22,25	1,90
28	9	0,061	3,34	8,46	3,86
29	10	0,104	1,45	2,63	1,34
30	11	0,082	1,35	2,48	1,01
31	12	0,094	2,93	8,24	4,01
32	13	0,125	4,28	4,79	2,53
33	14	0,158	3,10	4,29	6,62
34	15	0,043	1,45	2,60	1,41
35	16	0,041	1,30	3,31	1,02
36	17	0,106	2,71	2,36	4,96
37	18	0,052	2,41	6,29	2,84
38	19	0,058	3,42	11,90	8,51
39	20	0,045	1,73	3,77	2,00

Как известно, подвижность тяжелых металлов в почве определяется совокупностью многих факторов, основными из которых являются кислотно-основное равновесие, концентрация фосфатов и органического вещества. Для изучения вопроса о влиянии почвенных условий на подвижность ионов тяжелых металлов была выполнена процедура множественной корреляции и регрессии. Исходные данные для расчетов включали результаты анализов 103 проб почвы.

Промежуточным результатом в процедуре множественной корреляции являются парные и частные корреляции между всеми выборками. В таблице 4 представлены результаты парного корреляционного анализа между концентрацией подвижных форм тяжелых металлов в почве и основными агрохимическими показателями: величиной pH, содержанием гумуса и подвижного фосфора. Коэффициенты парной корреляции характеризуются низкими и средними значениями: от $-0,06$ до $+0,68$ – и в большинстве случаев достоверны при уровне значимости $p \leq 0,05$. Не установлена достоверность корреляции и регрессии между содержанием подвижных форм Zn и значением pH, Pb и содержанием гумуса, а также между всеми элементами и подвижным фосфором.

Таблица 4 – Парные коэффициенты корреляции

C _{TM}	pH		Гумус, % (C _g)		Подвижный фосфор, мг/100 г почвы, (C(P ₂ O ₅))	
	r	p	r	p	r	p
Cu	0,25	$\leq 0,05$	0,29	$\leq 0,05$	0,02	$> 0,05$
Zn	0,16	$> 0,05$	0,25	$\leq 0,05$	0,17	$> 0,05$
Pb	0,42	$\leq 0,05$	0,10	$> 0,05$	$-0,06$	$> 0,05$
Cd	0,68	$\leq 0,05$	$-0,29$	$\leq 0,05$	$-0,11$	$> 0,05$

В таблице 5 приведены результаты множественной корреляции и регрессии. Коэффициенты множественной корреляции между содержанием в почве подвижных форм всех определяемых элементов и агрохимическими показателями почв имеют средние и высокие значения (для кадмия – $0,72$). Все корреляции и уравнения регрессии достоверны при уровне значимости $p \leq 0,05$.

Таблица 5 – Множественные коэффициенты корреляции и коэффициенты уравнения линейной регрессии Пирсона: $C_{tm} = a + b \cdot pH + c \cdot C_g + d \cdot C_{P2O5}$

C _{TM}	R	p	a	b	c	d	p
Cu	0,54	$\leq 0,05$	$-56,38$	7,45	10,28	0,85	$\leq 0,05$
Zn	0,48	$\leq 0,05$	$-27,96$	3,16	5,69	1,10	$\leq 0,05$
Pb	0,53	$\leq 0,05$	$-7,71$	1,33	0,97	$-0,03$	$\leq 0,05$
Cd	0,72	$\leq 0,05$	$-0,21$	0,06	$-0,007$	$-0,01$	$\leq 0,05$

Для прогнозных расчетов концентрации подвижных форм тяжелых металлов в пределах экспериментальных площадей и в сходных условиях предлагается использовать следующие уравнения линейной регрессии:

$$Cu - C_{Cu} = -56,38 + 7,54 \cdot pH + 10,28 \cdot C_g + 0,85 \cdot C_{P2O5}$$

$$Zn - C_{Zn} = -27,96 + 3,16 \cdot pH + 5,69 \cdot C_g + 1,10 \cdot C_{P2O5}$$

$$Pb - C_{Pb} = -7,71 + 1,33 \cdot pH + 0,97 \cdot C_g - 0,03 \cdot C_{P2O5}$$

$$Cd - C_{Cd} = -0,21 + 0,06 \cdot pH - 0,007 \cdot C_g - 0,01 \cdot C_{P2O5}$$

Адекватность моделей для расчета концентраций тяжелых металлов по измеренным значениям агрохимических показателей (pH, гумус, подвижный фосфор) характеризуется высокой степенью достоверности и визуально представлена на рисунках 2–3.

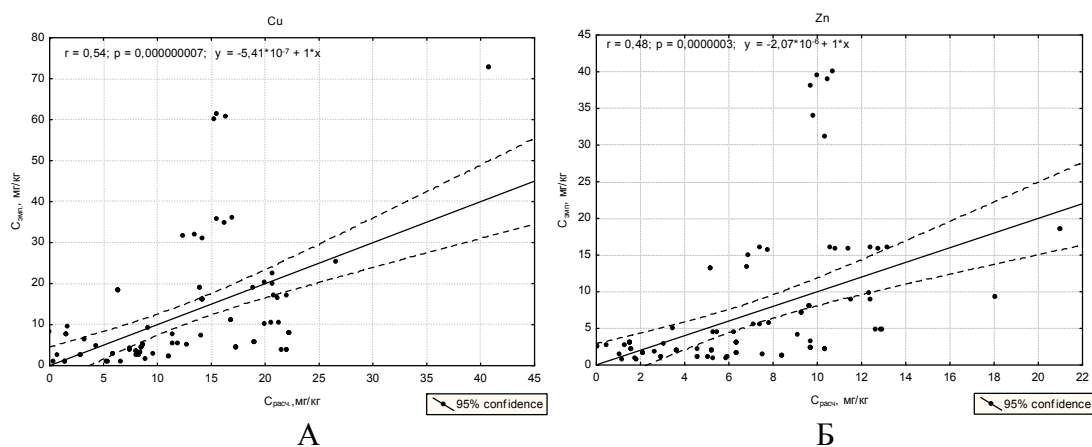


Рисунок 2 – Адекватность моделей для расчета концентрации подвижных форм Cu (А) и Zn (Б) в почве

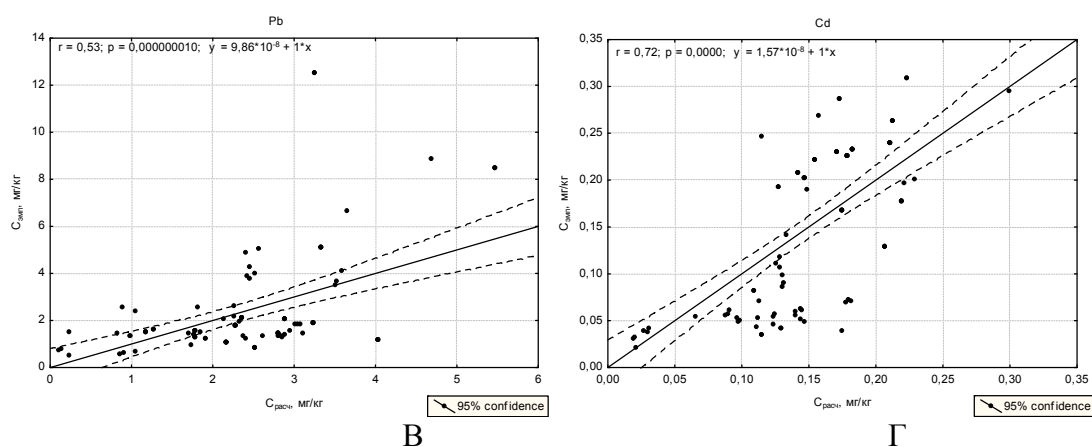


Рисунок 3 – Адекватность модели для расчета концентрации подвижных форм Pb (В) и Cd (Г) в почве

Заключение

Полученные экспериментальные данные указывают, что почвы юго-западной промышленной зоны г. Гомеля в районе ОАО «Гомельский литейный завод “Центролит”» по суммарному содержанию исследуемых тяжелых металлов относятся к первой категории загрязнения. Приоритетным загрязнителем в данных условиях является медь, концентрация подвижных форм которой достигает 1–24 ПДК. Содержание кадмия превышает фоновые значения в 1–5 раз. Количество свинца находится в целом в пределах фоновых значений. Выявлена отрицательная аномалия по содержанию в почве цинка (ниже фоновых значений). Отмеченная значительная вариация концентраций элементов в пределах экспериментальных площадей указывает на техногенный характер загрязнения.

Определены основные агрохимические свойства почвы на выбранных экспериментальных площадях, на основании которых выполнена процедура множественной корреляции и регрессии. Получены уравнения линейной регрессии Пирсона для расчетов концентрации подвижных форм меди, цинка, кадмия и свинца.

Литература

1. Хомич, В.С. Экогеохимия городских ландшафтов Беларуси / В.С. Хомич, С.В. Какарека, Т.И. Кухарчик. – Минск : РУП «Минсктиппроект», 2004. – 260 с.

2. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства : изд. 2-ое перераб. и доп. / Мин-во сельского хоз-ва Российской Федерации : ЦИНАО, 1992.

3. Крупномасштабное агрохимическое и радиологическое обследование почв сельскохозяйственных земель РБ. Методические указания / под ред. акад. И.М. Богдевича. – Минск, 2006.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступило 15.05.12

* Работа выполнена в рамках задания ГПНИ «Природно-ресурсный потенциал 3.07»
№ госрегистрации 20112849

Первичный анализ эмпирических распределений

Ю.М. ЖУЧЕНКО, П.П. ЕВТУХОВ

Для оценки статистических характеристик измеряемых величин включены: анализ резко выделяющихся наблюдений (выпадений или артефактов) и выбраковка недостоверной информации; определение закона и оценка параметров распределений; определение числа измерений, необходимых для оценки параметров выбранной вероятностной модели с заданной точностью.

Ключевые слова: статистические характеристики измеряемых величин, резко выделяющиеся наблюдения, выбраковка недостоверной информации, параметры распределения выборки, параметры распределения, вероятностная модель.

The estimation of statistical characteristics of measured values includes: the analysis of sharply allocated supervision (losses or artifacts) and unreliable information removal; definition of the law and an estimation of parameters of distributions; definition of number of the measurements necessary for an estimation of parameters of chosen probabilistic model with set accuracy.

Keywords: statistical characteristics of measured values, sharply allocated supervision, unreliable information removal, parameters of sample distribution, parameters of distributions, probabilistic model.

Введение

Методы и модели, применяемые для решения задач взаимосвязи измеряемых параметров и прогноза их изменений, базируются на экспериментальных данных, причем в качестве параметров моделей, как правило, используют средние величины. В то же время эти показатели характеризуются значительной вариабельностью, что обусловлено пространственной неоднородностью объекта исследований, погрешностями методического характера и при обработке исходной информации. Это обстоятельство обуславливает существенную вариабельность параметров моделей, что резко снижает точность прогноза. Таким образом, реалистичность прогноза можно повысить, привлекая информацию о статистических характеристиках эмпирических распределений измеряемых параметров. Статистический анализ эмпирических распределений исходных данных имеет и самостоятельную ценность, поскольку применение статистических методов позволяет отбраковать недостоверную информацию, повысить точность оценок и эффективность экспериментальных исследований путем определения оптимального объема экспериментальных данных.

Оценка статистических характеристик измеряемых величин включает:

- анализ резко выделяющихся наблюдений (выпадений или артефактов) и выбраковку недостоверной информации;
- определение закона и оценку параметров распределений;
- определение числа измерений, необходимых для оценки параметров выбранной вероятностной модели с заданной точностью.

Анализ резко выделяющихся наблюдений, выбраковка недостоверной информации

Наблюдения, которые резко выпадают из общего ряда (артефакты), могут быть обусловлены как ошибками при отборе и анализе проб, несоблюдением регламента эксперимента, изменением его условий, так и незамеченными или неучтенными существенными для понимания исследуемого процесса факторами. Поэтому анализ выделяющихся наблюдений позволяет еще раз проверить условия их регистрации и тем самым выделить и устранить ошибку.

Анализ резко выделяющихся наблюдений включает два этапа: выявление «подозрительных» наблюдений и проверку с помощью статистических критериев их принадлежности к принятой для описания основной массы экспериментальных данных вероятностной модели. Простейшим критерием на выявление резко выделяющихся наблюдений является «правило четырех сигм», которое гласит, что наблюдение может быть отброшено, если оно лежит вне

области $\mu \pm 4\sigma$, причем среднее значение μ и стандартное отклонение σ рассчитываются без учета проверяемых на выброс экспериментальных данных. Этот критерий основан на том, что «интервал четырех сигм» ($\mu \pm 4\sigma$) включает в себя при нормальном распределении 99,99% объема генеральной совокупности.

При малых объемах выборки ($n < 25$) проверка гипотезы о том, относится ли резко выделяющееся наблюдение к той же генеральной совокупности, что и остальные данные, осуществляется с помощью статистики Диксона:

$$M = \frac{X_1 - X_3}{X_1 - X_{n-2}}, \quad (1)$$

где X_1 – подозреваемое на выброс значение; X_3 и X_{n-2} – третье значение соответственно от начала и конца в упорядоченной по величине выборке. Критические значения статистики (1) приведены в работе [1].

Если объем выборки превосходит 25, то проверка экспериментальных значений на выброс осуществляется с помощью статистики:

$$T = \frac{X_1 - \mu}{\sigma}. \quad (2)$$

Если величина статистики (2) превосходит критическое значение [1], то анализируемое наблюдение считается выбросом.

Если в аномальном поведении подозревается сразу несколько значений, то статистики (1) или (2) сначала применяют к максимально выделяющемуся из подозреваемых на выброс значений. Если оно признается выбросом, то его удаляют из выборки, а статистики (1) или (2) применяют к следующему по величине значению, пока не будет признано, что выбросов больше нет.

Необходимо подчеркнуть, что статистики (1), (2) предполагают приближенно нормальное распределение основной массы данных. Это крайне важное требование, поскольку прямое математическое моделирование показало [2], что статистические процедуры, предполагающие нормальное распределение, неожиданно быстро теряют свои оптимальные свойства при утяжелении «хвостов» распределения. Есть основания полагать, что предположение нормальности при анализе эмпирических распределений исходных данных выполняется. Например, в работе [3] на основе анализа собственных экспериментальных материалов и данных литературы показано, что для широкого круга антропогенных загрязнителей распределение значений коэффициентов накопления удовлетворяет либо нормальному, либо логарифмически нормальному закону распределения.

Определение закона и оценка параметров распределения

Для получения надежных статистических оценок исходных данных, которые отвечают трем основным требованиям, предъявляемым к статистическим оценкам [1], – несмещенности, состоятельности и эффективности – крайне важное значение имеет правильная идентификация закона распределения экспериментальных данных. Так, известно, что при логарифмически нормальном распределении экспериментальных данных среднее арифметическое (оценка максимального правдоподобия в случае нормального распределения) является несмещенной и состоятельной, но не наиболее эффективной оценкой математического ожидания [1]. Поэтому до определения статистических характеристик измеряемых параметров необходимо идентифицировать закон распределения.

Задача проверки гипотезы о законе распределения случайной величины формулируется следующим образом. Пусть в распоряжении исследователя есть фиксированная выборка объемом n :

$$X = x_1, x_2, \dots, x_n.$$

Тогда нулевая гипотеза H_0 состоит в предположении, что X описывается распределением $F(x)$, а конкурирующая гипотеза H_1 заключается в том, что $F(x)$ не является функцией распределения X либо функцией распределения X является $F_1(x)$. Для проверки гипотезы H_0 против альтернативы H_1 строят критерий, основанный на использовании заранее определенной

меры расстояния между анализируемой эмпирической функцией распределения $F_n(x)$ и гипотетической модельной $F(x)$.

Объем экспериментальных данных в задаче оценки измеренных величин часто бывает небольшим. Поэтому для идентификации закона распределения желательно иметь чувствительный непараметрический критерий согласия, характеризующийся быстрой сходимостью к предельным распределениям. Таким критерием является более мощный в области малых выборок по сравнению с популярными критериями χ^2 и Колмогорова – Смирнова критерий ω^2 Мизеса [1]. Статистикой критерия является величина среднеквадратичного отклонения эмпирической функции распределения от гипотетической:

$$\omega_n^2 = n \cdot \int (F(x) - F_n(x))^2 \cdot dF(x). \quad (4)$$

Хотя статистика (4) с ростом объема выборки быстро приближается к предельному распределению, для маленьких значений n расхождение между нею и предельным распределением может быть существенным. В этом случае используется модификация статистики ω_n^2 , которая для малых n значительно лучше согласуется с предельным распределением. Приведем модификации статистики ω_n^2 отдельно для правого:

$$\tilde{\omega}^2 = \left(\omega_n^2 - \frac{0,4}{n} + \frac{0,6}{n^2} \right) \cdot \left(1,0 + \frac{1,0}{n} \right) \quad (5)$$

и левого «хвостов» распределения:

$$\tilde{\omega}^2 = \left(\omega_n^2 - \frac{0,03}{n} \right) \cdot \left(1,0 + \frac{0,5}{n} \right). \quad (6)$$

Основным недостатком статистики (4) является то, что гипотетическая функция распределения $F(x)$ должна быть полностью определена, вплоть до значений ее параметров.

Как показано в работе [5], если оценке подлежат параметры сдвига и масштаба (что и имеет место в случае нормального и логарифмически нормального законов распределения), предельное распределение статистики ω_n^2 будет зависеть только от формы распределения $F(x)$, но не от его параметров. Независимость предельного распределения от значений параметров сдвига и масштаба дает возможность построить на основе статистики (4) критерий проверки нормального характера распределения. При этом параметры гипотетического распределения $F(x)$ оцениваются по известным формулам:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n-1}. \quad (7)$$

В работе [2] приведены критические значения статистики ω_n^2 для условий, когда параметры гипотетического распределения оцениваются по соотношениям (7).

Известно, что для нормального распределения среднее значение μ совпадает с модой x_{mod} , а для логарифмически нормального распределения имеем:

$$\frac{x_{mod}}{\mu} = \sqrt{V^2 + 1}, \quad (8)$$

где V – коэффициент вариации.

Из соотношения (8) следует, что при небольших значениях коэффициентов вариации законы нормального и логарифмически нормального распределения в плане средней величины и стандартных отклонений практически эквивалентны. Например, при $V = 0,25$ величина отклонения (8) составляет $\frac{x_{mod}}{\mu} \approx 1,03$, то есть допущение закона нормального распределения,

хотя правильнее было бы применить логарифмически нормальное, вводит погрешность $\approx 3\%$ по средней величине и моде. С практической точки зрения отсюда можно сделать следующий вывод: при небольшой величине V бесполезно увеличивать число наблюдений с целью более точного определения закона распределения, поскольку погрешность при выравнивании среднего и моды будет мала. В этом случае для оценки величины исследуемого параметра может

быть использовано среднее значение x . В то же время при значительной величине V необходимо иметь небольшое число наблюдений, чтобы точно идентифицировать закон распределения.

Определение числа проб, необходимых для оценки параметров вероятностной модели с заданной точностью

Одной из наиболее важных задач планирования экспериментов по определению параметров генеральной совокупности является оценка числа испытаний. Грамотно спланированным опытом можно считать такой, когда ответ на поставленный вопрос получается с наименьшими затратами сил и времени, а это прежде всего означает, что число повторностей в исследованиях должно быть минимальным. Знание закона распределения позволяет не только дать удовлетворительную оценку величины исследуемого параметра, но и определить число наблюдений, необходимых для получения значений параметра с фиксированной относительной вероятностной погрешностью при заданной доверительной вероятности.

Для выборочного среднего (7) из нормально распределенной генеральной совокупности с параметрами μ и σ с вероятностью $1-\alpha$ можно утверждать, что интервал $\mu - \frac{t \cdot \sigma}{\sqrt{n}}; \mu + \frac{t \cdot \sigma}{\sqrt{n}}$ покрывает истинное значение μ . Рассматривая половину доверительного интервала как допустимую вероятную погрешность определения среднего, относительную вероятную погрешность запишем в виде:

$$\delta = \frac{\Delta}{\mu} = \frac{t \cdot \sigma}{\mu \cdot \sqrt{n}} = \frac{t \cdot V}{\sqrt{n}},$$

где t – значение критерия Стьюдента.

Таким образом, число проб, которое необходимо иметь для определения средних значений с относительной вероятной погрешностью δ , можно определить по формуле:

$$n = \left(\frac{t \cdot V}{\delta} \right)^2. \quad (9)$$

Принято считать, что для предварительной оценки измеряемой характеристики следует выбирать величину относительной вероятной погрешности в пределах 25–30 %, а при детальном изучении объекта исследований – не более 15–20%.

Из соотношения (9) видно, что с повышением доверительной вероятности $1-\alpha$ и снижением относительной вероятной погрешности δ число необходимых проб увеличивается. Рассчитанное по формуле (9) число проб, необходимых для оценки значений измеряемых параметров средним арифметическим в случае нормального распределения в зависимости от величины коэффициента вариации и относительной вероятной погрешности при $\alpha = 0,05$, представлено в таблице 1. График зависимости $n(V)$ для разных значений δ представлен на рисунке 1.

Таблица 1 – Минимальное количество проб, необходимых для оценки исследуемого параметра средним арифметическим (нормальное распределение, $\alpha = 0,05$)

Коэффициент вариации	Относительная вероятная погрешность				
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
0,1	6	4	4	3	3
0,2	18	9	6	5	4
0,3	37	18	11	8	6
0,4	64	30	18	12	9
0,5	98	45	26	17	13
0,6	142	64	37	25	18
0,7	189	86	49	32	23
0,8	248	112	64	42	30

Коэффициент вариации	Относительная вероятная погрешность				
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
0,9	313	141	80	52	37
1,0	386	173	98	64	45
1,2	556	247	141	91	64
1,4	756	337	191	123	86
1,6	986	440	248	160	112
1,8	1247	556	314	201	141
2,0	1537	686	387	248	173

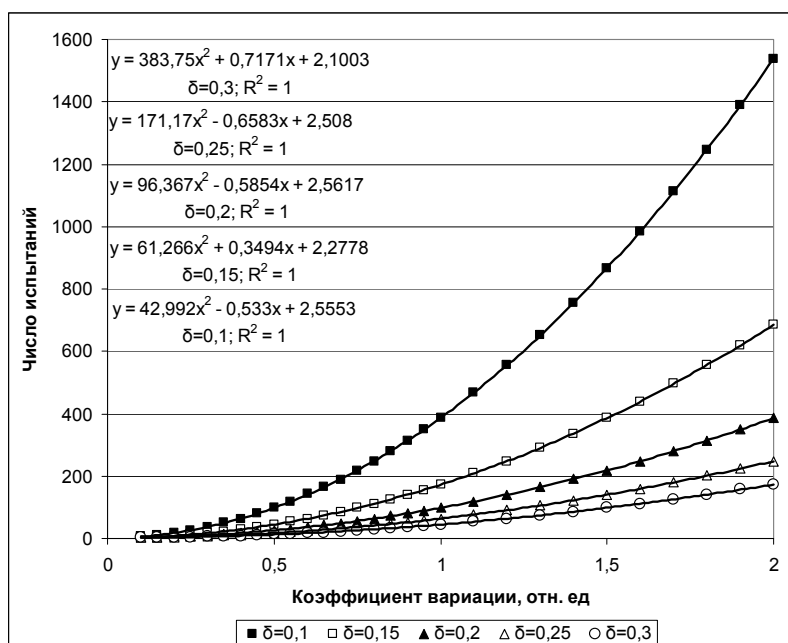


Рисунок 1 – Минимальное число проб (n), необходимое для оценки параметров вероятностной модели, основанной на нормальном распределении в зависимости от коэффициента вариации V и относительной вероятной погрешности δ

Видно, что при небольших значениях коэффициента вариации ($V < 30\%$) для оценки среднего с относительной вероятной погрешностью ($\delta = 20\%$) и принятой доверительной вероятностью ($1-\alpha = 0,95$) необходимо отобрать и проанализировать менее 11 проб. С ростом V для получения оценки параметров с такой же относительной вероятной погрешностью число проб резко возрастает. В левом углу рисунка приведены аппроксимации полиномом второго порядка числа испытаний (y) при изменении коэффициента вариации (x) с фиксированным значением относительной вероятной погрешности δ .

Если распределение случайной величины отличается от нормального, то оценка центра распределения средним арифметическим, оставаясь состоятельной, перестает быть самой эффективной [4]. Более того, даже в случае симметричных распределений эффективность статистики μ как оценки параметра сдвига быстро падает с утяжелением «хвостов» распределения [2]. В случае асимметричного унимодального распределения, каким является логарифмически нормальное, для оценки центра распределения целесообразно использовать моду. При логарифмически нормальном распределении относительная вероятная погрешность связана с коэффициентом вариации и числом проб следующим образом [1]:

$$\delta^2 = \frac{\ln(V^2 + 1) \cdot (3n - 1)}{n \cdot (n - 1)}. \quad (10)$$

Рассчитанное по формуле (10) число проб, необходимых для оценки значений параметров для логарифмически нормального распределения в зависимости от относительной вероят-

ной погрешности и коэффициента вариации, представлено в таблице 2. График зависимости $n(V)$ для разных значений δ представлен на рисунке 2.

Таблица 2 – Минимальное количество проб, необходимых для оценки исследуемого параметра модой (логарифмически нормальное распределение, $\alpha = 0,05$)

Коэффициент вариации	Относительная вероятная погрешность				
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
0,2	12	6	4	3	2
0,3	27	12	7	5	4
0,4	45	20	12	8	6
0,5	68	30	17	11	8
0,6	93	42	24	15	11
0,7	120	54	31	20	14
0,8	149	67	38	24	17
0,9	179	80	45	29	20
1	209	93	53	34	24
1,2	268	120	68	43	30
1,4	326	145	82	53	37
1,6	382	170	96	62	43
1,8	434	194	109	70	49
2	484	215	121	78	54

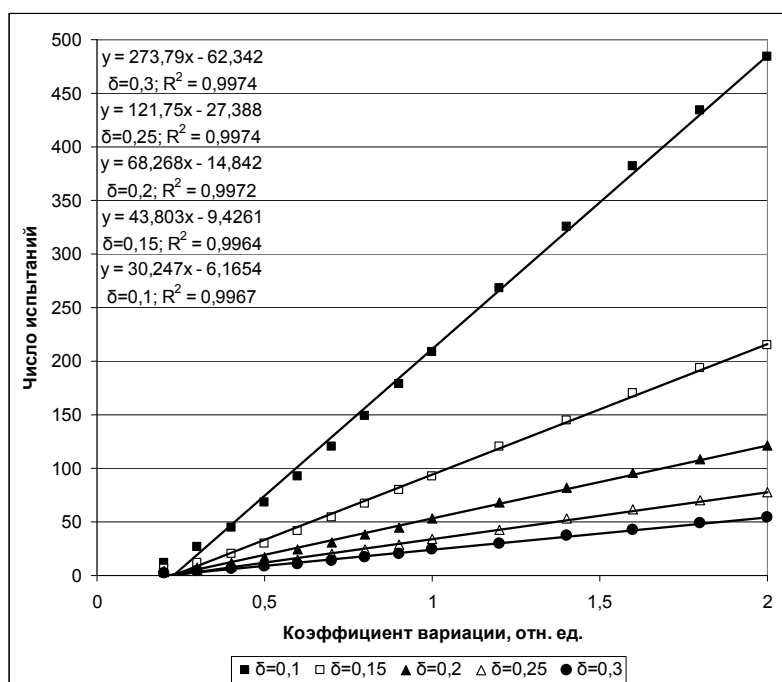


Рисунок 2 – Минимальное число проб (n), необходимое для оценки параметров вероятностной модели, основанной на логарифмически нормальном распределении в зависимости от коэффициента вариации V и относительной вероятной погрешности δ

В левом углу рисунка приведены аппроксимации линейной функцией числа испытаний (y) при изменении коэффициента вариации (x) с фиксированным значением относительной вероятной погрешности δ .

Сопоставляя объемы выборок, соответствующие одинаковым значениям δ и V (при $\alpha = 0,05$), видим, что в случае оценки модой часто требуется меньшее количество проб, чем при оценке средним арифметическим.

Таким образом, число точечных проб, достаточное для составления объединенной выборки, характеризующей с заданной точностью измеряемый параметр, определяется величиной коэффициента вариации и точностью.

Литература

1. Закс, Л. Статистическое оценивание / Л. Закс. – М. : Статистика, 1976. – 598 с.
2. Айвазян, С.А. Прикладная статистика: основы моделирования и первичная обработка данных / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М., 1983. – 471 с.
3. Сатаева, Л.В. Применение статистических методов к решению некоторых вопросов загрязнения почв : автореф. канд. дис. / Л.В. Сатаева. – Обнинск, 1990. – 23 с.
4. Крамер, Г. Математические методы статистики / Г. Крамер. – М. : Мир, 1975. – 648 с.
5. Кендалл, М.Дж. Курс статистики. Статистические выводы и связи. Т. 2. / М.Дж. Кендалл, А. Стьюарт. – М. : Наука, Физматлит, 1973. – 466 с.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступило 15.05.12

УДК 543.3:556.531(282.247.321.7)

Изучение состава поверхностных вод р. Сож в районе г. Гомеля

Т.В. МАКАРЕНКО, Ю.А. ПРОЛЕСКОВСКИЙ, Е.Л. ЗЫКОВА, О.В. ПЫРХ

Основными загрязнителями р. Сож в пределах Гомеля являются поверхностный сток с городской территории и сельскохозяйственных угодий, расположенных по берегам реки, а также очищенные бытовые стоки городских очистных сооружений. Речные воды в районе г. Гомеля загрязнены нефтепродуктами, нитрит-ионами, фосфатами, ионами меди, цинка, хрома, никеля и железа. Увеличение содержания отдельных загрязнителей на участке реки в городской черте, в среднем, на 50–70% свидетельствует о загрязнении речной воды поверхностным стоком г. Гомеля. Несинхронность сезонных изменений концентраций изучаемых тяжелых металлов в пробах, взятых выше и ниже города может быть связана с различными доминирующими каналами поступления их в реку. **Ключевые слова:** поверхностные природные воды, тяжелые металлы, антропогенная нагрузка, фоновые концентрации.

The main pollutants of the river Sozh within Gomel are runoff from urban areas and agricultural lands located on the banks of the river, and cleaned of urban domestic waste water treatment facilities. The river waters in the Gomel region are contaminated with oil products, nitrite ions, phosphates, ions of copper, zinc, chromium, nickel and iron. The increase of individual pollutants in the area of the river within the city boundary, on average, by 50–70% indicates the contamination of river water runoff in Gomel. Asynchronous seasonal changes in the concentrations of heavy metals in the studied samples from above and below the city may be associated with different dominant channels of their entry into the river.

Keywords: surface natural waters, heavy metals, anthropogenic load, background concentrations.

Введение

Несмотря на предпринимаемые меры по вводу в действие и совершенствованию очистных сооружений, проблема охраны водных ресурсов в Республике Беларусь является актуальной и в настоящее время. Поступление в природные водоемы загрязняющих веществ в составе дождевых и талых вод вследствие смыва органических и минеральных удобрений с сельскохозяйственных и поверхностного стока с урбанизированных территорий, а также с бытовыми сточными водами и сточными водами предприятий приводит в ряде случаев к превышению предельно допустимых концентраций. Основным источником загрязнения поверхностных вод считаются выпуски загрязненных сточных вод (включая нормативно-очищенные). Однако сопоставление средних концентраций в природной и сточной водах показывает, что на некоторых реках Беларуси по отдельным загрязнителям (медь, цинк, азот нитритный, нефтепродукты и др.) концентрации загрязняющих веществ в природных водах превышают концентрации этих же веществ в сточных водах [1]. Такое положение может быть следствием трех причин:

1) неполный учет количества сбрасываемых загрязняющих веществ в статистических отчетах водопользователей вследствие несвоевременного предоставления некоторыми предприятиями данных о составе сточных вод;

2) в ряде случаев содержащиеся в статистических отчетах нулевые значения отдельных ингредиентов обусловлены отсутствием контроля за содержанием этих компонентов;

3) значительное влияние рассредоточенных источников загрязнения, т. е. поступление в водные объекты загрязняющих веществ в составе поверхностного стока с урбанизированных территорий, животноводческих комплексов, сельскохозяйственных, стоянок автотранспорта, дорожных магистралей, оседания газопылевых частиц на поверхности водоемов, а также загрязненности выпадающих осадков.

Последняя причина является более характерной, на что указывают результаты специальных исследований Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды по

оценке выноса некоторых загрязнителей поверхностным стоком с сельхозугодий и животноводческих комплексов [1]. Наиболее сильное комплексное воздействие на реки оказывают урбанизированные территории. Ежегодный вынос взвешенных наносов с городских территорий в реки оценивается от 80 т/км² (р. Потомок г. Вашингтон) [2] до 600 т/км² (р. Москва г. Москва), для площадей, занятых под городским строительством, – 16–244 т/га, в то время как снос с земель, находящихся под сельхозобработкой, – 1,5–9,6 т/га, а под лесами – 0,07–0,45 т/га [3].

Река Сож является основной водной артерией г. Гомеля и испытывает пресс Гомельской городской агломерации, 58% территории которой расположено по обоим берегам реки в ее нижнем течении. Из реки имеет место забор воды как для технических нужд и полива приусадебных участков, так и для водоснабжения населения города питьевой водой. Все это предъявляет к химическому составу природной воды р. Сож особые экологические требования.

В связи с этим целью настоящей работы стало изучение состава поверхностных вод р. Сож до принятия стоков г. Гомеля и ниже черты города по течению.

Материалы и методы исследования

Изучение основных гидрохимических показателей р. Сож начато в 1999 году и продолжается по настоящее время. Особое внимание уделяется тем участкам реки, где по берегам расположены районы города, дачные поселки и зоны отдыха в д. Ченки.

Отбор проб речной воды проводился в следующих точках: 1 км выше черты г. Гомеля (точка № 1); 1 км ниже черты города (точка № 2); 7 км ниже черты г. Гомеля (точка № 3) район д. Ченки.

Пробы воды отбирались батометром с глубины 1 м. В пробах определяли рН, содержание взвешенных веществ, БПК-5, содержание нитрит-, нитрат-, сульфат-, фосфат-, хлорид-ионов, ионов аммония и СПАВ (синтетических поверхностно-активных веществ) с использованием стандартных методик. Содержание тяжелых металлов определялось на атомно-адсорбционном спектрометре «Перкин Элмер – 330» (США) [4].

Результаты и их обсуждение

Участок реки, проходящий через городской массив, принимает стоки Мильчанской канавы, многочисленные ливневыпуски центральной части города, дождевые воды, стекающие с территории микрорайона «Монастырек» и д. Якубовка, ливневки микрорайонов «Фестивальный» и «Новобелица», а также стоки 11 промышленных предприятий.

Река Сож выше г. Гомеля по течению принимает стоки городов и поселков Могилевской и Гомельской областей, а также дождевую и талую воду, стекающую с сельхозугодий и приусадебных участков. Возможно, это явилось причиной повышенного содержания отдельных загрязнителей в пробах, взятых выше черты города Гомеля (таблица 1).

Так как р. Сож, как и большинство водоемов и водотоков Республики Беларусь, является не только объектом хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения, но и используется для выращивания многих ценных промышленных видов рыб, то сравнение концентраций основных загрязнителей проводили с ПДК для водоемов рыбохозяйственного пользования [5].

Так, содержание нефтепродуктов в пробах воды, взятых выше черты города, было в 2,4–3,0 раза выше ПДК, концентрация нитрит-ионов превышала норму в 2,4–2,6 раза. Остальные показатели не превышали нормативно-допустимых значений. Сравнивая величины содержания изучаемых показателей в воде реки выше города по течению в 2009 и 2011 гг., можно отметить, что состав речной воды в данной точке изменился незначительно.

Речная вода на участке ниже черты города на 1 км характеризуется повышенным содержанием фосфатов, азота аммонийного, хлоридов, сульфатов, СПАВ и нефтепродуктов в сравнении с пробами воды, взятыми выше черты города. Содержание вышеперечисленных загрязнителей увеличилось при движении вниз по течению реки в среднем на 50–70%. Значение водородного показателя в речной воде ниже города незначительно выходило за рамки допустимой нормы, вода имела слабощелочную среду (рН = 8,7–8,8). Значительно выросло

биологическое потребление кислорода с 3,8 до 5,1 мг $O_2/дм^3$ (в среднем в 1,7 раза), однако предельно-допустимая концентрация не была превышена; содержание нефтепродуктов превысило ПДК в 5–6 раз; концентрация нитритов составила 3,0 ПДК, фосфатов – 3,3 ПДК.

В 2011 г. в речной воде ниже города увеличилось содержание взвешенных веществ, азота аммонийного, хлоридов и нефтепродуктов в среднем на 7–17% по сравнению с 2009 годом. Резко увеличилось содержание фосфатов. Это говорит об увеличении загрязнения реки, хотя содержание ионов в стоках предприятий уменьшилось на 12–40% [6]. Все это свидетельствует о росте долевого вклада бытовых стоков в загрязнение воды р. Сож. Анализ данных о химическом составе речной воды выше и ниже города по течению указывает на увеличение содержания практически всех исследуемых показателей после принятия стоков в среднем на 22–78%.

В бассейне р. Сож имеется достаточное количество водных ресурсов для разбавления сточных вод до нормативов водоемов рыбохозяйственного водопользования. Об этом свидетельствуют результаты анализа речной воды в районе д. Ченки. В пробах, отобранных в значительно ниже города (точка № 3), только содержание нефтепродуктов превышало допустимую норму в 1,7 раза, концентрация нитрит ионов была на уровне ПДК.

Таблица 1 – Физико-химические показатели состояния и содержания анионов воды р. Сож
В мг/дм³

Показатели	ПДК	Место отбора проб					
		р. Сож 1 км выше г. Гомеля		р. Сож 1 км ниже г. Гомеля		р. Сож 7 км ниже г. Гомеля	
		2009	2011	2009	2011	2009	2011
рН	6,5–8,5	8,2	8,3	8,7	8,8	8,3	8,3
БПК-5 (мг $O_2/дм^3$)	не более 6,0	3,85 $\pm 0,39$	3,74 $\pm 0,38$	5,17 $\pm 0,53$	4,76 $\pm 0,49$	3,21 $\pm 0,34$	3,97 $\pm 0,41$
Взвешенные вещества	0,75	0,42 $\pm 0,047$	0,44 $\pm 0,046$	0,62 $\pm 0,066$	0,70 $\pm 0,073$	0,43 $\pm 0,043$	0,38 $\pm 0,040$
Нефтепродукты	0,05	0,15 $\pm 0,014$	0,12 $\pm 0,013$	0,25 $\pm 0,027$	0,30 $\pm 0,029$	0,11 $\pm 0,010$	0,08 $\pm 0,009$
СПАВ	0,10	0,06 $\pm 0,005$	0,06 $\pm 0,006$	0,09 $\pm 0,008$	0,08 $\pm 0,007$	0,06 $\pm 0,007$	0,07 $\pm 0,007$
NO_3^-	40	3,70 $\pm 0,39$	3,05 $\pm 0,31$	5,28 $\pm 0,57$	5,62 $\pm 0,057$	2,17 $\pm 0,023$	2,64 $\pm 0,027$
NO_2^-	0,08	0,21 $\pm 0,029$	0,19 $\pm 0,021$	0,24 $\pm 0,022$	0,23 $\pm 0,025$	0,08 $\pm 0,008$	0,08 $\pm 0,009$
NH_4^+	0,50	0,15 $\pm 0,015$	0,17 $\pm 0,018$	0,31 $\pm 0,037$	0,41 $\pm 0,046$	0,18 $\pm 0,020$	0,18 $\pm 0,019$
PO_4^{3-}	0,2	0,12 $\pm 0,014$	0,18 $\pm 0,021$	0,14 $\pm 0,068$	0,67 $\pm 0,068$	0,08 $\pm 0,009$	0,11 $\pm 0,012$
Cl^-	300,0	96,12 $\pm 10,83$	74,87 $\pm 8,23$	155,69 $\pm 16,31$	174,56 $\pm 18,37$	88,71 $\pm 9,01$	69,16 $\pm 7,39$
SO_4^{2-}	100,0	30,56 $\pm 3,10$	37,71 $\pm 3,39$	72,18 $\pm 7,36$	67,62 $\pm 7,06$	27,71 $\pm 2,94$	33,15 $\pm 3,45$

Берега р. Сож выше города по течению распаханы под сельхозугодья, близко к воде подходят приусадебные участки. Ниже города по течению такой сельхознагрузки река не испытывает, и поступающая в реку дождевая вода несет незначительное количество загрязнителей. Это может являться причиной снижения содержания практически всех изучаемых показателей на 5–30% в воде реки на участке 7 км ниже черты города. Химический состав воды в районе д. Ченки в 2009 и в 2011 гг. отличался незначительно.

Повышенное содержание тяжелых металлов в природных водах часто обусловлено хозяйственной деятельностью человека. Именно благодаря антропогенным загрязнениям в водоемы попадают большие количества никеля, свинца, хрома, кадмия, ртути, которые обычно содержатся в природных водах в очень небольших количествах. Ионы металлов входят в состав удобрений и пестицидов и могут попадать в водоемы вместе со стоком с сельскохозяйственных угодий.

Соединения тяжелых металлов не подвергаются деструкции в природных экосистемах, их соединения довольно устойчивы. Поступая в водоемы, они включаются в круговорот веществ и подвергаются различным превращениям. Неорганические соединения быстро связываются буферной системой воды и переходят в слаборастворимые гидроокиси, карбонаты, сульфиды и фосфаты, а также образуют металлорганические комплексы, адсорбируются донными осадками. Кроме того, металлы способны накапливаться в различных организмах и передаваться в возрастающих количествах по трофической цепи, негативно воздействуя на водную экосистему.

Как показали исследования, речная вода, взятая выше города, по содержанию тяжелых металлов приближается к нормативным показателям, предъявляемым для водоемов рыбохозяйственного назначения (таблица 2). Содержание ионов хрома находится на уровне ПДК, железа общего и меди приближается к фоновому значению, количество ионов цинка превышает фоновое значение в 1,6 раза. Концентрация ионов кадмия и свинца значительно ниже предельно-допустимых.

Таблица 2 – Содержание ионов тяжелых металлов в природных водах реки Сож

В мг/дм³

Ионы	ПДК	Место отбора проб					
		р. Сож 1 км выше г. Гомеля		р. Сож 1 км ниже г. Гомеля		р. Сож 7 км ниже г. Гомеля	
		2009	2011	2009	2011	2009	2011
Zn ²⁺	0,01*	0,026 ±0,001	0,029 ±0,003	0,033 ±0,003	0,034 ±0,003	0,017 ±0,002	0,016 ±0,002
Cd ²⁺ (мкг/л)	5,00	0,20 ±0,024	0,20 ±0,022	0,70 ±0,071	0,70 ±0,074	0,30 ±0,034	0,30 ±0,032
Pb ²⁺	0,10	0,005 ±0,0006	0,005 ±0,0006	0,007 ±0,0007	0,007 ±0,0008	0,002 ±0,0002	0,002 ±0,0003
Cr _{общ}	0,005	0,004 ±0,0005	0,005 ±0,0005	0,006 ±0,0007	0,006 ±0,0007	0,001 ±0,0001	0,001 ±0,0001
Cu ²⁺	0,001*	0,04 ±0,005	0,05 ±0,006	0,08 ±0,010	0,08 ±0,009	0,03 ±0,003	0,03 ±0,004
Fe _{общ}	0,10*	0,35 ±0,037	0,38 ±0,033	0,52 ±0,053	0,48 ±0,050	0,24 ±0,22	0,26 ±0,024
Ni ²⁺	0,01	0,008 ±0,0007	0,007 ±0,0007	0,013 ±0,0012	0,015 ±0,0013	0,005 ±0,0004	0,007 ±0,0006

* к природному фоновому содержанию

Примечание: природное фоновое значение содержания тяжелых металлов в воде рыбохозяйственных водных объектов: Fe_{общ} – 0,380; Cu²⁺ – 0,004; Zn²⁺ – 0,016 мг/дм³.

После принятия стоков города содержание тяжелых металлов в воде реки значительно увеличилось. Так, концентрация кадмия выросла в 3,5 раза, никеля – в 1,6–2,1 раза, меди – в 1,6–2,0 раза, содержание свинца увеличилась на 40%, железа – на 37%, хрома – на 20%, цинка – на 15%. Концентрация ионов никеля в воде, отобранной в 1 км ниже городской черты, превышает ПДК на 30–50%, хрома – на 20%, содержание меди и цинка выше природных фоновых значений в 2 раза, железа общего – на 37%. Это указывает на негативное влияние поверхностных стоков с городских территорий на качество воды р. Сож.

Таким образом, вода в р. Сож ниже городской черты загрязнена ионами тяжелых металлов, и это загрязнение поликомпонентно, что не позволяет отнести ее к категории чистой воды, пригодной для рыбохозяйственной деятельности.

Повышенные концентрации металлов в воде реки могут быть не только следствием влияния загрязненных дождевых, талых, бытовых сточных вод, поступающих в реку, но и обусловлены влиянием аэрозольных выпадений поллютантов из воздушных масс города, содержащих большое количество токсичных веществ. Содержание тяжелых металлов в речной воде ниже города в 2009 г. и в 2010 г. отличалось незначительно.

В пробах воды, отобранных в районе д. Ченки, наблюдается закономерная картина существенного уменьшения содержания тяжелых металлов по мере удаления от источника загрязнения за счет так называемого эффекта разбавления сточных вод речными. Содержание ионов хрома снижается в 6 раз, свинца – в 3,5 раза, меди – в 2,7 раза, кадмия – в 2,3 раза, цинка и железа – в 2 раза.

Концентрация изучаемых металлов (за исключением кадмия) была ниже содержания их в пробах, взятых выше города. Количество всех изучаемых тяжелых металлов ниже ПДК либо фоновых концентраций. Причина резкого снижения содержания ионов-токсикантов в воде 7 км ниже города Гомеля может быть связана со значительно меньшим количеством сельхозугодий по сравнению с участком берега выше города по течению и меньшим поступлением в реку загрязнителей.

Как видно из таблицы 3, сезонные изменения концентраций изучаемых тяжелых металлов в воде р. Сож выше и ниже города не совпадают. В пробах, взятых выше города по течению, не отмечено сезонных изменений в содержании кадмия, свинца и хрома. После принятия стоков города концентрация хрома также не изменяется по сезонам, для кадмия максимальное содержание наблюдается зимой, для свинца – весной и летом. Минимальная концентрация свинца приходится на зимний период, кадмия – на осенний. Для цинка и меди в речной воде выше города отмечается синхронное изменение концентраций с максимумом содержания весной и минимумом – осенью.

Таблица 3 – Сезонные изменения содержания ионов тяжелых металлов в воде р. Сож

В мг/дм³

Ионы	Сезоны							
	Зима		Весна		Лето		Осень	
	Точка № 1	Точка № 2	Точка № 1	Точка № 2	Точка № 1	Точка № 2	Точка № 1	Точка № 2
Zn ²⁺	0,021 ±0,001	0,025 ±0,002	0,030 ±0,002	0,039 ±0,003	0,030 ±0,003	0,042 ±0,004	0,023 ±0,002	0,030 ±0,003
Cd ²⁺ (мкг/дм ³)	0,20 ±0,022	0,90 ±0,094	0,20 ±0,021	0,70 ±0,074	0,20 ±0,031	0,70 ±0,080	0,20 ±0,021	0,50 ±0,042
Pb ²⁺	0,004 ±0,0005	0,005 ±0,0006	0,005 ±0,0005	0,009 ±0,0009	0,004 ±0,0005	0,009 ±0,0008	0,005 ±0,0005	0,007 ±0,0007
Cr _{общ}	0,005 ±0,0006	0,006 ±0,0005	0,005 ±0,0006	0,006 ±0,0007	0,005 ±0,0006	0,006 ±0,0007	0,005 ±0,0005	0,006 ±0,0007
Cu ²⁺	0,04 ±0,005	0,08 ±0,0009	0,06 ±0,0007	0,11 ±0,010	0,04 ±0,006	0,04 ±0,004	0,03 ±0,003	0,09 ±0,009
Fe _{общ}	0,47 ±0,049	0,63 ±0,067	0,29 ±0,031	0,45 ±0,047	0,43 ±0,0042	0,75 ±0,0074	0,30 ±0,031	0,39 ±0,040
Ni ²⁺	0,006 ±0,0007	0,007 ±0,0008	0,007 ±0,0008	0,013 ±0,0011	0,010 ±0,0010	0,008 ±0,0009	0,009 ±0,0009	0,024 ±0,0026

Ниже города по течению сезонной динамики в содержании цинка не зафиксировано. Для меди максимальная концентрация определена весной, минимальная – летом. Только для ионов железа и никеля сезонная динамика, отмеченная в речной воде выше города, сохраня-

ется и для проб, взятых ниже города. Для железа во всех пробах максимальная концентрация приходится на зимний и летний периоды, максимальное содержание никеля отмечено в летне-осенний период, минимальное – в зимний период.

Заключение

Основными загрязнителями р. Сож в пределах Гомеля являются поверхностный сток с городской территории и сельскохозяйственных угодий, расположенных по берегам реки, а также очищенные бытовые стоки городских очистных сооружений.

Речные воды в районе г. Гомеля загрязнены нефтепродуктами (превышение ПДК в 5–6 раз), нитрит-ионами (3,0 ПДК), фосфатами (3,3 ПДК), ионами меди, цинка, хрома, никеля и железа. Состав воды с участка, расположенного в 7 км ниже г. Гомеля, приближается к нормативным значениям для водоемов рыбохозяйственного водопользования, что указывает на наличие в р. Сож достаточных водных ресурсов для разбавления загрязненных вод.

Увеличение содержания отдельных загрязнителей на участке реки в городской черте в среднем на 50–70% свидетельствует о загрязнении речной воды поверхностным стоком г. Гомеля.

Несинхронность сезонных изменений концентраций изучаемых тяжелых металлов в пробах, взятых выше и ниже города, может быть связана с различными доминирующими каналами поступления их в реку.

Литература

1. Состояние окружающей среды Республики Беларусь. Национ. доклад / М-во прир. ресур. и охр. окр. ср. РБ, Гос. научн. учр-е «Инст-т природопольз. Нац. академ. Наук Беларуси». – Минск : Белтаможсервис, 2010. – 150 с.
2. Forstner, U. Metal pollution in the aquatic environment / U. Forstner, G. Wittmann. – New York : Springer: Verlag, 1979. – P. 286–289.
3. Кузнецов, В.А. Геохимия речных долин / В.А. Кузнецов. – Минск : Наука и техника, 1986. – 303 с.
4. Новиков, Ю.В. Методы исследования качества воды водоемов / Ю.В. Новиков, К.О. Ласточкина, З.Н. Болдина. – М. : Медицина, 1990. – 400 с.
5. О внесении изменений и дополнений в постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь и Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 8 мая 2007 г. № 43/42 «О некоторых вопросах нормирования качества воды рыбохозяйственных водных объектов»: постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь и Министерства здравоохранения Республики Беларусь, 24 дек. 2009 г., № 70/139 // Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь. – 2009. – № 132. – 8/16491.
6. Состояние природной среды Беларуси. Экологический бюллетень 2009 г. / Национ. акад. наук Бел. ; под общ. ред. В.Ф. Логинова. – Минск : Минсктиппроект, 2010. – 397 с.

УДК 546.56+546.74+546.73

Использование вольтамперометрического метода в анализе биологических объектов

А.В. ХАДАНОВИЧ, В.Г. СВИРИДЕНКО, Н.И. ДРОЗДОВА

Усовершенствованные методики группового вольтамперометрического определения ионов меди, цинка, никеля, свинца и кадмия впервые позволили определить их содержание в интервале концентраций 10^{-6} – 10^{-7} моль/л в модельных растворах, почвах, растительных образцах и природных водах. Достоверность полученных результатов подтверждена методом атомно-абсорбционной спектроскопии.

Ключевые слова: медь, цинк, никель, свинец, кадмий, ионы металлов, концентрация, вольтамперометрический метод, растения, почвы.

Improved methods of group voltamperometric measuring of copper, zinc, nickel, lead and cadmium ions first allowed the definition of contents of their elements in the range of concentrations 10^{-6} – 10^{-7} moles per liter in model solutions, soils, vegetable samples and natural waters. The reliability of the results is proved by the method of atomic-absorption spectroscopy.

Keywords: copper, zinc, nickel, lead, cadmium, ions of metals, concentration, voltamperometric method, plants, soils.

Введение

Для определения микроколичеств элементов в природных объектах наряду с атомно-абсорбционным методом применяют электрохимические методы анализа, в частности, метод вольтамперометрии, с помощью которого принципиально возможно количественно определять любые соединения, способные электроокисляться или электровосстанавливаться, исследовать косвенными приемами электрохимически неактивные вещества [1]. Метод обладает высокой чувствительностью, хорошей воспроизводимостью, доступностью и значительно более низкой стоимостью оборудования (в 10–15 раз) по сравнению с атомно-абсорбционным методом. По эксплуатационным затратам данный метод не требует никакого специального оборудования, дорогих стандартных образцов или особых производственных мероприятий, нет специальных требований к прилагаемой энергии (стабилизации силового напряжения) и качеству атмосферы лаборатории (климатизации) [2]. Многие описанные в литературе методы количественного определения элементов разработаны для отдельных ионов и во многих случаях не учитывают мешающее действие сопутствующих элементов в сложных природных объектах (в почвах, водах и растениях) [3].

Цель работы: усовершенствование методик вольтамперометрии при определении микроколичеств катионов при совместном присутствии их в биологических объектах.

Объект и методы исследования

Для вольтамперометрического определения ионов металлов были использованы образцы дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почв, растения естественного фитоценоза и природные воды.

В этой связи нами выполнены исследования по совершенствованию методики группового количественного определения ионов меди, свинца, цинка, кадмия и никеля без их предварительного разделения в почвенных вытяжках и растительных образцах. Исследования проводили на полярографе ПУ-1 с применением ртутного капельного электрода (в трапециидальном режиме развертки), период капания ртути 3,2 с, скорость развертки 4 мВ/с, амплитуда 8 мВ. Потенциалы на полярограммах отнесены к потенциалу донной ртути, полярографирование проводили в интервале потенциалов от 0 до -1,3 В. В качестве индифферентного электролита использовали раствор 0,1 М хлороводородной кислоты с добавлением водного раствора аммиака при различных значениях рН. Ионы свинца определяли на фоне

0,1 М раствора хлороводородной кислоты при рН 1. Регистрировались четкие полярографические пики ионов меди, цинка и кадмия при рН 5,1. Ионы никеля восстанавливались в пределах рН 8,1–8,5, максимальная высота полярографического пика отмечалась при рН 8,1.

Экспериментальные опыты показали, что хлоридно-аммиачный фон при различных значениях рН растворов обеспечивает определение ионов меди, цинка, никеля, свинца и кадмия при одновременном присутствии их в растворе [4]. Использование хлоридно-аммиачного фона при определенном значении рН позволяет фиксировать четкие полярографические пики восстановления ионов со следующими значениями потенциалов: для меди – $-0,35$ В; для кадмия – $-0,70$ В; для никеля – $-1,08$ В; для цинка – $-1,20$ В (относительно донной ртути). Минимально определяемые концентрации составили для меди $2 \cdot 10^{-6}$; цинка – $5 \cdot 10^{-7}$; никеля – $6 \cdot 10^{-7}$; кадмия – $1 \cdot 10^{-6}$; свинца – $6 \cdot 10^{-7}$ моль/л.

Для определения основных погрешностей методики совместного вольтамперометрического определения микроколичеств исследуемых катионов при различных значениях рН фонового электролита провели анализ четырех параллельных модельных растворов, каждый из которых содержал 0,417 мкг/л ионов меди и цинка, 0,364 мкг/л ионов никеля и 0,835 мкг/л ионов кадмия. Расчет дисперсии, стандартного отклонения и доверительного интервала проводили при вероятности $P = 0,95$ [5]. Результаты расчетов свидетельствовали о достаточно высокой точности и воспроизводимости количественного определения ионов меди, цинка, никеля и кадмия, при этом доверительный интервал составил $\pm 0,011$ мкг/л; $\pm 0,012$ мкг/л при содержании меди и цинка 0,417 мкг/л; $\pm 0,028$ мкг/л при содержании кадмия 0,835 мкг/л; $\pm 0,018$ мкг/л при содержании никеля 0,364 мкг/л.

Учитывая, что в почвах и растительных объектах определению ионов меди, кадмия, никеля и цинка мешают ионы железа, так как определяемые элементы соосаждаются выпадающим гидроксидом железа, нами найдены условия определения элементов с использованием в качестве маскирующего реагента для ионов железа 0,1 М раствора аскорбиновой кислоты. Использование данного реагента практически не влияло на чувствительность определения элементов, но исключало возможность их соосаждения до рН 5,1 (рисунок 1, таблица 1).

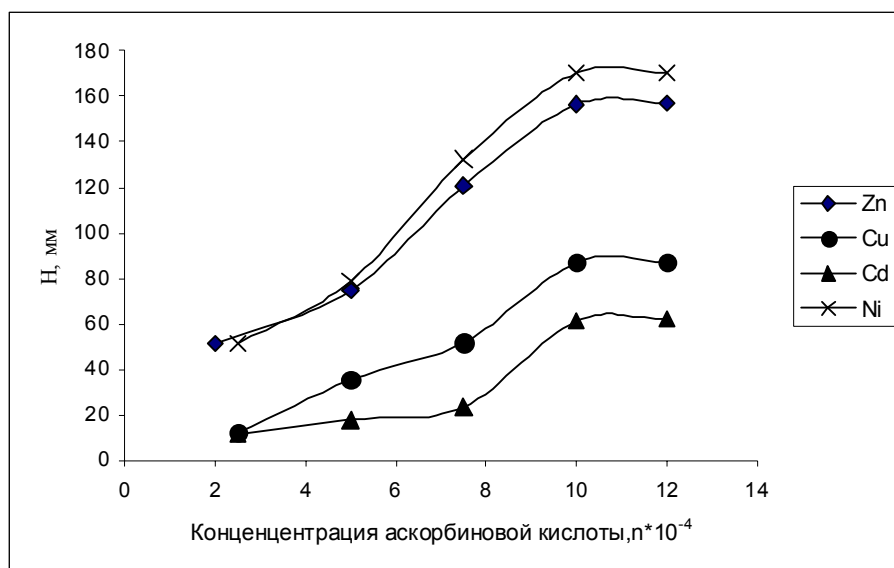


Рисунок 1 – Зависимость высоты усредненных пиков определяемых элементов от концентрации аскорбиновой кислоты

Исследуемые элементы определяли без предварительного концентрирования на 0,1 М хлоридно-аммиачном фоне в интервале рН 3–9. В присутствии аскорбиновой кислоты потенциалы восстановления ионов меди, кадмия, никеля и цинка сдвигались в более положительную область, что указывало на эффект ускорения электродного процесса восстановления комплексов ионов металлов с аскорбиновой кислотой. Полученный ход кривых можно объяснить поведением возникающих в растворе полиядерных аммиакатных комплексов металлов.

Таблица 1 – Содержание ионов железа в модельных растворах

Добавлено Fe^{3+} , моль/л $\cdot 10^{-2}$	Найдено Fe^{3+} , моль/л $\cdot 10^{-4}$	
	в присутствии 0,1 М раствора лимонной кислоты	в присутствии 0,1 М раствора аскорбиновой кислоты
2,28	$\frac{4}{2}$	— — —
3,56	$\frac{8}{4}$	$\frac{2,5}{2}$

Примечание: над чертой – 0,5 мл кислоты; под чертой – 1 мл кислоты; - – не определено.

Потенциал полуволны для ионов меди – -0,25 В; кадмия – -0,65 В; никеля – -1,05 В; цинка – -1,18 В (относительно донной ртути). Расчет дисперсии, стандартного отклонения и доверительного интервала, проведенный при вероятности $P = 0,95$ и $n = 4$, свидетельствовал о достаточной точности и воспроизводимости результатов анализа на стадии маскировки железа аскорбиновой кислотой. Относительная погрешность при введении 1 мл 0,1 М аскорбиновой кислоты не превышала 6,0%, стандартное отклонение составило в среднем $\pm 0,035$ мкг/л. Таким образом, оптимальным фоном для определения указанных элементов являлся хлоридно-аммиачный раствор с добавлением $1 \cdot 10^{-4}$ моль/л аскорбиновой кислоты при pH 5,1–8,1.

С целью определения случайной составляющей погрешности методики на стадии устранения мешающего действия ионов железа (III) были проведены исследования на модельных растворах, содержащих $2,28 \cdot 10^{-2}$ – $5,18 \cdot 10^{-2}$ моль/л ионов железа (III). Для каждой концентрации проведено пять измерений. Установлено, что введение 1 мл 0,1 М раствора аскорбиновой кислоты полностью исключало влияние ионов железа (III) на количественное определение ионов меди, цинка, кадмия и никеля. Полярограммы не искажались при соотношении концентраций медь : цинк = 500:1; цинк : медь = 100:1; медь : кадмий = 250:1; кадмий : медь = 300:1; никель : цинк = 250:1; цинк : никель = 500:1.

Результаты и их обсуждение

Полученные результаты вольтамперометрического определения ионов меди, свинца, цинка, кадмия и никеля при совместном присутствии были подтверждены их количественным определением методом атомно-абсорбционной спектроскопии (таблица 2). На основании полученных данных был разработан проект методики вольтамперометрического определения исследуемых элементов, включающий стадии перевода озоленного остатка в жидкую фазу и полярографирование аликвотных частей раствора на индифферентных фонах. Методика была апробирована для определения содержания ионов металлов в почвах (таблица 3). Для определения ионов металлов в почве использовали неселективные экстрагенты (раствор 1 н соляной кислоты и ацетатно-аммонийный раствор с pH 4,8).

Таблица 2 – Определение ионов меди, кадмия, никеля и цинка на хлоридно-аммиачном фоне вольтамперометрическим методом в модельных растворах (pH 4,2–5,1; $n = 5$; $P = 0,95$)

Элемент $\cdot 10^4$	Введено, моль/л	Найдено, моль/л	
		Вольтамперометрический метод	Атомно-абсорбционный метод
Медь	1,33	$1,32 \pm 0,12$	1,34
	2,67	$2,64 \pm 0,14$	2,60
	2,20	$2,22 \pm 0,12$	2,22
Кадмий	3,30	$3,31 \pm 0,24$	3,33
	5,30	$5,30 \pm 0,25$	5,53

Цинк	2,40	$2,39 \pm 0,11$	2,42
	4,20	$4,02 \pm 0,32$	4,03
	5,90	$5,72 \pm 0,44$	5,75
Никель	1,10	$1,03 \pm 0,12$	1,06
	2,60	$2,41 \pm 0,24$	2,43
	6,20	$6,07 \pm 0,52$	6,10

Таблица 3 – Содержание ионов свинца, меди, кадмия и цинка в почве (мг/кг, n = 4, P = 0,95)

Вольтамперометрический метод	Атомно-абсорбционный метод
Медь	
152 ± 4	150
152 ± 9	150
Кадмий	
$0,34 \pm 0,06$	0,31
$0,61 \pm 0,05$	0,66
Цинк	
$27,3 \pm 2,0$	26,2
$36,9 \pm 1,2$	38,5
Свинец	
$16,3 \pm 0,3$	15,7
$19,7 \pm 0,8$	18,7

Проведено количественное определение меди, цинка и никеля в растительном материале (таблица 4).

Растительный образец массой 5 г озоляли в муфельной печи при температуре красного каления (550–600°C). Озоленный остаток обрабатывали на песчаной бане 2 мл азотной и 3 мл соляной концентрированными кислотами, выпаривали до исчезновения оксидов азота, сухой остаток растворяли в 0,1 М растворе соляной кислоты. Получали четкие полярограммы для меди – -0,35 В, для свинца – -0,6 В. Затем раствор нейтрализовали раствором 0,1 М гидроксида аммония до pH 5,1 и фиксировали полярографический пик цинка – -1,18 В. При pH 8,1 на предлагаемом фоне никель восстанавливался с пиком – -1,08 В.

Таблица 4 – Совместное определение меди, никеля и цинка в растениях естественного фитоценоза (n = 4; P = 0,95)

Растение	Содержание элементов, мг/кг		
	Медь	Никель	Цинк
Мятлик луговой	$1,7 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,1$	$14,8 \pm 1,8$
	1,6	1,5	14,5
Лапчатка гусиная	$2,6 \pm 0,5$	$3,2 \pm 0,2$	$30,6 \pm 2,4$
	2,5	3,5	30,2
Клевер ползучий	$1,7 \pm 0,08$	$1,5 \pm 0,1$	$27,5 \pm 2,3$
	1,8	1,6	27,0
Подорожник большой	$1,8 \pm 0,2$	$2,1 \pm 0,1$	$17,2 \pm 1,4$
	1,6	2,0	17,0
Ромашка непахучая	$2,6 \pm 0,1$	$3,4 \pm 0,2$	$10,5 \pm 0,8$
	2,5	3,5	10,5

Относительная ошибка вольтамперометрического определения в растительных образцах по меди составила 6,4%; по цинку – 5,7%; по никелю – 6%.

Усовершенствованную методику одновременного определения исследуемых катионов применили для их анализа в природных водах (таблица 5).

Таблица 5 – Совместное полярографическое определение меди, свинца, кадмия и цинка в природных водах (мкг/л, $n = 4$; $P = 0,95$)

Элемент	Полярографический метод			ААС	
	$x_{\text{ср}} \pm \Delta x$	S_r	Относительная ошибка, %	$x_{\text{ср}}$	Относительная ошибка, %
Медь	$2,41 \pm 0,05$	0,02	2,2	2,38	3,5
Свинец	$1,11 \pm 0,02$	0,02	2,3	1,07	2,9
Цинк	$45,28 \pm 0,83$	0,01	1,8	45,02	1,8
Кадмий	$0,14 \pm 0,01$	0,08	8,1	0,13	7,9

Ошибка определения находилась в пределах, допустимых полярографическим методом анализа (10%).

На основе усовершенствованных методик группового определения микроколичеств ионов металлов были выполнены исследования по определению концентрационных интервалов при поглощении их почвой и транслокации в системе почва-растение.

Заключение

Разработаны методические решения для количественного определения ионов металлов в природных объектах путем применения хлоридно-аммиачного фона при различных значениях pH растворов, маскировки ионов железа аскорбиновой кислотой, без предварительного отделения компонентов при совместном присутствии в растворах, исключающих использование приемов экстракции органическими растворителями. Усовершенствованную методику применяли для количественного определения ионов металлов в почвах, растительных образцах и природных водах.

Усовершенствованные методики группового вольтамперометрического определения ионов меди, цинка, никеля, свинца и кадмия впервые позволили определить их содержание в интервале концентраций 10^{-6} – 10^{-7} моль/л в модельных растворах, почвах, растительных образцах. Достоверность полученных результатов подтверждена методом атомно-абсорбционной спектроскопии.

Литература

1. Свириденко, В.Г. Вольтамперометрическое определение тяжелых металлов в природных и биологических объектах / В.Г. Свириденко, Н.И. Дроздова, Е.Л. Зыкова // Аналитика и аналитики : каталог реф. и стат. Междун. форум, Воронеж, 2–6 июня 2003 г. : в 3 т. / Ворон. гос. технол. акад. ; редкол. Я.И. Коренман. – Воронеж, 2003. – Т. 1. – С. 217.
2. Долежал, Я. Полярографический анализ минерального сырья / Я. Долежал, Й. Мусий ; под ред. Я. Долежал. – М. : Мир, 1980. – 262 с.
3. Ладонин, Д.В. Конкурентные взаимоотношения ионов при загрязнении почвы тяжелыми металлами / Д.В. Ладонин // Почвоведение. – 2000. – № 11 – С. 1285–1293.
4. Хаданович, А.В. Применение вольтамперометрии в изучении перехода ионов меди, никеля, цинка в системе почва – растения / А.В. Хаданович, В.Г. Свириденко, Ю.А. Пролесковский // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. Биология. – 2007. – № 6(45). – С. 101–108.
5. Дерффель, К. Статистика в аналитической химии / К. Дерффель ; под ред. Ю.П. Адлера. – М. : Мир, 1994. – 267 с.

Сорбционные свойства препаратов бинарных ферроцианидов железа и цинка на угольной матрице

В.А. Шумилин, В.А. СОбченко

Изучены сорбционные свойства препаратов бинарных ферроцианидов железа и цинка на матрице древесного активированного угля. Приводится анализ ИК-Фурье спектров, результатов рентгено-структурного анализа, а также экспериментальные результаты исследований по блокированию радионуклидов цезия в модельном водно-солевом растворе. Высказано предположение о различном фазовом состоянии бинарных препаратов в зависимости от намечаемого массового соотношения ферроцианидов цинка и железа в процессе синтеза.

Ключевые слова: бинарные ферроцианиды железа и цинка, активированный уголь, водно-солевой раствор, сорбция ^{137}Cs , коэффициент распределения, локальные дефектные структуры.

The sorption properties of iron and zinc binary ferrocyanides in the matrix of wood activated carbon are analyzed in the article. It provides the analysis of the IR-Fourier spectra, the results of x-ray structural analysis, as well as experimental research results in the blocking of cesium radionuclides in the modeling of water-salt mortar. There is suggested a different phase state of the binary drugs depending on the intended mass ratio of zinc and iron ferrocyanides in the process of synthesis.

Keywords: binary iron-zinc ferrocyanides, activated carbon, water-salt solution, ^{137}Cs sorption, distribution coefficient, local defective structures.

Введение

В исследованиях по созданию новых типов цезий избирательных сорбционных материалов достаточно широко представлены технологические подходы по формированию матричных препаратов на основе ферроцианидов переходных металлов. В качестве матриц использовались природные алюмосиликаты [1], [2], гидроксид циркония [3], гидратированный диоксид титана [4], древесная целлюлоза [5], [6], металлосодержащие углеродные волокна [7], синтетические и искусственные полимерные материалы [8]. Несмотря на широкий ассортимент применяемых матриц, объединяющим в указанных работах является использование моноформ активного начала в виде нормальных ферроцианидов железа, меди, цинка, никеля, кобальта или их смешанных солей с калием.

Возможность синтеза бинарных ферроцианидов, т. е. препаратов, содержащих два переходных металла, была показана еще в монографии [9]. В нашей недавней работе [10] были изучены сорбционные свойства бинарных ферроцианидов железа и меди, сформированных на древесном активированном угле. В этой связи, представляла интерес оценка указанных свойств для аналогичных железо-цинковых препаратов, учитывая, что средние ферроцианиды цинка и смешанные соли с калием проявляют высокую сорбционную активность в отношении ионов цезия [11]–[13].

Материалы и методы

В качестве матрицы в наших исследованиях был использован древесный активированный уголь с фракцией 50–100 мкм, навески которого вводили в колбу на магнитной мешалке с титрованными 0,01 М растворами смеси ионов Fe^{3+} и Zn^{2+} , после чего в суспензию быстро заливали эквимолекулярное количество раствора ферроцианида лития. После разделения фаз образцы сушили при естественной влажности; маточные растворы контролировали на отсутствие качественных реакций по соответствующим ионам. В результате были получены препараты бинарных средних ферроцианидов с массовой долей $\text{Zn}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ в интервале 0÷100% (соответственно 100÷0% по отношению к $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$). Кроме того, получали аналогичную группу препаратов, в которых после формирования бинарных ферроцианидов на поверхности угля в суспензию вводили раствор хлорида калия и таким образом проводили модифицирование.

Состав водно-солевого раствора, методика сорбционного статического контакта и определения коэффициентов распределения ионов ^{137}Cs описаны в работе [14].

Изучение морфологии и дисперсности частиц проводили на сканирующем электронном микроскопе «VEGA II» LSH фирмы TESCAN (Чехия). Токопроводимость образцов обеспечивалось нанесением покрытия на основе золота с помощью установки ионной металлизации JFC-1100 фирмы JEOL (Япония).

Для исследования применялся метод молекулярной спектроскопии в ИК-области спектра. Образцы отбирались пинцетом под микроскопом «МБС-10». Спектры получали на ИК-Фурье спектрофотометре «FTIR-8601 PC» фирмы «SHIMADZU» с алмазной кюветой «5^x beam condenser, p/n 8950 series» фирмы «Graseby спесас» с разрешением 8 см^{-1} (аподизация Хаппа – Гензеля) после усреднения накопленных спектрограмм, содержащих 64 сканирования. Спектры были записаны в диапазоне $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$ при использовании DTGS-детектора.

Фазовый состав препаратов изучали методом рентгенофазового анализа с помощью дифрактометра «ДРОН 4-13». Излучение рентгеновской трубки – $\text{CoK}\alpha$; фильтр – Fe; монохроматор – отсутствует; $U = 40\text{ кВ}$; $I = 25\text{ мА}$; образец не вращался. Регистрация общего спектра проводилась в интервалах углов 2θ : $10,00\text{--}80,00$ с шагом $0,1^\circ$.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 представлен фрагмент частицы древесного активированного угля с иммобилизованными частицами бинарного ферроцианида $n\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3 \times m\text{Zn}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$, которые локализуются на внутренней и торцевой поверхности сосудов в виде частиц размером $0,5\text{--}2\text{ мкм}$.

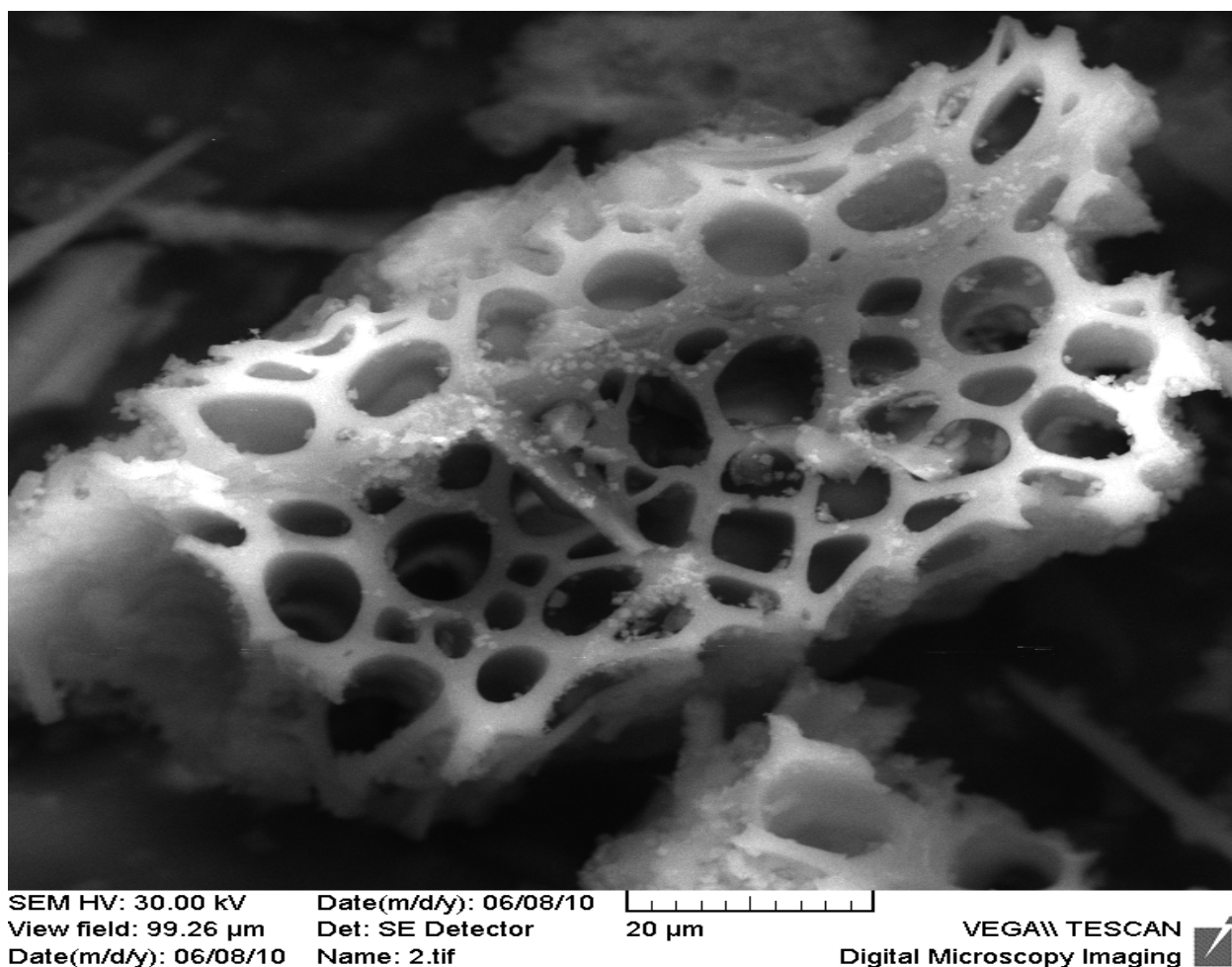


Рисунок 1 – Электронно-микроскопическое изображение фрагмента частицы древесного активированного угля с иммобилизованным препаратом бинарного ферроцианида

По результатам исследований установлено, что наиболее высокий коэффициент распределения имеют препараты с массовой долей ферроцианида цинка в бинарном ферроцианиде 45–55% ($K_d(^{137}\text{Cs}) = 10^6 \text{ см}^3/\text{г}$) в пересчете на активное начало, что значительно превосходит показатель $K_d(^{137}\text{Cs}) = 3,4 \cdot 10^4$ для известного препарата «Ферроцин». Наибольшие величины коэффициентов распределения ($K_d = 1,4 \cdot 10^6 \text{ см}^3/\text{г}$) получены для модифицированных ионами калия препаратов с массовой долей ферроцианида Zn около 45%, что соответствует структуре $2 \text{ Zn}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6] \cdot \text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$.

Если предположить, что в процессе синтеза формируется простая смесь ферроцианидов железа и цинка, то должен выполняться принцип аддитивности, т. е. коэффициент распределения ^{137}Cs в любой точке равен сумме вкладов компонентов в зависимости от массовой доли каждого из них. Полученные нами экспериментальные значения $K_d(^{137}\text{Cs})$ оказались достоверно выше. На рисунке 2 показаны величины коэффициента нарушения аддитивности $\alpha = K_d^{\text{эксп}}/K_d^{\text{расч}}$.

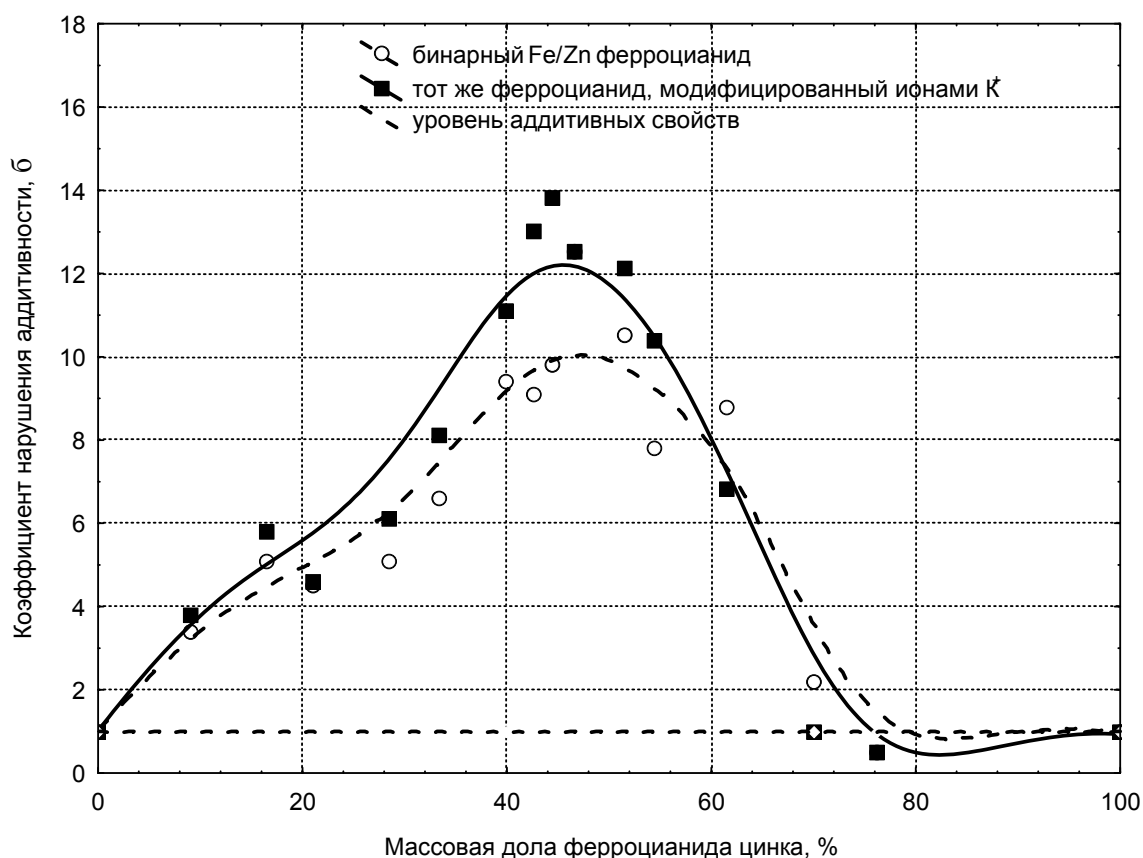


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента нарушения аддитивности от массовой доли ферроцианида цинка в бинарном железо-цинковом ферроцианиде

В области валентных колебаний нитрильной группы на ИК-Фурье спектрах образца состава $2\text{Zn}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6] \cdot \text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ наблюдается ярко выраженный синглет в области 2110 см^{-1} (рисунок 3), который по своему значению не характерен для отдельных препаратов (2090 см^{-1} и 2135 см^{-1} для ферроцианидов цинка и железа соответственно [9]).

Как показали рентгеноструктурные исследования (рисунок 4), пики дифракции образца бинарного ферроцианида железа и цинка имеют области (на рисунке помечены стрелками), не характерные для отдельных препаратов ферроцианидов цинка и ферроцианидов железа, т. е. не наблюдается суперпозиции, установленной для аналогичных препаратов железа и меди [10].

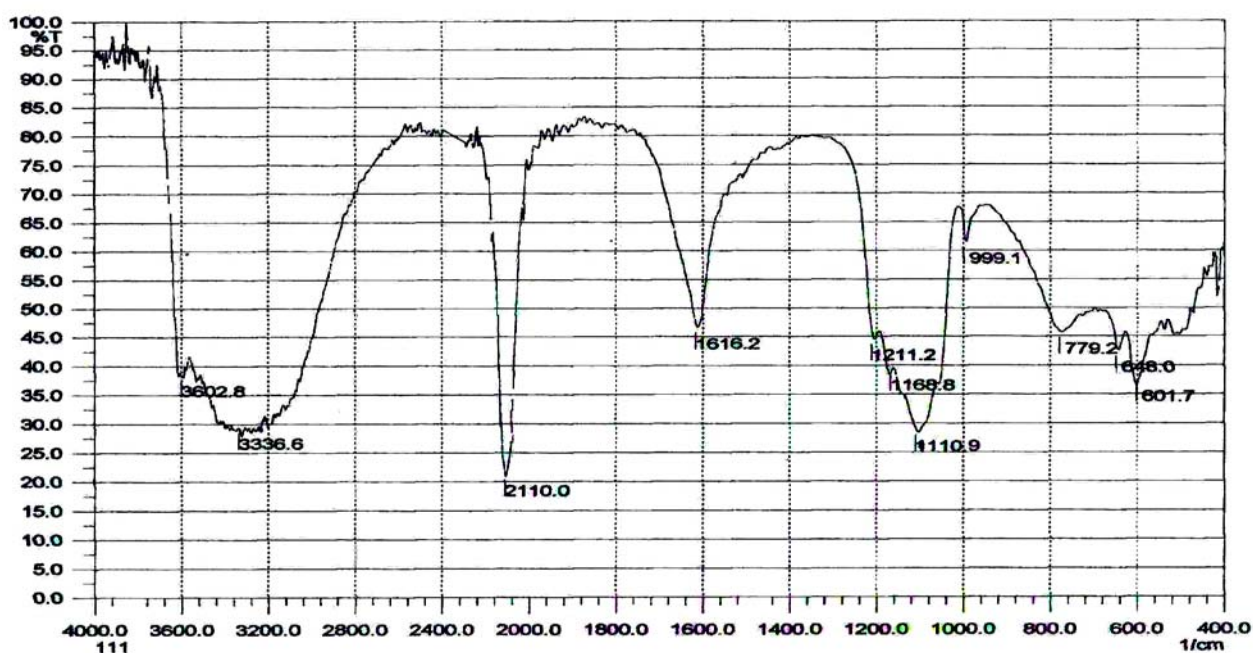


Рисунок 3 – ИК-Фурье спектр образца
 $2\text{Zn}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6] \cdot \text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$

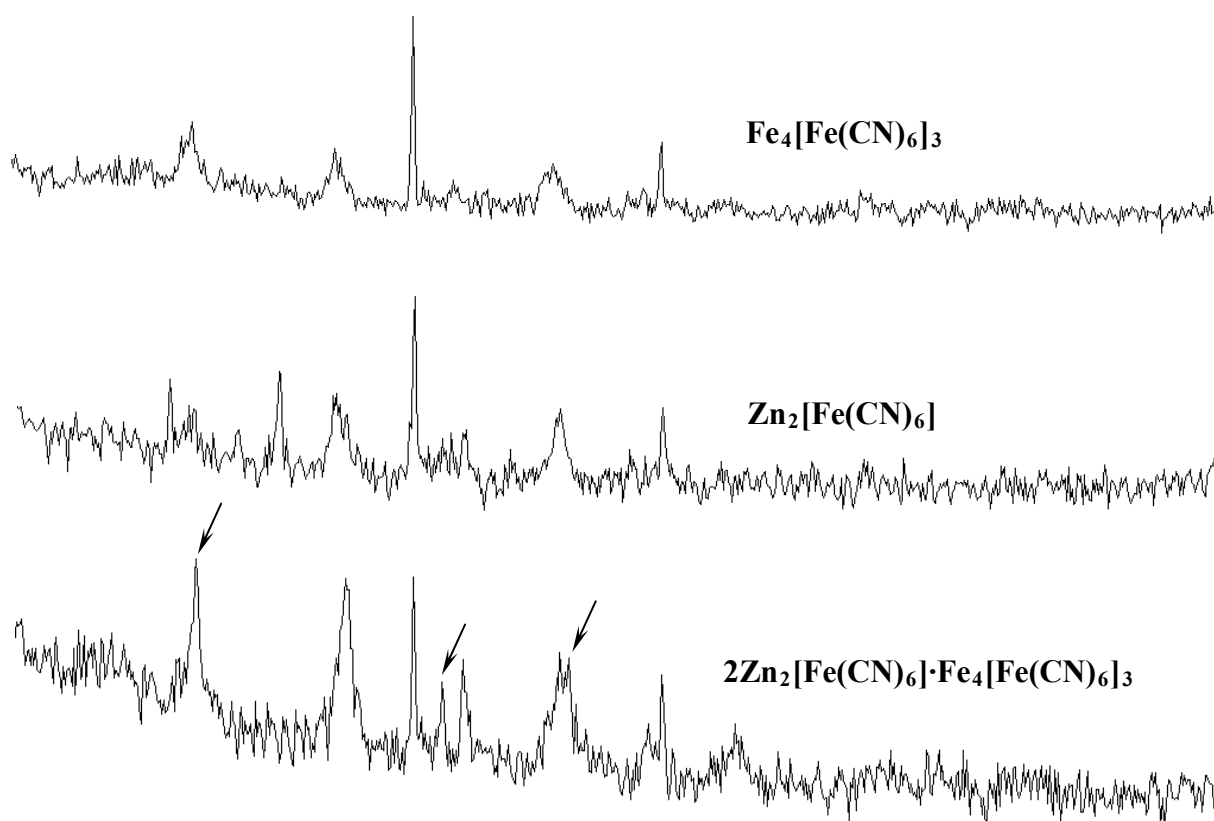


Рисунок 4 – Общий вид дифрактограмм
 образцов ферроцианидов

Следует отметить, что дифракционные пики бинарного ферроцианида цинка и железа являются более размытыми, чем дифракционные пики ферроцианида цинка и ферроцианида железа в отдельности, что указывает на снижении степени кристалличности препарата бинарного ферроцианида.

Заключение

Обобщенный анализ результатов исследований позволяет сделать вывод о том, что эффективность блокирования ионов ^{137}Cs изученными бинарными ферроцианидами цинка и железа в модельных водных системах определяется формированием локальных дефектных структур, обладающих высокой селективностью к поглощению ионов радионуклида. Это условие может быть обеспечено внедрением в решетку гетероатомов, в качестве которых выступают атомы цинка.

Литература

1. Нестеренко, В.С. Эффективность использования синтетического углеродно-минерального сорбента при комбинированных радиационно-термических поражениях / В.С. Нестеренко, Л.Н. Рачковская, Р.С. Будагов // Эксперим. клин. фармакол. – 1995. – Т. 58, № 5. – С. 65–67.
2. Ставицкая, С.С. Оценка селективности сорбции ионов токсичных металлов композиционным сорбентом «Ультрасорб» и его компонентами / С.С. Ставицкая, В.В. Стрелко, Б.М. Викарчук // Эфферентная терапия. – 2001. – Т. 7, № 1. – С. 60–63.
3. Шарыгин, Л.М. Структура и свойства селективного к цезию гранулированного неорганического катионообменника / Л.М. Шарыгин, А.Ю. Муромский, М.Л. Калягина // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2006. – Т. 6, вып. 6. – С. 965–971.
4. Воронина, А.В. Оценка статических характеристик ферроцианидов на основе гидратированного диоксида титана марки «Термоксид-5» / А.В. Воронина, Е.В. Ноговицына, Н.Д. Бетенеков // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2006. – Т. 6, вып. 6. – С. 960–964.
5. Ремез, В.П. Целлюлозно-неорганические сорбенты в радиохимическом анализе. I. Перспективные сорбенты для радиохимического анализа / В.П. Ремез, В.И. Зеленин, А.Л. Смирнов // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2009. – Т. 9, вып. 5. – С. 627–632.
6. Ремез, В.П. Целлюлозно-неорганические сорбенты в радиохимическом анализе. II. Синтез и свойства сорбента АНФЕЖ® / В.П. Ремез, В.И. Зеленин, А.Л. Смирнов // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2009. – Т. 9, вып. 5. – С. 739–744.
7. Авраменко, В.А. Строение и свойства ферроцианидных сорбентов на основе металлсодержащих углеродных волокон / В.А. Авраменко, В.В. Железнов, Т.А. Сокольниковская // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2006. – Т. 6, вып. 6. – С. 899–904.
8. Тиньгаева, Е.А. Синтез и свойства органоминеральных сорбентов / Е.А. Тиньгаева, М.В. Зильберман // ЖПХ. – 2005. – Т. 78, вып. 9. – С. 1440–1443.
9. Тананаев, И.В. Химия ферроцианидов / И.В. Тананаев, Г.Б. Сейфер. – М. : Наука, 1971. – 320 с.
10. Шумилин, В.А. Формирование и сорбционные свойства препаратов бинарных ферроцианидов железа и меди на угольной матрице / В.А. Шумилин, В.А. Собченко // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2011. – № 4(67). – С. 195–199.
11. Vlasselaer, S. Caesium ion exchange equilibrium on potassium-zinc-hexacyanoferrate (II) $\text{K}_2\text{Zn}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]_2$. Selectivity for alkalis / S. Vlasselaer, W. D’Olieslager, M. D’Hont // J. Radioanal. Chem. – 1977. – Vol. 35, № 1. – P. 211–222.
12. Shoichi, K. Preparation and ion-exchange behavior of potassium zinc ferrocyanide / K. Shoichi, K. Katsumi, I. Masami // Bull. Chem. Soc. Japan. – 1969. – Vol. 42, № 10. – P. 3003–3004.
13. Вольхин, В.В. Сорбционные свойства ферроцианидов двухвалентных переходных металлов / В.В. Вольхин // Изв. АН СССР. Неорг. материалы. – 1979. – Т. 16, № 6. – С. 1086–1091.
14. Корытко, О.В. Структура и ионообменные свойства комбинированных ферроцианидов переходных металлов / О.В. Корытко, Ю.А. Пролесковский, В.А. Шумилин // Свиридовские чтения : сб. статей. – Минск : изд-во БГУ, 2005. – Вып. 2. – С. 34–39.

Экология

УДК 636.596:619:546.48:636.596

Характер и закономерности накопления свинца в тканях и органах птиц и выведение его из организма в условиях эксперимента

Е.Г. Тюлькова, М.Е. Никифоров

В статье исследуются характер и закономерности накопления свинца – одного из наиболее распространенных и опасных токсикантов – в костях, почках, печени, мышцах, сердце, перьях сизых голубей при экспериментальном скармливании различных доз металла с кормом, а также особенности его выведения из организма птиц с экскрементами. Путем сравнения с контрольной группой птиц выявлены наибольшие уровни накопления данного элемента в костях и новом оперении птиц и превышение содержания свинца в экскрементах птиц показателей накопления в органах, тканях и покровах.

Ключевые слова: биоиндикация, птицы, свинец, эксперимент, накопление, корм, органы и ткани, перья, экскременты.

The article investigates the character and laws of lead accumulation being one of the most widespread and dangerous pollutants in bones, kidneys, liver, muscles, heart, feathers of blue rock pigeons at experimental receipting of various doses of metal with forage, and also features of its deducing from bird's organism with excrement. Comparing with control group of birds the greatest levels of element accumulation in birds' bones and new plumage, as well as excess of lead in excrement of accumulation indicators in bodies, muscles and coverings are revealed in the article.

Keywords: bioindication, birds, lead, experiment, accumulation, forage, bodies and fabrics, feathers, excrement.

Введение

Разработка и совершенствование путей и методов использования биоиндикаторов для оценки и мониторинга последствий техногенного химического загрязнения окружающей среды приобретает все большую актуальность как в связи с ростом антропогенного воздействия на природные экосистемы, так и по причине отсутствия в настоящее время надежных методов получения интегрированных показателей, характеризующих такие последствия.

В результате исследований в антропогенном ландшафте установлены диапазоны возможных уровней содержания тяжелых металлов в организме птиц [1]–[5]. Однако является не выясненным, как конкретно уровни накопления токсикантов в органах и тканях птиц связаны с содержанием их в среде обитания. В этой связи особенно актуальным представляется использование комплексного подхода к исследованию органов и тканей птиц в условиях эксперимента при известных концентрациях модельных тяжелых металлов в корме и выяснение закономерностей накопления, распределения и выведения токсикантов из организма, что в совокупности необходимо для установления корреляционных связей и регрессионных зависимостей в системе «природная среда – вид-индикатор» и обоснования индикационных свойств этой группы животных.

Материал и методы исследования

Эксперимент по определению характера накопления и выведения свинца в организме птиц был осуществлен для выяснения количественных показателей депонирования элемента в функционально различных органах и тканях, а также баланса «накопление-выведение» при

разных концентрациях токсиканта в корме. Выбор свинца в качестве модельного загрязнителя для экспериментальных работ мотивировался значительным его присутствием и концентрациями в выбросах, продуцируемых при работе отдельных отраслей промышленности и транспорта, высокой токсичностью, а также способностью в сравнительно малых количествах вызывать гибель или аномалии развития, в том числе и на эмбриональном уровне.

Основным источником поступления свинца в окружающую среду является стекольная промышленность, на долю которой приходится около 88,1% общего объема выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и поверхностные воды [6]. Свой вклад в загрязнение окружающей среды свинцом вносят машиностроение и металлообработка, а также черная металлургия (4,0% и 3,5% выбросов загрязнителей соответственно). На долю транспорта приходится 0,7% общего объема выбросов токсикантов. Свинец поступает в окружающую среду в виде сульфатов, сульфидов, пыли, шламов. Кроме того, металлический свинец поступает в природные местообитания в виде свинцовой охотничьей дробы, накапливается на дне водоемов и часто попадает в пищеварительный тракт водоплавающих птиц.

В эксперименте использовались сизые голуби городской популяции г. Минска. Выбранные объекты предположительно в наибольшей степени подвержены риску загрязнения тяжелыми металлами в связи с обитанием в урбанизированном ландшафте.

Всего было сформировано 7 групп птиц: 1-я – контрольная, 2–7-я – опытные. Каждая группа состояла из 3 птиц. В начале эксперимента были извлечены перья птиц: по 4 рулевых и по 2 маховых с каждой стороны.

Во время эксперимента каждую птицу содержали отдельно. Свинец вводили с хлебом в виде растворов соли $Pb(CH_3COO)_2 \times 3H_2O$. Размеры скармливаемых доз рассчитывались на элемент исходя из установленных ветеринарно-санитарными нормами по безопасности кормов и кормовых добавок размеров предельно допустимых концентраций (5 мг/кг корма) с учетом средней массы корма, ежедневно съедаемого птицей. При совместном со свинцом скармливании кадмий вводили в виде раствора соли $CdCl_2 \times 2,5H_2O$ в дозах 10 Cd – 0,28 мг и 20 Cd – 0,57 мг. Исходя из этого доза 1 Pb составила 0,32 мг свинца, 5 Pb – 1,6 мг свинца, 10 Pb – 3,2 мг свинца, 20 Pb – 6,4 мг свинца, 10+10 – 3,2 мг свинца и 0,28 мг кадмия, 20+20 – 6,4 мг свинца и 0,57 мг кадмия.

Контрольная группа птиц получала во время эксперимента только корм; птицы 2–7-й опытных групп получали с хлебом растворы солей различных концентраций свинца и кадмия. Птицы 2-й группы получали с хлебом раствор соли, содержащий 1 дозу ПДК по свинцу, 3-й группы – дозу, превышающую ПДК по свинцу в 5 раз, 4-й группы – дозу, превышающую ПДК по свинцу в 10 раз, 5-й группы – дозу, превышающую ПДК по свинцу в 20 раз. Аналогичным образом скармливались совместные дозы свинца и кадмия, превышающие ПДК в 10 и 20 раз.

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

Ежедневно осуществлялся сбор экскрементов для анализа от каждой опытной и контрольной группы птиц.

Свинец отдельно и совместно с кадмием прекратили вводить в рацион в момент времени, когда на месте извлеченных перьев сформировались новые, которые также были извлечены (время эксперимента – 45 дней). Кроме того, в конце эксперимента были извлечены также и старые перья птиц по такой же схеме, как и перья до начала эксперимента. По окончании введения свинца отдельно и совместно с кадмием птицы были усыплены, а их органы и ткани (перья, печень, почки, сердце, мышечная и костная ткани) подверглись исследованиям.

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

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

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

Всего проанализировано 110 проб органов и тканей сизого голубя, 70 проб экскрементов и определены коэффициенты накопления свинца как отношение содержания элемента в сыром веществе внутренних органов и экскрементов, а также костях и перьях к общему количеству свинца, поступившего с кормом, выраженное в процентах. Достоверность различий между содержанием свинца в органах и тканях птиц экспериментальных и контрольной группы оценивалась методом дисперсионного анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты определения содержания свинца в организме сизых голубей, которым в эксперименте скармливались различные дозы свинца, представлены в таблице 1. Как следует из данных таблицы, накопление свинца различными органами и тканями птиц происходит неравномерно при различном количестве элемента, вводимого с кормом. Наибольшие уровни накопления свинца при всех его дозах в корме обнаружены в костях, что, возможно, связано с их депонирующей микроэлементной функцией. Следует отметить, что по мере увеличения количества свинца в корме от 1 до 20 доз уровни накопления его в костях также закономерно возрастали.

Таблица 1 – Содержание свинца в тканях и внутренних органах сизого голубя

Количество доз свинца	Содержание свинца, мкг/г сухого вещества				
	кости	почки	печень	мышцы	сердце
1 Pb	10,936±0,0212	0,211±0,0004	0,056±0,0002	0,171±0,0004	0,025±0,0007
5 Pb	12,801±0,0194	1,372±0,0031	0,539±0,0007	0,039±0,0002	0,019±0,0003
10 Pb	20,759±0,0311	1,901±0,0026	0,732±0,0013	0,071±0,0009	0,015±0,0001
20 Pb	31,741±0,0254	6,258±0,0137	2,404±0,0028	0,150±0,0007	0,091±0,0002
10 Pb + 10 Cd	27,627±0,0804	2,155±0,0081	0,931±0,0031	0,068±0,0005	0,014±0,0004
20 Pb + 20 Cd	28,375±0,0546	6,208±0,0094	2,728±0,0078	0,114±0,0003	0,055±0,0017
контроль	5,064±0,0159	0,142±0,0003	0,064±0,0005	0,016±0,0001	0,025±0,00003

Подтверждением депонирующей функции костной ткани может быть еще и то, что уровень содержания свинца в костях даже контрольной группы птиц был достаточно высок. Как ранее уже было сказано, птицы для эксперимента были взяты из городской среды, и это объясняет такие существенные изначальные уровни содержания свинца в их костях.

Что касается других исследованных органов и тканей, то в сердце и мышцах не проявлялось четкой зависимости величины накопления от количества поступающего в организм токсиканта. При максимальных скармливаемых дозах 20 Pb уровни накопления были в 2–3 раза выше, чем при средних дозах 5 Pb и 10 Pb. Но при этом накопление при средних дозах не превышало показаний ни в контроле, ни при минимальной дозе скармливания 1 Pb. Можно было предположить, что в данном случае проявляется существование какого-то порогового уровня, до которого проникновение свинца блокируется в организме. Однако такое предположение требует более глубокой экспериментальной проверки.

Иная ситуация прослеживается с накоплением свинца органами выделительной системы. В пределах градиента задаваемой концентрации в корме 1–20 Pb происходило закономерное увеличение содержания токсиканта в печени и почках. При этом абсолютные показатели накопления в почках примерно в 2–2,5 раза были выше, чем в печени.

В целом, установлено увеличение содержания свинца в костях в 2,2–9,2 раза по сравнению с контролем, в почках – в 1,5–44,1 раза, в печени – в 0,9–37,6 раза, в мышцах – в 9,4–10,7 раза, в сердце – в 3,6 раза.

Анализ содержания свинца в исследуемых органах и тканях при совместном скормлинии свинца с кадмием свидетельствует, что добавление к 10 и 20 дозам свинца 10 и 20 доз кадмия привело к росту содержания свинца в печени; некоторое снижение отмечалось в сердце и мышечной ткани. Почки и кости продемонстрировали неравномерную тенденцию изменения концентрации свинца по мере роста содержания в корме свинца и кадмия: после концентрации в 10 доз ПДК по двум элементам дальнейшего увеличения содержания свинца не происходило по сравнению с введением только 10 доз свинца с кормом, а наблюдалось даже его незначительное снижение.

Таким образом, только в печени сизого голубя было отмечено некоторое увеличение накопления свинца при совместном скормлинии с кадмием по сравнению с вариантом, когда скормливался только один свинец. Во всех других исследованных органах и тканях не выявлено однозначных зависимостей накопления свинца от изменения токсического воздействия на организм при совместном введении свинца с кадмием.

Перьевой покров птиц в плане накопления тяжелых металлов представляет особый интерес. Прежде всего, это обусловлено его сменяемостью. Все птицы в течение года один или несколько раз линяют, заменяя весь перьевой покров или его часть. Учитывая мобильность птиц, способность активно перемещаться не только в пределах индивидуального участка обитания, иногда весьма значительного по площади, но и на очень дальние расстояния в процессе кормовых и сезонных миграций, условия отрастания новых перьев могут быть очень различными по содержанию тяжелых металлов в корме и в окружающей среде.

Исходя из вышесказанного, в экспериментальных условиях при задаваемой концентрации модельного тяжелого металла в корме представляло интерес исследование как старых перьев, выросших до начала дозированного скормливания токсиканта, так и новых перьев, выросших за период эксперимента на месте удаленных. Результаты исследований приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Содержание свинца в перьях сизого голубя

Количество доз свинца	Содержание свинца в перьях, мкг/г сухого вещества	
	новых	старых после эксперимента
1 Pb	0,236±0,0004	1,057±0,0029
5 Pb	1,041±0,0026	1,885±0,0055
10 Pb	3,477±0,0047	5,786±0,0080
20 Pb	20,856±0,0116	6,576±0,0148
10 Pb +10 Cd	4,852±0,0129	2,985±0,0120
20 Pb +20 Cd	12,741±0,0131	6,615±0,0655
контроль	0,039±0,0001	0,054±0,0002

Из данных таблицы 2 видно, что в зависимости от начального уровня, т. е. от контроля, скормливание дозы, 5-кратной ПДК, приводило к увеличению содержания металла в новом перье примерно в 27 раз, 10-кратной дозы – в 89 раз и 20-кратной – в 535 раз. Однако начальное загрязнение перьев свинцом несколько различалось, что отмечено даже на контрольных птицах. Это оказывает определенное влияние на результат при расчете кратности увеличения уровня накопления в эксперименте, но не влияет на выявление общей тенденции увеличения свинца в перье при увеличении скормливаемой дозы.

В старых перьях в процессе эксперимента количество свинца также возросло по сравнению с контролем, т. е. перьями до начала экспериментального кормления токсикантом. Показательна особенность динамики накопления, обнаруживаемая при сравнении новых, отрастающих в период эксперимента, и старых перьев. Как в одних, так и в других перьях удельное содержание свинца возрастало в ряду увеличения скормливаемой дозы. Однако уровни нако-

пления имели явные различия. Для старых перьев характерно постепенное и равномерное возрастание показателей содержания свинца с увеличением вводимой его концентрации, причем при максимальной дозе в корме в 20 ПДК уровень содержания в пере примерно в 122 раза превысил показатель в контроле. Поскольку активных процессов в отросшем пере не происходит, увеличение в них концентрации в процессе скормливания токсиканта с пищей, возможно, объясняется процессом диффузии из окружающих очин пера тканей.

В растущих перьях элемент накапливался вначале менее интенсивно, но затем при 20 дозах в корме происходил резкий скачок накопления, значительно превышающий таковое в старых перьях. Можно предположить, что усиление токсической нагрузки стимулирует функции выведения свинца из организма путем его депонирования в оперении. Тем не менее, при росте нового оперения, т. е. в очаге активных регенерационных процессов, накопление свинца происходит слабее, но только до какого-то определенного порогового значения интенсивности поступления токсиканта в организм. Резкое увеличение накопления растущим оперением свинца при его поступлении в размере 20 доз позволяет предположить наличие различных механизмов или путей детоксикации организма птиц.

Сравнение старых перьев, взятых у птиц до эксперимента и после его завершения, показывает, что перья до эксперимента, которые все могут рассматриваться как «контроль», содержали намного больше свинца, чем старые перья от контрольных птиц, изъятые после завершения эксперимента. Так, старые перья до начала эксперимента содержали свинец в количестве 0,171–2,614 мкг/г сухого вещества, а контрольные после окончания эксперимента – 0,054 мкг/г сухого вещества. Наиболее логичным выглядит объяснение данного обстоятельства обратной миграцией свинца из оперения при снижении его концентрации в организме вследствие питания птиц не загрязненной пищей в экспериментальных условиях.

Таким образом, усиление токсической нагрузки на организм птиц стимулирует функции выведения свинца из организма путем его депонирования в оперении, особенно новом, рост которого сопровождается интенсивными обменными процессами в организме, вследствие чего накопление свинца возрастает в новых перьях – в 6,1–534,8 раза по сравнению с контрольной группой, в старых перьях после окончания эксперимента – в 19,6–121,8 раза.

Достоверность различий между содержанием свинца в органах и тканях птиц экспериментальных и контрольных групп в эксперименте оценивалась с помощью дисперсионного анализа (таблица 3).

Таблица 3 – Результаты дисперсионного анализа содержания свинца в тканях и внутренних органах птиц экспериментальных и контрольных групп

Ткани и внутренние органы	Значения F-критерия	
	при раздельном скормливании	при совместном скормливании
кости	776,63	213,48
сердце	30,61	1,74
мышцы	60,02	81,36
печень	1813,44	308,39
почки	602,63	732,21
перья новые	9536,31	1433,64
перья старые после эксперимента	520,25	28,69

Примечание: значение $F_{\text{критич.}}(4, 10) = 3,48$ при $p \leq 0,05$ для раздельного скормливания; $F_{\text{критич.}}(2, 6) = 5,14$ при $p \leq 0,05$ – для совместного скормливания. Курсивом отмечены недостоверные отличия.

Результаты анализа дисперсионного комплекса, включающего содержание свинца у птиц контрольных и экспериментальных групп, свидетельствуют о том, что значение F-критерия превышает F-критическое для всех исследованных органов и тканей (при $f = 4, 10$ и $p \leq 0,05$; $f = 2, 6$ и $p \leq 0,05$) и содержание свинца достоверно отличается от птиц контрольной группы. Исключение составляет содержание свинца в сердце при совместном скормливании с кадмием.

Для выяснения влияния количества свинца, содержащегося в корме, на интенсивность его выведения из организма сизых голубей нами сравнивались результаты определения содержания свинца в экскрементах в различные периоды его скормливания (таблица 4).

Анализ содержания свинца в экскрементах по пентадам показал, что выведение токсиканта происходит неравномерно, причем амплитуда различий уровня содержания возрастает с увеличением ежедневно скормливаемой дозы.

Таблица 4 – Содержание свинца в экскрементах сизого голубя в различные периоды скормливания

Периоды скармливания, дни	Содержание свинца, мкг/г сухого вещества				
	количество свинца в корме, дозы				
	1	5	10	20	контроль
1	13,585	63,987	148,052	235,443	0,391
5	15,052	34,417	68,526	264,640	0,526
10	15,338	50,982	69,460	192,047	0,528
15	15,872	57,508	72,459	277,906	0,288
20	14,699	30,577	79,059	305,836	0,535
25	16,052	57,228	79,059	51,761	0,555
30	16,032	60,107	77,726	304,236	0,506
35	16,525	66,860	77,126	285,705	0,490
40	16,898	56,374	82,525	81,059	0,340
45	17,672	60,547	83,792	354,098	0,613
среднее	15,773±0,023	53,859±0,240	83,778±0,459	235,273±1,965	0,477±0,002
min	13,585	30,577	68,526	51,761	0,288
max	17,672	66,860	148,052	354,098	0,613

Так, при скормливании дозы в 1 Pb отличия минимального и максимального за пентаду содержания элемента от среднего значения в экскрементах составляли 13,9% и 12,0% от среднего значения соответственно. При 5 Pb, 10 Pb и 20 Pb различия от среднего значения составили соответственно 43,2% и 24,1% при дозе 5 Pb; 18,2% и 76,7% при дозе 10 Pb; 78,0% и 50,5% при дозе 20 Pb.

Наблюдаемые весьма существенные колебания могут свидетельствовать либо о неравномерности выведения токсиканта из организма, либо не вполне отработанной методике усреднения пробы для анализа, либо том и другом вместе. Поскольку суточная порция дозы свинца скормливалась за раз, это могло вызывать повышение концентрации элемента в течение некоторого времени и в экскрементах. В зависимости от того, какая часть таких экскрементов с повышенным уровнем токсиканта попадала в усредненную пробу, наблюдались более или менее значительные отклонения от среднего показателя.

Принципиальным для наших исследований является выяснение характера изменений выведения с увеличением вводимой дозы токсиканта, который свидетельствует об увеличении выведения токсиканта из организма при росте вводимой дозы.

С целью определения соотношения накопления свинца в органах и тканях и его количества, поступившего в организм птиц, нами были рассчитаны коэффициенты накопления, значения которых показаны в таблице 5.

Таблица 5 – Коэффициенты накопления свинца

Органы и ткани птиц	Коэффициенты накопления, %			
	количество свинца в корме, дозы			
	1	5	10	20
кости	3,137	0,735	0,596	0,455
почки	0,016	0,021	0,015	0,024

печень	0,011	0,022	0,015	0,025
мышцы	0,463	0,021	0,019	0,020
сердце	0,004	0,001	0,0002	0,001
перья новые	0,003	0,002	0,004	0,012
перья старые после эксперимента	0,168	0,060	0,092	0,052
экскременты	1,919	1,311	1,019	1,431

Коэффициенты накопления свинца определяли как отношение содержания элемента в сыром веществе внутренних органов и экскрементов, а также костях и перьях к общему количеству свинца, поступившего с кормом, выраженное в процентах. Для этого рассчитывалось общее количество свинца за весь период эксперимента (1 Pb – 14,4 мг, 5 Pb – 72,0 мг, 10 Pb – 144,0 мг, 20 Pb – 288,0 мг); средняя масса исследуемых органов и тканей (кости – 41,3 г, почки – 2,88 г, печень – 7,65 г, мышцы – 93,34 г, сердце – 4,54 г, перья новые – 1,62 г, перья старые после эксперимента – 22,87 г, экскременты – 8,76 г) и массовая доля влаги исследуемых органов и тканей (отмечена выше).

Из данных таблицы 5 видно, что среди исследуемых органов и тканей птиц наибольшими коэффициентами накопления свинца при его различном количестве в корме характеризуются кости и старые перья птиц. Полученные тенденции увеличения коэффициентов накопления свинца в органах и тканях птиц при его росте поступления с кормом показывают преобладающую реакцию почек, печени и новых перьев на рост величины токсического воздействия на организм. При этом резкий рост величины коэффициентов накопления свинца показывает, что для новых перьев такая реакция наиболее ярко выражена.

Сравнение показаний накопления свинца в органах, тканях и покровах экспериментальных птиц с показателями в экскрементах при различных дозах скармливаемого токсиканта показало более высокую концентрацию свинца в экскрементах по сравнению с органами и тканями, за исключением костей при 1 дозе свинца, что в принципе отражает общую эффективность системы детоксикации организма.

Такая тенденция, возможно, объясняется образованием нестойких комплексных соединений свинца в организме ($K_{\text{нест.}} = 10^{-7} - 10^{-3}$ [7]) и в этой связи более быстрым их удалением с экскрементами в процессе метаболизма (для соединений кадмия, например, $K_{\text{нест.}} = 10^{-17} - 10^{-3}$).

Установленные в результате эксперимента закономерности накопления свинца и кадмия в органах и тканях птиц при задаваемых концентрациях в корме могут быть использованы для разработки тест-систем для биоиндикации состояния окружающей среды и оценки уровней загрязнения тяжелыми металлами кормовых объектов птиц на основании анализа получаемого от птиц биологического материала.

Выводы

1. Результаты экспериментального скармливания сизым голубям доз свинца (9,1–182,9 мкг/г корма) показали наибольшие уровни накопления данного элемента в костях и новом оперении птиц, что, возможно, связано с депонирующей микроэлементной функцией костей и наличием очага активных регенерационных процессов в области растущего оперения. Далее по мере снижения уровня накопления свинца следуют старые перья после окончания эксперимента, почки, печень, мышцы и сердце. По сравнению с контролем накопление свинца увеличивается в костях в 2,2–9,2 раза, в новых перьях – в 6,1–534,8 раза, в старых перьях после окончания эксперимента – в 19,6–121,8 раза, в почках – в 1,5–44,1 раза, в печени – в 0,9–37,6 раза, в мышцах – в 9,4–10,7 раза, в сердце – в 3,6 раза.

2. Экспериментальной оценкой влияния кадмия на уровни накопления свинца в органах и тканях при совместном попадании в организм птиц отмечено возрастание накопления свинца в печени сизых голубей.

3. Анализ содержания свинца в экскрементах показал неравномерное возрастание амплитуды различий максимального и минимального уровней содержания свинца от среднего значения с увеличением ежедневно скармливаемой дозы.

4. Наибольшие коэффициенты накопления свинца при его различном количестве в корме среди исследуемых органов и тканей отмечаются в костях (0,455–3,137%) и старых перьях птиц (0,052–0,168%). Увеличение коэффициентов накопления свинца в органах и тканях птиц при росте его поступления с кормом демонстрирует преобладающую реакцию почек, печени и новых перьев на рост величины токсического воздействия на организм, при этом резкий рост величины коэффициентов накопления свинца показывает, что именно для новых перьев такая реакция наиболее ярко выражена.

5. В экскрементах птиц содержание свинца превышает показатели накопления в органах, тканях и покровах (за исключением костей при дозе 1 Pb), что, возможно, объясняется образованием нестойких комплексных соединений свинца с веществом тканей и органов и в этой связи достаточно быстрым их удалением с экскрементами в процессе метаболизма и отражает эффективность выделительной системы организма экспериментальных птиц в условиях стрессового воздействия токсиканта.

Литература

1. Лебедева, Н.В. Экотоксикология и биогеохимия географических популяций птиц / Н.В. Лебедева. – М. : Наука, 1999. – 199 с.
2. Кирьякулов, В.М. Последствия загрязнения свинцом и другими поллютантами среды обитания водоплавающей дичи : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.16 ; 06.02.03 / В.М. Кирьякулов ; ФГОУ ВПО «Рос. гос. аграр. заоч. ун-т». – М., 2009. – 22 с.
3. Сергеев, А.А. Тяжелые металлы в охотничьих птицах Кировской области (биологические, индикационные и санитарно-гигиенические аспекты) : дис. ... канд. биол. наук : 06.02.03 / А.А. Сергеев. – Киров, 2003. – 183 л.
4. Kaimal, B. Laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry as a technique to quantify trace metals in bird feathers / B. Kaimal, R.E. Hannigan, C.B. Dowling // ICP Inf. Newslett. – 2007. – № 8. – P. 839.
5. Concentrations of metals in blood and feathers of nestling ospreys (*Pandion haliaetus*) in Chesapeake and Delaware Bays / B.A. Ratter [et al.] // Arch. Environ. Contam. and Toxicol. – 2008. – № 1. – P. 114–122.
6. Головатый, С.Е. Тяжелые металлы в агроэкосистемах / С.Е. Головатый. – Минск : РУП «Ин-т почвовед. и агрохим.», 2002. – 239 с.
7. Вторичная диссоциация комплексов. Константа диссоциации [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://chem.astu.ru/chair/study/genchem/r5_4.htm. – Дата доступа : 25.04.2011.

ГЕОГРАФИЯ

УДК 911.9«377»:502(476)(09)

Развитие научных исследований в области рекреационной деятельности в Беларуси

О.В. ШЕРШНЕВ¹, М.Г. ЯСОВЕЕВ², Т.Г. ФЛЕРКО¹, Е.А. ГАЙДАШ¹

Осуществление рекреационной деятельности на территории Беларуси имеет почти вековую историю. В наше время происходит активное развитие рекреационной отрасли. При этом успешная реализация многих проблемных вопросов отрасли во многом может опираться на осмысление предшествующего научного и практического опыта, создающего предпосылки для выработки новых научных методов исследования. Анализируется история формирования и современное состояние научных исследований в области рекреационного освоения территории Беларуси. На основании анализа научных публикаций выявлены приоритетные направления научных исследований в сфере рекреационной деятельности и представлена их систематизированная характеристика.

Ключевые слова: рекреация, публикации в области рекреационной деятельности, приоритетные направления, систематизация и анализ публикаций, история рекреации.

The recreation industry in Belarus has developed for almost a century. Nowadays there is active development of recreational branch. The article underlines the presence of some unresolved problems in recreational branch whose successful realization may base on comprehension of the previous scientific and practical experience creating the preconditions for development of new scientific methods of research. The history and the current state of scientific research in the sphere of recreation in Belarus are analyzed in the article. On analyzing the scientific publications the authors ascertained priority tendencies of scientific research in the sphere of recreation and gave them systematic description.

Keywords: recreation industry, publications on recreation, priority lines, systematization and analysis of publications, historical development of recreation.

Введение

Осуществление рекреационной деятельности на территории Беларуси имеет почти вековую историю. На протяжении этого периода в стране изменялась социальная, экономическая, политическая, экологическая ситуация. В свою очередь, произошла трансформация рекреационной деятельности – расширилась география отдыха, возникли новые типы рекреационной деятельности и элементарных рекреационных занятий, претерпели изменение представления о качестве отдыха и повысились требования к его организации. Комплексность задач, решаемых при осуществлении рекреационной деятельности, обусловила поступательное развитие научных исследований, интегрирующих знания из различных отраслей науки.

Вопросам рекреации в Беларуси посвящено значительное количество научных публикаций, изучающих данный вид человеческой деятельности с различных теоретических, методических и прикладных аспектов.

В то же время современное состояние рекреационной отрасли свидетельствует о наличии ряда нерешенных вопросов, успешная реализация которых во многом может опираться на осмысление предшествующего научного и практического опыта, создающего предпосылки для выработки новых научных приемов и методов исследования.

Цель работы – выявление и анализ приоритетных направлений научных исследований в области рекреационной деятельности в Беларуси.

Для проведения исследования использовался сравнительно-исторический метод, который позволил выявить основные направления научных исследований в области рекреационной деятельности в стране на основе анализа 380 научных публикаций, представленных

монографиями, авторефератами диссертаций и статьями в ведущих научных периодических изданиях, среди которых: «Архитектура и строительство», «Вопросы строительства и архитектуры», «Строительство и архитектура Белоруссии», «Природные ресурсы», «Природопользование», «Вестник БГУ», «Весці БДПУ», «Вестник БГЭУ», «Журнал международного права и международных отношений», «Экономика и управление» и др. Хронология исследования охватывает период 1960–2008 гг.

Основная часть

Предысторию формирования рекреационной деятельности в Беларуси можно отнести ко второй половине XIX в., когда еще не существовало термина «рекреация», а вся деятельность по организации досуга определялась понятиями «отдых» и «туризм». Территория страны представляла интерес лишь для краеведов и этнографов, результаты исследований которых нашли отражение в первых публицистических очерках обзорно-туристского характера и краеведческих работах. К этому времени принадлежит и зарождение лечебно-курортного направления рекреации в Беларуси.

Начало развития туристской деятельности в Беларуси в виде познавательного туризма относится к первой четверти XX в. Получили распространение туризм выходного дня и детский туризм, осуществляемые в форме экскурсионно-краеведческих маршрутов, развивалось лечебно-курортное направление. Однако вплоть до 1950-х гг. туризм в Беларуси не приобрел массового распространения, что было обусловлено низким уровнем организационной работы, отсутствием туристских баз и маршрутов. Публикации тех лет в области туризма носили познавательно-публицистический характер и освещали природные и историко-культурные особенности страны.

Новый этап развития рекреационной деятельности в Беларуси относится ко второй половине 1950-х – началу 1960 гг., когда происходило восстановление разрушенных во время войны турбаз, санаториев и профилакториев. Наряду с плановым и детским туризмом, активно развивался самодеятельный туризм. В стране расширяется сеть региональных и все-союзных туристских маршрутов, посвященных памятным событиям и датам, связанных с Великой отечественной войной, а также использующих природное разнообразие территории Беларуси.

Ко второй половине 1960-х гг. развитие различных видов отдыха и туризма, изменение структуры туристского спроса вызвало необходимость разработки научных основ управления рекреационной отраслью, что предусматривало формирование новых и расширение действующих зон отдыха и туристских маршрутов различной тематической направленности с учетом социальных и географических аспектов отдыха. Именно в это время происходит активизация научных исследований и практической деятельности в области рекреационного освоения территории Беларуси. С этого периода и до настоящего времени основными направлениями научных исследований в области рекреации на территории Беларуси становятся:

- архитектурно-планировочная организация мест отдыха и туризма;
- оценка природно-рекреационных ресурсов и проблем рекреационного ресурсопользования;
- организация особо охраняемых природных территорий (ООПТ) и оценка состояния ландшафтных компонентов в их пределах;
- оценка историко-культурного потенциала для развития туристской и экскурсионной деятельности;
- рекреационно-туристское районирование;
- менеджмент туризма и оценка перспектив страны для развития международного туризма.

Решению данных вопросов посвящены многочисленные научные труды и проекты как отдельных ученых, так и исследовательских коллективов научных и учебных учреждений страны, среди которых: Белорусский научно-исследовательский и проектный институт градостроительства (БелНИИПградостроительства), Белгоспроект, Институт геологических наук НАН Беларуси, Институт природопользования НАН Беларуси, ПО «Белгеология», Бело-

русский государственный университет, Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка и др.

Архитектурно-планировочная организация мест отдыха и туризма. Архитектурно-планировочное направление явилось одним из первых в решении проблем планирования размещения и организации мест отдыха и туризма регионального и районного уровней. Первостепенная роль в разработке схем развития и размещения зон отдыха и туризма принадлежит коллективам Белгоспроект и Минскому филиалу ЦНИИПградоостроительства (БелНИИПградоостроительства).

Вопросы озеленения и благоустройства мест отдыха средствами ландшафтной архитектуры, планировки районов отдыха, определения потребности населения в оздоровительных, спортивных и других учреждениях, формирования водно-зеленых систем городов, в том числе с учетом освоения пойменных и заболоченных территорий, размещения ландшафтно-рекреационных территорий курортно-рекреационного назначения, формирования рекреационных территорий с учетом сохранения архитектурного и градостроительного наследия, реставрации и преобразования исторических центров, широко освещены в работах Г.А. Потаева, А.В. Сычевой, А.В. Ершова, А.В. Лысенко, Б.М. Дыскина, Л.В. Ребенок, Е.Л. Заславского, Н.А. Зельтена и др.

Оценка природно-рекреационных ресурсов и проблем рекреационного ресурсопользования. Научные исследования в данном направлении ориентированы на анализ природных ресурсов как элементов географической среды, используемых в рекреационных целях (И.И. Пирожник, Г.А. Потаев, А.С. Калинович, В.М. Яцухно, И.Д. Юркевич и др.); оценку функциональной организации рекреационных территорий и анализ проблем развития различных типов рекреационных систем (И.И. Пирожник, И.И. Счастливая, Н.С. Шевцова, Л.А. Кравчук, М.И. Струк, А.Н. Решетникова, Р.Н. Заикин, А.Н. Широкова); оценку размещения и развития рекреационной инфраструктуры (Г.А. Потаев, Г.Р. Потаева, Н.С. Шевцова, А.В. Бобко); организацию загородного отдыха населения и рекреационного освоения пригородных зон (И.И. Пирожник, В.М. Зайцев, М.И. Струк, Н.В. Матарас, Г.А. Потаев); решение экологических проблем рекреационного ресурсопользования и оценку факторов, ограничивающих рекреационную деятельность (М.И. Струк, Т.И. Кухарчик, Н.С. Шевцова, Г.А. Щербаков, Л.Н. Рожков, Ю.П. Пурецкий и др.).

Большое внимание уделяется теоретико-методологическим вопросам и количественной оценке ресурсов для целей отдыха и туризма, оптимизации рекреационной деятельности и нормированию рекреационных нагрузок (И.И. Пирожник, В.М. Зайцев, И.И. Счастливая, Е.В. Ефременко, Г.А. Потаев, А.В. Сычева, Н.А. Еленская, Б.М. Дыскин, А.В. Ершов, Н.С. Шевцова, Л.А. Кравчук, А.В. Пугачевский, А.П. Гусев, О.Н. Михан).

Широкое распространение получили региональные научные исследования и практическая деятельность по изучению перспектив использования минеральных вод (М.Г. Ясовеев, А.В. Кудельский, С.П. Гудак, М.Г. Медведева, Л.И. Шаповал) и грязей (А.П. Пидопличко, И.Г. Тановицкий, И.И. Лиштван, Н.Н. Бамбалов, В.В. Смирнова, А.П. Гаврильчик, М.З. Лопотко, А.П. Пидопличко, Б.В. Курзо, И.П. Антонов, Э.С. Кашицкий, В.С. Улащик) для санаторно-курортных целей.

Систематизированная характеристика природных лечебных факторов и их использование для лечебно-оздоровительных целей представлена в работах М.Г. Ясовеева, Э.С. Кашицкого, Т.М. Требухова, Б.В. Шалькевича.

Организация особо охраняемых природных территорий и оценка состояния ландшафтных компонентов в их пределах. Реализации научной и практической деятельности, затрагивающей различные аспекты организации и функционирования ООПТ, посвящено множество научных публикаций. Значительная их часть освещает вопросы в области ботаники, почвоведения, зоологии, лесоводства (научные сборники «Беловежская пушта», «Березинский заповедник», «Заповедники Белоруссии»). Широко представлены исследования по оценке природных ресурсов в пределах ООПТ, их экологическому состоянию и рациональному использованию (Б.П. Власов, Я.К. Еловичева, Д.С. Голод, В.Б. Кадацкий, О.Ф. Башкинцева, В.М. Байчоров, И.К. Вадковская, О.В. Лукашев, А.П. Осапеня,

Т.А. Романова и др.); развитию, оптимизации и функциональному зонированию ООПТ, анализу природно-ресурсного потенциала для туристско-рекреационных целей, определению рекреационных нагрузок (Д.С. Голод, А.И. Тарасенко, И.Г. Тановицкий, Н.А. Юргенсон, Н.С. Шевцова, Г.В. Дудко, Е.В. Шушкова, О.Н. Сидоренко, О.С. Мозговая).

Оценка историко-культурного потенциала. Основу публикаций историко-культурного направления составляют исследования, раскрывающие особенности истории формирования и развития дворцовой и усадебной архитектуры, их интерьера, элементов декора в оформлении дворцов и усадебных домов, садово-паркового искусства, монументального и замкового зодчества, преимущественно ориентированных на познание истории, этнографии и архитектуры Беларуси (В.А. Чантурия, Ю.В. Чантурия, А.Н. Кулагин, А.И. Локотко, С.А. Сергачев, Ю.А. Татарин, М.А. Ткачев, В.В. Трацевский, О.А. Трус, А.Т. Федорук). В то же время они создали основу для комплексного анализа историко-культурного наследия с целью определения условий для развития туристско-экскурсионной деятельности в стране, а их познавательная ценность может служить незаменимым фактическим материалом и мотивационным фактором к совершению путешествий.

Перспективы использования в системе туристско-экскурсионной деятельности историко-культурного наследия малых и средних городов, а также исторических архитектурных сооружений и парков, в зависимости от культурно-исторической ценности, степени сохранности, местоположения по отношению к населенным пунктам и туристским трассам, освещены в публикациях Г.А. Потаева, В.В. Дражина, Г.Р. Потаевой, Л.М. Гайдукевича, А.Т. Федорука и др.

Рекреационно-туристское районирование. В основе существующих схем рекреационного и туристского районирования Беларуси положены различные критерии оценки.

В схеме рекреационного районирования, разработанной специалистами БелНИИП градостроительства, в качестве критериев оценки выступают природные особенности территории (климатические условия, характер рельефа, степень обводненности, лесистость, заболоченность, сельскохозяйственная освоенность), которые выявляются среди физико-географических районов Беларуси.

В схеме перспективного использования ландшафтов для рекреации, составленной И.И. Счастной, в качестве критериев оценки рекреационного потенциала также анализировались природные факторы. Но территориальной оценочной единицей в данной схеме являлся ландшафтный район.

Схема рекреационного районирования И.И. Пирожника разработана на основании анализа функциональных признаков и плотности рекреационных предприятий, характера рекреационных ресурсов и интенсивности туристских потоков.

Анализ ландшафтных, экологических, медико-климатических условий и гидроминеральных ресурсов был положен в основу курортологического районирования территории Беларуси.

В схеме рекреационно-туристского районирования Беларуси (2005 г.) границы туристских зон выделены по административному признаку, с учетом экономического развития регионов, наличия туристско-рекреационных ресурсов и ограничений природного и техногенного характера.

Менеджмент туризма и оценка перспектив страны для развития международного туризма. В данном направлении широко представлены исследования, в которых анализируется опыт зарубежных стран в развитии туризма, приоритетные направления туристской политики в Беларуси и за рубежом, подходы к формированию структуры управления туризмом, международное сотрудничество Беларуси в сфере туризма (Л.М. Гайдукевич, Д.Г. Решетников, Н.М. Бирицкая, Е.В. Кипцевич, М.Л. Акопян).

Большое внимание в исследованиях уделено выявлению приоритетных направлений развития туризма, оценке перспектив международного туризма в стране и факторов, их ограничивающих (Л.М. Гайдукевич, И.И. Пирожник, Е.В. Кипцевич, О.А. Мечковская, Д.В. Каленик, А.А. Швецов, Т.А. Федорцова), вопросам организации и развития отдельных видов туризма (Г.А. Потаев, Ч.К. Шульга, О.С. Мозговая, Н.Ф. Авдевич, С.А. Лученок), мар-

кетинговым исследованиям и оценке конкурентоспособности туристского рынка Беларуси (Д.Г. Решетников, Т.М. Сергеева).

Заключение

Проведенный анализ научных публикаций показал, что последовательное проведение научных исследований в сфере рекреационной организации территории Беларуси позволило решить ряд научных и практических задач, среди которых: выявить потребности населения страны в учреждениях различных видов отдыха и определить территории для создания зон отдыха; разработать перспективные схемы развития городов с учетом создания территорий, отличающихся благоприятными рекреационными качествами; оценить состояние минерально-сырьевой базы лечебных грязей, минеральных вод и рассолов, сформировать на их основе государственную инфраструктуру лечебно-оздоровительных учреждений и осуществить промышленное бутилирование минеральных столовых и лечебных вод; проанализировать перспективы использования историко-культурного наследия страны в системе туристско-экскурсионной деятельности; оценить ландшафтное и биологическое разнообразие в пределах ООПТ, а также влияние антропогенного фактора на состояние экосистем в их пределах; сформулировать концепции развития и оптимизации ООПТ и пути их реализации, в том числе для целей рекреационно-туристского природопользования различного уровня; оценить эффективность использования имеющихся туристских ресурсов и туристские возможности страны, а также состояние материальной базы туристской отрасли.

¹Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступило 03.07.10

²Белорусский государственный педагогический
университет им. М. Танка

МАТЕМАТИКА

УДК 512.542

О максимальных подгруппах, близких к $\mathfrak{F}$ -абнормальным

Е.Н. Бородич, Р.В. Бородич, М.В. Селькин

В работе исследуются пересечения максимальных подгрупп в группах с операторами.

Ключевые слова: максимальная подгруппа, группа операторов, локальная формация, $\mathfrak{F}$ -абнормальная подгруппа, подгруппа Фраттини.

The intersections of maximal subgroups in groups of operators are investigated in the article.

Keywords: maximal subgroup, group of operators, local formation, $\mathfrak{F}$ -abnormal subgroup, Frattini subgroup.

Введение

Все рассматриваемые в статье группы предполагаются конечными. Одно из основополагающих направлений в исследовании конечных групп связано с исследованием свойств пересечений заданных максимальных подгрупп и влиянием этих свойств на строение группы. Главенствующую роль здесь занимает подгруппа Фраттини, введенная в работе [1]. Теорема Фраттини получила развитие в работах В. Гашюца [2], В. Дескинса [3] и других авторов (см. монографии [4] и [5]).

Введённое в работах Р. Картера, Т. Хоукса [6] и Л.А. Шеметкова [7] понятие F -абнормальной максимальной подгруппы позволило систематизировать накопившийся богатый фактический материал о максимальных подгруппах и получить целый ряд новых результатов.

Данная работа посвящена развитию указанных направлений в группах с операторами.

Определения и обозначения

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

Класс групп называют нормально наследственным (S_n -замкнутым), если вместе с каждой своей группой G он содержит все нормальные подгруппы группы 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 $G/N_1 \cap N_2 \in \mathfrak{F}$.

Отображение f класса G всех групп в множество классов групп называют экраном, если для любой группы G выполняются следующие условия:

- 1) $f(G)$ – формация;
- 2) $f(G) \subseteq f(G^\varphi) \cap f(\text{Ker } \varphi)$ для любого гомоморфизма φ группы G ;
- 3) $f(1) = G$.

Экран f называют локальным, если для любого простого числа p он принимает одинаковые значения на всех неединичных p -группах и $f(G) = \bigcap_{p \in \pi(G)} f(p)$ для любой группы G .

Формацию $\mathfrak{F}$ называют локальной, если она имеет хотя бы один локальный экран.

Пусть $\mathfrak{F}$ – формация. Тогда через $G^{\mathfrak{F}}$ обозначается $\mathfrak{F}$ -корадикал группы G – пересечение всех нормальных подгрупп N группы, для которых $G/N \in \mathfrak{F}$.

Максимальная подгруппа M группы G называется $\mathfrak{F}$ -нормальной ($\mathfrak{F}$ -абнормальной), если $G^{\mathfrak{F}}$ содержится (не содержится) в M .

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.

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

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

Обозначим через $\Phi(G, A)$ пересечение ядер всех максимальных A -допустимых подгрупп. Если таких подгрупп в группе G нет, то положим $\Phi(G, A) = G$.

Заметим, что максимальная A -допустимая подгруппа M либо целиком содержит $\mathfrak{F}$ -корадикал группы G , либо $MG^{\mathfrak{F}} = G$. Действительно. Так как произведение A -допустимых подгрупп A -допустимо и $G^{\mathfrak{F}}$ – характеристическая подгруппа, а следовательно, A -допустимая, то $MG^{\mathfrak{F}} = M$ или $MG^{\mathfrak{F}} = G$.

Пусть $\mathfrak{F}$ – непустая формация и группа G имеет группу операторов A . Через $D^{\mathfrak{F}}(G, A)$ обозначим пересечение ядер всех максимальных A -допустимых подгрупп группы G , не содержащих $\mathfrak{F}$ -корадикал группы G . Если в группе G все максимальные A -допустимые подгруппы содержат $\mathfrak{F}$ -корадикал группы G , то положим $D^{\mathfrak{F}}(G, A) = G$. В случае, когда $\mathfrak{F}$ совпадает с формацией всех нильпотентных групп, то подгруппу $D^{\mathfrak{F}}(G, A)$ будем обозначать $D^N(G, A)$.

Пусть π – некоторое множество простых чисел, $\mathfrak{F}$ – непустая формация и группа G имеет группу операторов A . Через $D_\pi^{\mathfrak{F}}(G, A)$ обозначим пересечение ядер всех $\mathfrak{F}$ -абнормальных максимальных A -допустимых подгрупп группы G , не содержащих $\mathfrak{F}$ -корадикал группы G , индексы которых не делятся на простые числа из π . Если в G таких подгрупп нет, то положим $D_\pi^{\mathfrak{F}}(G, A) = G$.

Обозначим далее через $\overline{D}_\pi^{\mathfrak{F}}(G, A)$ пересечение ядер всех $\mathfrak{F}$ -абнормальных максимальных A -допустимых подгрупп группы G , не принадлежащих формации $\mathfrak{F}$, не содержащих $\mathfrak{F}$ -корадикал группы G , индекс каждой из которых не делится на простые числа из π . В случае отсутствия в группе G указанных максимальных A -допустимых подгрупп полагаем эти пересечения равными самой группе G .

Отметим, если $A = 1$, то подгруппы $D^{\mathfrak{F}}(G, A)$, $D_\pi^{\mathfrak{F}}(G, A)$ и $\overline{D}_\pi^{\mathfrak{F}}(G, A)$ совпадают соответственно с подгруппами $\Delta^{\mathfrak{F}}(G)$, $\Delta_\pi^{\mathfrak{F}}(G)$ и $\overline{\Delta}_\pi^{\mathfrak{F}}(G)$, равными пересечению всех $\mathfrak{F}$ -абнормальных максимальных подгрупп группы G , $\mathfrak{F}$ -абнормальных максимальных подгрупп группы G , индексы которых не делятся на простые числа из π , и $\mathfrak{F}$ -абнормальных максимальных подгрупп группы G , не принадлежащих формации $\mathfrak{F}$, индексы которых не делятся на простые числа из π , строение которых рассматривалось в работе [5].

Необходимо отметить, что не каждая максимальная подгруппа будет являться максимальной A -допустимой относительно некоторой группы операторов A , а также не всякая

максимальная A -допустимая подгруппа группы является максимальной подгруппой в этой же группе.

Пример 2.1. Пусть Q – группа кватернионов 8-го порядка. Рассмотрим $G = [Q]Z_3$, Z_3 – группа операторов для Q . В группе Q подгруппа K порядка 2 является максимальной допустимой относительно группы операторов Z_3 , но не является максимальной подгруппой группы Q .

Пример 2.2. Рассмотрим группу

$$G^* = \langle a, b, c \mid a^2 = b^3 = c^3 = 1, bc = cb, b^a = c \rangle.$$

Тогда $G^* = [G]A$, где $G = \langle b \rangle \times \langle c \rangle$ и $A = \langle a \rangle$ – группа операторов группы G . Простая проверка показывает, что в группе G есть максимальная A -допустимая подгруппа $H = \langle bc \rangle$ порядка 3, но не все подгруппы порядка 3, например b , являются A -допустимыми. Отмеченный класс групп становится достаточно широким, если образовать группу $R = G^* \times Q$, где Q – сверхразрешимая группа и $(|G|, |Q|) = 1$.

Вспомогательные результаты

Лемма 3.1. Пусть группа G имеет группу операторов A , $\mathfrak{F}$ – формация. Тогда если N – нормальная A -допустимая подгруппа группы G и $N \subseteq \overline{D}_\pi^{\mathfrak{F}}(G, A)$, то

$$\overline{D}_\pi^{\mathfrak{F}}(G/N, A) = \overline{D}_\pi^{\mathfrak{F}}(G, A) / N.$$

Доказательство. Если $N \subseteq \overline{D}_\pi^{\mathfrak{F}}(G, A)$, то $N \subseteq M$, где M – любая $\mathfrak{F}$ -абнормальная максимальная A -допустимая подгруппа группы G , не принадлежащая $\mathfrak{F}$ и не содержащая $\mathfrak{F}$ -корадикал группы G . Тогда

$$\overline{D}_\pi^{\mathfrak{F}}(G/N, A) = \cap (M/N)_{G/N}, \quad (1)$$

где M/N пробегает множество всех $\mathfrak{F}$ -абнормальных максимальных A -допустимых подгрупп из G/N , не принадлежащих $\mathfrak{F}$ и не содержащих $\mathfrak{F}$ -корадикал группы G/N .

Продолжим равенство (1):

$$\cap (M/N)_{G/N} = (\cap M_G) / N = \overline{D}_\pi^{\mathfrak{F}}(G, A) / N. \quad (2)$$

Из равенств (1) и (2) вытекает справедливость утверждения. Лемма доказана.

Теорема 3.2. [с. 52, 8]. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$ и подгруппа $\Phi_\pi(G, A)$ обладает свойством C_π . Тогда

$$\Phi_\pi(G, A) / O_\pi(G) = \Phi(G / O_\pi(G), A).$$

Теорема 3.3. [с. 54, 8]. Пусть группа G имеет группу операторов A , $\mathfrak{F}$ – ступенчатая формация. Тогда

$$D_\pi^{\mathfrak{F}}(G, A) / \Phi(G, A) = Z_\infty^{\mathfrak{F}}(G / \Phi(G, A)).$$

Теорема 3.4. [с. 54, 8]. Пусть $\mathfrak{F}$ – формация, группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$. Если в группе G подгруппа $\Phi_\pi(G, A)$ обладает свойством C_π , то

$$D_\pi^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_\pi(G) = D_\pi^{\mathfrak{F}}(G / O_\pi(G), A).$$

В теоремах 3.2 и 3.4 используется тот факт, что подгруппа $\Phi_\pi(G, A)$ обладает свойством C_π . Следующий подход позволяет развить данные теоремы, отбросив указанное выше требование. В основе этого подхода лежат следующие понятия:

$\delta_\pi^{\mathfrak{F}}(G, A)$ – пересечение всех $\mathfrak{F}$ -абнормальных максимальных A -допустимых подгрупп группы G , содержащих $O_\pi(G)$ и не содержащих $G^\mathfrak{F}$;

$\overline{\delta}_\pi^{\mathfrak{F}}(G, A)$ – пересечение максимальных A -допустимых подгрупп группы G , содержащих $O_\pi(G)$, не содержащих $G^\mathfrak{F}$ и не принадлежащих $\mathfrak{F}$;

$\phi_\pi(G, A)$ – пересечение всех максимальных A -допустимых подгрупп группы G , содержащих $O_\pi(G)$.

В случае отсутствия максимальных A -допустимых подгрупп с нужными свойствами считаем, что эти пересечения равны G .

Лемма 3.5. Пусть группа G имеет группу операторов A , $\mathfrak{S}$ – формация, N – нормальная A -допустимая подгруппа группы G . Тогда справедливы следующие утверждения:

если $N \subseteq \phi_\pi(G, A)$, то $\phi_\pi(G/N, A) = \phi_\pi(G, A)/N$;

если $N \subseteq \phi_\pi(G, A)$, то $\delta_\pi^{\mathfrak{S}}(G/N, A) = \delta_\pi^{\mathfrak{S}}(G, A)/N$;

если $N \subseteq \phi_\pi(G, A)$ и $\bar{\delta}_\pi^{\mathfrak{S}}(G, A)/N \neq G/N$, то $\bar{\delta}_\pi^{\mathfrak{S}}(G/N, A) = \bar{\delta}_\pi^{\mathfrak{S}}(G, A)/N$.

Доказательство осуществляется непосредственной проверкой.

Лемма 3.6. Пусть группа G имеет группу операторов A . Тогда

1) $\phi_\pi(G, A) \supseteq \Phi_\pi(G, A)$,

2) $\phi_\pi(G, A)$ – π -замкнутая подгруппа,

3) $\phi_\pi(G, A)/O_\pi(G) = \Phi(G/O_\pi(G))$,

4) если $\Phi_\pi(G, A)$ обладает свойством C_π , то $\phi_\pi(G, A) = \Phi_\pi(G, A)$.

Доказательство. Очевидно, что $\phi_\pi(G, A) \supseteq \Phi_\pi(G, A)$. Покажем, что подгруппа $\phi_\pi(G, A)$ π -замкнута. Пусть $O_\pi(G)$ – неединичная подгруппа, N – минимальная нормальная подгруппа группы G , $N \subseteq O_\pi(G)$. По лемме 3.5 имеем:

$$\phi_\pi(G/N, A) = \phi_\pi(G, A)/N.$$

Для G/N утверждение леммы верно по индукции.

Следовательно, группа $\phi_\pi(G/N, A)$ π -замкнута. Так как N – π -группа, то из π -замкнутости $\phi_\pi(G, A)/N$ следует, что $\phi_\pi(G, A)$ – π -замкнутая подгруппа.

Пусть теперь $O_\pi(G) = 1$. По определению подгруппы $\phi_\pi(G, A)$ имеем в этом случае $\phi_\pi(G, A) = \Phi(G, A)$, причём $\phi_\pi(G, A)$ обладает единичной π -холловской подгруппой. Очевидно, $\phi_\pi(G, A)$ – π -замкнутая подгруппа, что и требовалось доказать.

Покажем теперь, что

$$\phi_\pi(G, A)/O_\pi(G) = \Phi(G/O_\pi(G)).$$

Пусть M – максимальная A -допустимая подгруппа группы G и $O_\pi(G) \subseteq M$. Так как $O_\pi(G)$ – характеристическая подгруппа, то, очевидно, $M/O_\pi(G)$ – максимальная A -допустимая подгруппа группы $G/O_\pi(G)$. Следовательно,

$$\Phi_\pi(G/O_\pi(G), A) \subseteq \phi_\pi(G, A)/O_\pi(G) = \phi_\pi(G/O_\pi(G), A).$$

С другой стороны, так как $O_\pi(G/O_\pi(G)) = 1$, то по определению

$$\phi_\pi(G/O_\pi(G), A) = \Phi_\pi(G/O_\pi(G), A),$$

что и требовалось доказать.

Предположим теперь, что $\Phi_\pi(G, A)$ обладает свойством C_π . По ранее доказанному

$$\Phi_\pi(G, A)/O_\pi(G) = \Phi_\pi(G/O_\pi(G), A) = \phi_\pi(G, A)/O_\pi(G).$$

Следовательно, $\Phi_\pi(G, A) = \phi_\pi(G, A)$. Лемма доказана.

Теорема 3.7. [с. 59, 9] Пусть $\mathfrak{S}$ – S_n -замкнутая локальная формация и группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$. Тогда $D^{\mathfrak{S}}(G, A) = A \times B$, где $A \in \mathfrak{S}$, $B \subseteq \Phi(G, A)$, $\pi(B) \cap \pi(\mathfrak{S}) = \emptyset$.

Основной результат

Теорема 4.1. Пусть $\mathfrak{S}$ – формация, группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$ и $\bar{D}_\pi^{\mathfrak{S}}(G, A) \neq G$. Если в группе G подгруппа $\Phi_\pi(G, A)$ обладает свойством C_π , то

$$\overline{D}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) / O_\pi(G) = D^{\mathfrak{Z}}(G / O_\pi(G), A).$$

Доказательство. Вначале покажем, что

$$K = \overline{D}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) \cap G^{\mathfrak{Z}} \subseteq \Phi_\pi(G, A).$$

Пусть $K \not\subseteq \Phi_\pi(G, A)$. Тогда в G найдётся такая максимальная A -допустимая подгруппа M , индекс которой не делится на простое число из π , что $G = KM$. Понятно, что M не содержит $G^{\mathfrak{Z}}$. Если $M \notin \mathfrak{Z}$, то $K \subseteq \overline{D}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) \subseteq M$, что невозможно. Следовательно, $M \in \mathfrak{Z}$. Отсюда

$$G / K = MK / KM / M \cap K \in \mathfrak{Z},$$

а это значит, что $G^{\mathfrak{Z}} \subseteq K \subseteq \overline{D}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A)$. Это противоречит существованию в группе G максимальной A -допустимой подгруппы, не содержащей $G^{\mathfrak{Z}}$, индекс которой не делится на простые числа из π . Итак, $K \subseteq \Phi_\pi(G, A)$.

Пусть $O_\pi(G) \neq 1$. Тогда ввиду того, что

$$\Phi_\pi(G, A) / O_\pi(G) = \Phi(G / O_\pi(G), A),$$

получаем справедливость теоремы для группы $G / O_\pi(G)$ по индукции. Следовательно,

$$\overline{D}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G / O_\pi(G), A) / O_\pi(G / O_\pi(G)) = D^{\mathfrak{Z}}(G / O_\pi(G) / O_\pi(G / O_\pi(G)), A).$$

Так как $O_\pi(G / O_\pi(G)) = 1$ и

$$\overline{D}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) / O_\pi(G) = \overline{D}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G / O_\pi(G), A),$$

то

$$\overline{D}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) / O_\pi(G) = D^{\mathfrak{Z}}(G / O_\pi(G), A).$$

Пусть теперь $O_\pi(G) = 1$. Тогда

$$\overline{D}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) \cap G^{\mathfrak{Z}} \subseteq \Phi_\pi(G, A) = \Phi(G, A).$$

Пусть K / N – главный фактор группы G , причём,

$$\Phi(G, A) \subseteq N \subseteq K \subseteq \overline{D}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A).$$

Так как

$$K \cap G^{\mathfrak{Z}} \subseteq \overline{D}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) \cap G^{\mathfrak{Z}} \subseteq \Phi(G, A),$$

то

$$N = N(K \cap G^{\mathfrak{Z}}) = K \cap NG^{\mathfrak{Z}}.$$

Поэтому имеет место следующий изоморфизм:

$$KG^{\mathfrak{Z}} / NG^{\mathfrak{Z}}K / K \cap NG^{\mathfrak{Z}} = K / N(K \cap G^{\mathfrak{Z}}) = K / N.$$

Так как $G / NG^{\mathfrak{Z}} \in \mathfrak{Z}$, поэтому главный фактор $KG^{\mathfrak{Z}} / NG^{\mathfrak{Z}}$ является $\mathfrak{Z}$ -центральным в G . Следовательно, главный фактор K / N также является $\mathfrak{Z}$ -центральным в G . Таким образом, $\overline{D}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) / \Phi(G, A)$ – $\mathfrak{Z}$ -гиперцентральная нормальная подгруппа группы $G / \Phi(G, A)$. Поэтому

$$\overline{D}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) / \Phi(G, A) \subseteq Z_\infty^{\mathfrak{Z}}(G / \Phi(G, A)).$$

С другой стороны, на основании теоремы 3.3

$$\overline{D}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) / \Phi(G, A) \supseteq D^{\mathfrak{Z}}(G, A) / \Phi(G, A) = Z_\infty^{\mathfrak{Z}}(G / \Phi(G, A)).$$

Значит,

$$\overline{D}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) / \Phi(G, A) = Z_\infty^{\mathfrak{Z}}(G / \Phi(G, A)).$$

Следовательно,

$$D_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) / \Phi(G, A) = D^{\mathfrak{Z}}(G, A) / \Phi(G, A),$$

то есть $D_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) = D^{\mathfrak{Z}}(G, A)$. Теорема доказана.

Следствие 4.1.1. Пусть группа G имеет группу операторов A , $\mathfrak{Z}$ – S_π -замкнутая локальная формация, содержащая все нильпотентные группы, и $\overline{D}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) \neq G$. Если подгруппа $\Phi_\pi(G, A)$ обладает свойством C_π , то

$$D_{\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / \Phi(G, A) \in \mathfrak{F}.$$

Так как в любой группе G подгруппа $\Phi_p(G, A)$ обладает свойством C_p , то при $\pi = \{p\}$ получаем следующий результат.

Следствие 4.1.2. Пусть $\mathfrak{F}$ – формация, группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, $\overline{D}_{\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) \neq G$. Тогда

$$\overline{D}_p^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_p(G) = D^{\mathfrak{F}}(G / O_p(G), A).$$

Следствие 4.1.3. Пусть группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, $\overline{D}_{\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) \neq G$. Если $\mathfrak{F}$ – S_n -замкнутая локальная формация, содержащая все нильпотентные группы, то $\overline{D}_p^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_p(G) \in \mathfrak{F}$.

В случае, когда группа операторов единична, из теоремы 4.1 получаем результат М.В. Селькина из [5].

Теорема 4.2. Пусть $\mathfrak{F}$ – локальная формация, группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$. Тогда

$$\delta_{\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_{\pi}(G) = D^{\mathfrak{F}}(G / O_{\pi}(G), A).$$

Доказательство. Пусть M – максимальная A -допустимая подгруппа группы G , $O_{\pi}(G) \subseteq M$ и M не содержит $\mathfrak{F}$ -корадикал группы G . Так как

$$(G / O_{\pi}(G))^{\mathfrak{F}} = G^{\mathfrak{F}} O_{\pi}(G) / O_{\pi}(G),$$

то $M / O_{\pi}(G)$ – максимальная A -допустимая в $G / O_{\pi}(G)$ подгруппа, не содержащая $\mathfrak{F}$ -корадикал группы $G / O_{\pi}(G)$. Таким образом,

$$D^{\mathfrak{F}}(G / O_{\pi}(G), A) \subseteq \delta_{\pi}^{\mathfrak{F}}(G / O_{\pi}(G), A) = \delta_{\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_{\pi}(G).$$

Обратно, если подгруппа $M / O_{\pi}(G)$ максимальная A -допустимая в $G / O_{\pi}(G)$ и не содержит $\mathfrak{F}$ -корадикал группы $G / O_{\pi}(G)$, то подгруппа M максимальная A -допустимая в G подгруппа, содержащая $O_{\pi}(G)$ и не содержащая $G^{\mathfrak{F}}$. Следовательно,

$$\delta_{\pi}^{\mathfrak{F}}(G / O_{\pi}(G), A) = \delta_{\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_{\pi}(G) \subseteq D_{\pi}^{\mathfrak{F}}(G / O_{\pi}(G), A).$$

Отсюда имеем

$$\delta_{\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_{\pi}(G) = D_{\pi}^{\mathfrak{F}}(G / O_{\pi}(G), A),$$

что и требовалось доказать. Теорема доказана.

Следствие 4.2.1. Пусть $\mathfrak{F}$ – локальная формация, группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$. Тогда если $\Phi_{\pi}(G, A)$ обладает свойством C_{π} , то $\delta_{\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) = D^{\mathfrak{F}}(G, A)$.

Доказательство. По теореме 3.2 и теореме 4.2 имеем:

$$\delta_{\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_{\pi}(G) = D^{\mathfrak{F}}(G / O_{\pi}(G), A) = D_{\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) / O_{\pi}(G).$$

Следовательно, $\delta_{\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) = D_{\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A)$.

Следствие 4.2.2. Пусть $\mathfrak{F}$ – локальная формация, группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$. Тогда

$$\delta_p^{\mathfrak{F}}(G, A) \cap \delta_q^{\mathfrak{F}}(G, A) = D^{\mathfrak{F}}(G, A)$$

для любых $p \neq q$.

Справедливость утверждения следует из справедливости теоремы Силова для $\Phi_p(G, A)$ и $\Phi_q(G, A)$ и следствия 4.2.1.

В частном случае, когда группа операторов $A = 1$, из предложения 4.3.31 получаем результат М.В. Селькина из [5].

Теорема 4.3. Пусть $\mathfrak{F}$ – локальная формация, группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, $\overline{\delta}_{\pi}^{\mathfrak{F}}(G, A) \neq G$. Тогда

$$\overline{\delta}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) / O_\pi(G) = D^{\mathfrak{Z}}(G / O_\pi(G), A).$$

Доказательство. Покажем, что

$$K = \overline{\delta}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) \cap G^{\mathfrak{Z}} \subseteq \phi_\pi(G, A).$$

Пусть $K \not\subseteq \phi_\pi(G, A)$. Тогда в G найдётся максимальная A -допустимая подгруппа M , не содержащая $G^{\mathfrak{Z}}$. Если $M \notin \mathfrak{Z}$, то $K \subseteq \overline{\delta}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) \subseteq M$, что невозможно. Следовательно, $M \in \mathfrak{Z}$. Отсюда

$$G / K = MK / KM / M \cap K \in \mathfrak{Z}.$$

А это значит, что $G^{\mathfrak{Z}} \subseteq K \subseteq \overline{\delta}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A)$. Это противоречит существованию в группе G максимальной A -допустимой подгруппы, не содержащей $G^{\mathfrak{Z}}$, и определению $\overline{\delta}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A)$. Следовательно, $K \subseteq \phi_\pi(G, A)$.

Пусть $O_\pi(G) \neq 1$. Тогда ввиду того, что

$$\phi_\pi(G, A) / O_\pi(G) = \Phi(G / O_\pi(G), A),$$

получаем справедливость теоремы для группы $G / O_\pi(G)$ по индукции. Следовательно,

$$\overline{\delta}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G / O_\pi(G), A) / O_\pi(G / O_\pi(G)) = D^{\mathfrak{Z}}(G / O_\pi(G) / O_\pi(G / O_\pi(G)), A).$$

Так как $O_\pi(G / O_\pi(G)) = 1$, то

$$\overline{\delta}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G / O_\pi(G), A) = D_\pi^{\mathfrak{Z}}(G / O_\pi(G), A).$$

Из леммы 3.5

$$\overline{\delta}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) / O_\pi(G) = D^{\mathfrak{Z}}(G / O_\pi(G), A).$$

Пусть теперь $O_\pi(G) = 1$. По определению подгруппы $\overline{\delta}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A)$ имеем $\overline{\delta}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) = \overline{D}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A)$, а определению подгруппы $\phi_\pi(G, A)$ –

$$\phi_\pi(G, A) = \Phi_\pi(G, A) = \Phi(G, A).$$

Тогда из теоремы 4.1 получаем $\overline{D}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) = D^{\mathfrak{Z}}(G, A)$. Следовательно, $\overline{\delta}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) = D^{\mathfrak{Z}}(G, A)$, что и требовалось доказать. Теорема доказана.

Следствие 4.3.1. Пусть $\mathfrak{Z}$ – нормально наследственная локальная формация, группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, $\overline{\delta}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) \neq G$. Тогда

$$\overline{\delta}_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) / O_\pi(G) \in \mathfrak{Z}.$$

Если $A = 1$, то из теоремы 4.3 следует результат М.В. Селькина из [5].

Теорема 4.4. Пусть $\mathfrak{Z}$ – нормально наследственная локальная формация, группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, π – некоторое множество простых чисел. Тогда $\delta_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) = AB$, где

- 1) $A / O_\pi(G) \in \mathfrak{Z}$;
- 2) $B \subseteq \phi_\pi(G, A)$;
- 3) $\pi(B) \cap \pi(F) \subseteq \pi$.

Доказательство. Рассмотрим фактор-группу $G / O_\pi(G)$.

Из теоремы 4.2

$$\delta_\pi^{\mathfrak{Z}}(G, A) / O_\pi(G) = D^{\mathfrak{Z}}(G / O_\pi(G), A),$$

по лемме 3.6

$$\phi_\pi(G, A) / O_\pi(G) = \Phi(G / O_\pi(G), A).$$

Применяя к группе $D^{\mathfrak{Z}}(G / O_\pi(G), A)$ теорему 3.7, получаем

$$D^{\mathfrak{Z}}(G / O_\pi(G / O_\pi(G)), A) = (A / O_\pi(G))(B / O_\pi(G)),$$

где

$$A/O_{\pi}(G) \in \mathfrak{Z}, B/O_{\pi}(G) \subseteq \Phi(G/O_{\pi}(G), A), \pi(B/O_{\pi}(G)) \cap \pi(\mathfrak{Z}) = \emptyset.$$

Следовательно, $\pi(B) \cap \pi(\mathfrak{Z}) \subseteq \pi$. Так как

$$\Phi(G/O_{\pi}(G), A) = \phi_{\pi}(G, A)/O_{\pi}(G), \text{ то } B \subseteq \phi_{\pi}(G, A).$$

Ввиду теоремы 3.7 имеем, что

$$A \cap B = O_{\pi}(G), A/O_{\pi}(G) \in \mathfrak{Z}.$$

Так как

$$\delta_{\pi}^{\mathfrak{Z}}(G, A)/O_{\pi}(G) = D^{\mathfrak{Z}}(G/O_{\pi}(G), A),$$

то $\delta_{\pi}^{\mathfrak{Z}}(G, A) = AB$, что и требовалось доказать.

Следствие 4.4.1. Пусть $\mathfrak{Z}$ – нормально наследственная локальная формация, группа G имеет группу операторов A такую, что $(|G|, |A|) = 1$, π – некоторое множество простых чисел. Тогда

$$\delta_{\pi}^{\mathfrak{Z}}(G, A)/O_{\pi}(G) \in \mathfrak{Z}.$$

Если группа операторов группы G единична, то из теоремы 4.4 вытекает результат М.В. Селькина из [5].

Литература

1. Frattini, G. Intorno alla generazione dei gruppi di operazioni / G. Frattini // Atti Acad. Dei Lincei. – 1885. – Vol. 1. – P. 281–285.
2. Gaschütz, W. Über die Φ -Untergruppen endlicher Gruppen / W. Gaschütz // Math. Z. – 1953. – Bd. 58. – S. 160–170.
3. Deskins, W.E. A condition for the solvability of a finite group / W.E. Deskins // Ill.J.Math. – 1961. – Vol. 5, № 2. – P. 306–313.
4. Шеметков, Л.А. Формации конечных групп / Л.А. Шеметков. – М. : Наука, 1978. – 267 с.
5. Селькин, М.В. Максимальные подгруппы в теории классов конечных групп / М.В. Селькин. – Минск : Беларуская навука, 1997. – 144 с.
6. Carter, R. The $\mathfrak{Z}$ -normalizers of a finite soluble group / R. Carter, T. Hawkes // J. Algebra. – 1967. – Vol. 5, № 2. – P. 175–202.
7. Шеметков, Л.А. Ступенчатые формации групп / Л.А. Шеметков // Матем. сб. – 1974. – Т. 94, № 4. – С. 628–648.
8. Бородич, Е.Н. О влиянии индексов максимальных подгрупп на их пересечения / Е.Н. Бородич, Р.В. Бородич, М.В. Селькин // Вестник Брестского университета. – 2011. – Сер. 4, № 2. – С. 49–56.
9. Бородич, Е.Н. О пересечении подгрупп в группах с операторами / Е.Н. Бородич, Р.В. Бородич, М.В. Селькин // Вестник Брестского университета. – 2012. – Сер. 1, № 1. – С. 54–62.

Знакопеременные группы с наследственно G -перестановочной подгруппой

А.Ф. ВАСИЛЬЕВ¹, В.Н. ТЮТЯНОВ²

Установлено, что любая конечная простая неабелева знакопеременная группа не имеет собственной наследственно G -перестановочной подгруппы.

Ключевые слова: простая неабелева группа, знакопеременная группа, наследственно G -перестановочная подгруппа.

It has been established that any finite simple non-Abelian alternating group doesn't have any inherited G -permutation subgroup.

Keywords: simple non-Abelian group, alternating group, inherited G -permutation subgroup.

Введение и предварительные результаты

В работе [1] А.Н. Скиба ввел понятие G -перестановочной и наследственно G -перестановочной подгруппы. Пусть G – конечная группа и $L \leq G$. Подгруппа L называется G -перестановочной, если для всякой подгруппы $H \leq G$ имеется элемент $g \in G$ такой, что $LH^g = H^g L$. Подгруппа L называется наследственно G -перестановочной, если для всякой подгруппы $T \leq G$ такой, что $L \leq T$, подгруппа L является T -перестановочной. Доказан следующий результат.

Теорема. *Знакопеременная группа $A_n, n \geq 5$ не обладает нетривиальной наследственно A_n -перестановочной подгруппой.*

В Коуровской тетради [2, проблема 17.112] А.Н. Скибой и В.Н. Тютяновым были поставлены два вопроса: какие простые неабелевы группы G обладают

- а) нетривиальной G -перестановочной подгруппой?
- б) нетривиальной наследственно G -перестановочной подгруппой?

Теорема дает ответ на вопрос б) для знакопеременных групп.

Известны примеры простых неабелевых групп G с собственной G -перестановочной подгруппой. Простейшим из них является группа $G \cong A_5$, у которой подгруппа порядка 2 является G -перестановочной. Авторам не известны простые неабелевы группы G с собственной наследственно G -перестановочной подгруппой. Из теоремы и работы [3] следует, что для ответа на вопрос б) проблемы 17.112 [2] следует рассмотреть простые неабелевы группы лиевского типа.

Будем использовать обозначения из работ [4], [5].

Приведем следующие вспомогательные результаты.

Лемма 1. *Пусть $9 \leq n$ – натуральное число. Тогда существует по меньшей мере три таких простых числа r , что $n < r < 2n$.*

Доказательство. Следует из леммы 1.1 [6].

Лемма 2. *Пусть G – транзитивная группа перестановок степени n , содержащая простой цикл длины r . Тогда справедливы следующие утверждения:*

- (1) *если $r > n/2$, то G – примитивная группа;*
- (2) *если G – примитивная группа и $r < n-2$, то G содержит подгруппу A_n .*

Доказательство. Следует из леммы 1.2 [6].

Лемма 3. *Пусть $G \in \{A_5, A_6, A_7\}$. Тогда G не содержит собственной наследственно G -перестановочной подгруппы.*

Доказательство. Обозначим через L собственную наследственно G -перестановочную подгруппу в G . Пусть сначала $G \cong A_5$. Группа G допускает только одну максимальную факторизацию: $G = A_4 D_{10}$ и имеет максимальную подгруппу S_3 . Если L^g не содержится в S_3 для всех $g \in G$, то $G = L(S_3)^h$ для некоторого $h \in G$. Поэтому группа G допускает максимальную факторизацию с сомножителем, который изоморфен S_3 . Последнее невозможно. Следовательно, можно считать, что $L \leq S_3$. Если $L \cong S_3$, то имеет место факторизация: $G = S_3 A_4$, что невозможно. Если $L \cong Z_3$, тогда в группе G существует подгруппа $Z_3 \times Z_5$. Группа A_5 такой подгруппы не содержит. Таким образом, $L \cong Z_2$. Так как все инволюции в A_5 сопряжены, то можно считать, что $L \leq A_4$. Поскольку L – наследственно G -перестановочная подгруппа, то в группе A_4 существует подгруппа порядка 6, что невозможно.

Пусть $G \cong A_6 \cong PSL_2(9)$. Группа G содержит два класса максимальных подгрупп, изоморфных S_4 . Если L^g не содержится в S_4 для всех $g \in G$, то $G = L(S_4)^h$ для некоторого $h \in G$ и $|L|$ делится на 3, 5. Поэтому $L \cong A_5$. В этом случае для $R \in Syl_3(G)$ найдется $g \in G$ такой, что $K = LR^g = R^g L$ и $[G:K] = 2$. Последнее невозможно. Значит можно считать, что $L \leq S_4$. Если $L \cong S_4$, то так как в группе G два класса максимальных несопряженных подгрупп, изоморфных S_4 , тогда группа G имеет максимальную факторизацию с сомножителями S_4 , что невозможно. Пусть $L \cong A_4$. Тогда для $R \in Syl_3(G)$ и некоторого $g \in G$ существует подгруппа $K = LR^g = R^g L$ порядка $2^2 \cdot 3^2$ с силовой 2-подгруппой $Z_2 \times Z_2$. Из [4] следует, что в A_6 таких подгрупп нет. Если $L \in \{D_8, Z_4, Z_2 \times Z_2, S_3\}$, то для $R \in Syl_5(G)$ существует подгруппа $K = LR^g = R^g L$ для некоторого $g \in G$. Такие подгруппы в A_6 не существуют [4]. Следовательно, $L \cong Z_2$. Так как все инволюции в A_6 сопряжены, то можно считать, что $L \leq A_4$. Значит в A_4 существует подгруппа порядка 6, что невозможно.

Пусть $G \cong A_7$. Если для некоторого $g \in G$ подгруппа $L^g \leq A_6$, то так как A_6 не обладает собственной наследственно A_6 -перестановочной подгруппой, можно считать, что $L = A_6$. Группа A_7 обладает максимальной подгруппой S_5 , а значит $G = A_6 S_5$, что невозможно. Таким образом, L^g не содержится в A_6 для всех $g \in G$. Поэтому $G = LA_6$ и 7 делит $|L|$. Из [4] следует, что $L \leq PSL_2(7)$. Следовательно, $L \in \{PSL_2(7), Z_7 : Z_3, Z_7\}$. Тогда в группе G существует собственная подгруппа $K = LR^g = R^g L$, где $R \in Syl_5(G)$. Из [4] следует, что в группе G нет собственных подгрупп, порядок которых делится на 35. Последнее противоречие.

Доказательство теоремы

Предположим, что $G \cong A_n$ – минимальный контрпример к теореме и L – собственная наследственно G -перестановочная подгруппа в группе G . Согласно лемме 3, $n \geq 8$. Пусть G действует на множестве $\Omega = \{1, 2, \dots, n\}$. Обозначим через H стабилизатор точки $1 \in \Omega$. Тогда $H \cong A_{n-1}$ и H – максимальная подгруппа в G .

Если для некоторого $g \in G$ имеет место включение $L^g \leq H \cong A_{n-1}$, то поскольку $G \cong A_n$ – минимальный контрпример к теореме, получаем, что $L = H$. Пусть $[G:H] = n = p^\alpha m$, где $\alpha \geq 1$, $m > 1$ и $(p, m) = 1$. Рассмотрим $P \in Syl_p(G)$. Тогда для некоторого $g \in G$ существует подгруппа $K = LP^g = P^g L$, содержащая L и $[G:K] = m$. Противоречие с тем, что L максимальна в G . Следовательно, $[G:H] = p^\alpha$. Если $\alpha > 1$, то обозначим $P_1 \in Syl_p(L)$. Существует p -подгруппа P_2 в группе G такая, что $P_1 < P_2$ и $[P_2:P_1] = p$. Тогда

для некоторого $g \in G$ существует подгруппа $K = L(P_2)^g = (P_2)^g L$, содержащая L и $[G : K] = p^{\alpha-1}$. Противоречие с тем, что L максимальна в G . Таким образом, $[G : H] = p$. Из [7] следует, что $n = p$. В группе A_p существует максимальная подгруппа, изоморфная S_{p-2} , являющаяся стабилизатором двухэлементного подмножества из Ω , порядок которой взаимно прост с p . Тогда группа G допускает факторизацию $G = A_{p-1}S_{p-2}$, что невозможно.

Поэтому L^g не содержится в H для всех $g \in G$, и можно считать, что $G = LH$. Из того, что для всякого $i \in \Omega$ найдется $g \in G$ такой, что $1g = i$ и представления $g = hl$, где $h \in H$, $l \in L$, получим $i = 1g = 1(hl) = (1h)l = 1l$. Отсюда следует, что L транзитивна на Ω . Пусть сначала $n \leq 18$. Для каждого $n \geq 8$ укажем простое число p такое, что $n/2 < p < n-2$. Получим пары $\{n, p\}$: $\{8, 5\}$, $\{9, 5\}$, $\{10, 7\}$, $\{11, 7\}$, $\{12, 7\}$, $\{13, 7\}$, $\{14, 11\}$, $\{15, 11\}$, $\{16, 11\}$, $\{17, 11\}$, $\{18, 11\}$. Обозначим $P \in \text{Syl}_p(G)$. Тогда для некоторого $g \in G$ существует подгруппа LP^g . По лемме 2 $G = LP^g$. Тогда $[G : L] = p^\alpha$ и, в силу [7], $n = p^\alpha$. Так как $n/2 < p$, то $[G : L] = p$ и $L \cong A_{p-1}$. Тогда, как показано выше, $G = A_{p-1}S_{p-2}$, что невозможно.

Следовательно, $n \geq 19$. Если $n = 2k + 1 \geq 19$, то $(n-1)/2 \geq 9$. По лемме 1, существуют простые числа r_1, r_2, r_3 , для которых $(n-1)/2 < r_1 < r_2 < r_3 < n-1$. Поэтому $(n-1)/2 < r_1 < r_2 < n-2$. Значит, $n/2 < r_2 < n-2$. Если $n = 2k \geq 20$, то существуют простые числа r_1, r_2, r_3 , для которых $n/2 < r_1 < r_2 < r_3 < n$. Отсюда следует, что r_1 удовлетворяет условию $n/2 < r_1 < n-2$. Таким образом, при $n \geq 19$ найдется простое число r такое, что $n/2 < r < n-2$. Пусть $R \in \text{Syl}_r(G)$, тогда для некоторого $g \in G$ существует подгруппа LR^g и, по лемме 2, $G = LR^g$. Тогда $[G : L] = r^\alpha$ и, согласно [7], $n = r^\alpha$. Поскольку $n/2 < r$, то $[G : L] = r$ и $L \cong A_{r-1}$. Группа $G = A_{r-1}S_{r-2}$, что невозможно. Теорема доказана.

Литература

1. Скиба, А.Н. H -перестановочные подгруппы / А.Н. Скиба // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2003. – № 4(19). – С. 37–39.
2. Коуровская тетрадь (Нерешенные вопросы теории групп). – 17-е изд. – Новосибирск : Ин-т математики, 2010.
3. Тютянов, В.Н. О наследственно G -перестановочных подгруппах спорадических групп / В.Н. Тютянов, П.В. Бычков // Вестник Полоцкого университета. – 2008. – № 3. – С. 23–29.
4. Atlas of finite groups / J.H. Conway [et al.]. – London : Clarendon Press, 1985. – 252 p.
5. Gorenstein, D. Finite groups / D. Gorenstein. – New York : Harper and Row, 1968. – 527 p.
6. Wiegold, J. The factorization of the alternating and symmetric groups / J. Wiegold, A.G. Williamson // Math. Z. – 1980. – Vol. 175. – P. 171–179.
7. Guralnick, R.M. Subgroups of prime power index in simple groups / R.M. Guralnick // J. Algebra. – 1983. – Vol. 175. – P. 171–179.

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

Поступило 10.04.12

²Международный университет «МИТСО»
Гомельский филиал

О возможности изучения производной на основе почти аксиоматического подхода

А.В. ГАВРИЛЮК, А.А. ГАВРИЛЮК

Обосновывается новый подход к изучению производной, опирающийся на физическую наглядность и позволяющий относительно просто доказать основные теоремы о производной. При этом понятие предела функции не используется.

Ключевые слова: определение производной, изучение производной, определение предела, скорость, математический анализ.

A new approach to the study of derivatives is justified. This approach is physically interpretable and it allows to prove the main theorems about derivatives relatively easily. This approach does not use the concept of limit of the function.

Keywords: definition of derivative, studying derivative, definition of limit, speed, mathematical analysis.

В настоящей статье продолжают исследования авторов, посвящённые возможности изучения понятия производной и непрерывности без использования понятия предела [1], [2], [3].

В предыдущих работах исследовались возможности строгого построения соответствующей теории с использованием определений (определения производной или определения непрерывности), равносильных классическим (но без понятия предела). В настоящей работе мы отходим от этого требования, следуя тому пути, который традиционно используется в школьном курсе математики при изучении понятия площади фигуры. Мы предлагаем подход к изучению производной не менее «строгий» (но и не более), чем традиционно используемый подход к изучению площади. Отметим, что вопрос о существовании площади плоской фигуры (квадрируемости, измеримости по Жордану) в школьном курсе вообще не ставится. Формулы для вычисления площадей некоторых плоских фигур выводятся с использованием свойств-аксиом площади (неотрицательности, аддитивности, равенства площадей равных фигур – инвариантности площади относительно движений, формулы площади прямоугольника). Эти свойства не формулируются явно, не задано семейство измеримых подмножеств, однако, можно говорить, что этот подход является почти аксиоматическим.

Мы исходим из того, что представления о скорости формируются в современной жизни не позднее (и они не менее развиты), чем представления о площади. В самом деле, представим, что две машины движутся прямолинейно и в некоторый момент времени t_0 они поравнялись. Если скорость первой машины в момент t_0 больше, чем скорость второй, то совершенно ясно, что в этот момент первая машина ОБГОНЯЕТ вторую, иначе говоря, в течение некоторого времени до момента t_0 она была позади и в течение некоторого времени после t_0 она будет впереди второй машины. К описанному «свойству» мы добавим, что «при равномерном прямолинейном движении скорость равна отношению пути ко времени», и только на этой основе будем строить всю теорию.

Основные утверждения и обозначения

1. Скорость изменения линейной функции $L(x) = kx + b$ постоянна и равна коэффициенту k .

2. Если функция не линейна, то она может иметь разные скорости изменения в разных точках. Скорость изменения функции f в точке x_0 (в момент x_0) будем обозначать $f'(x_0)$ и называть также производной функции f в точке x_0 .

3. Будем говорить, что функция f обгоняет функцию g в точке x_0 , если $f(x_0) = g(x_0)$ и на некотором интервале $(a; x_0)$ выполняется неравенство $f(x) < g(x)$, а на некотором интервале $(x_0; b)$ выполняется неравенство $f(x) > g(x)$.

4. Если $f'(x_0) > g'(x_0)$ (скорость изменения функции f в точке x_0 больше скорости изменения функции g в этой точке), то f обгоняет g в точке x_0 .

Замечания

При изучении математического анализа на повышенном уровне переход к строгому изложению может быть в дальнейшем организован вполне естественным образом. Не трудно доказать, что следующее определение производной является равносильным классическому:

Определение. Число ν называется производной функции f в точке x_0 , если:

– при всяком k , большем, чем ν , функция $L(x) = k(x - x_0) + f(x_0)$ обгоняет f в точке x_0 ;

– при всяком k , меньшем, чем ν , функция $L(x) = k(x - x_0) + f(x_0)$ отстаёт от f в точке x_0 .

Изложение соответствующей теории со всеми необходимыми доказательствами (на основе «геометрического» определения, эквивалентного приведённому выше) имеется в работе авторов [3]. Предлагаемый сейчас подход (без формального определения производной) может быть использован в средней школе и на некоторых технических специальностях университетов. Он не использует представлений о предельном переходе, обеспечивает весьма простые доказательства основных теорем о вычислении производной (конечно, игнорируя вопрос о существовании производной) и переход к исследованию функций. Однако, ещё более важным является создание прочной связи: скорость – производная – касательная – идея линеаризации. Используется не только геометрическая, но и физическая наглядность.

Следуя школьной традиции, линейной будем называть функцию, заданную формулой $L(x) = kx + b$. При этом прямую – график этой функции – будем обозначать L , а для самой функции будем использовать обозначение $L(x)$. Соответственно, будем писать «функция $f(x)$ » вместо «функция f ».

Изучение производной мы начинаем с частного случая, когда производная равна нулю (по понятным причинам мы не можем использовать выражение «о – малое»).

Определение. Функция $\alpha(x)$ называется пренебрежимо малой в точке x_0 , если в этой точке и значение функции, и её производная (скорость изменения) равны нулю.

Пример 1. Функция $h(x) = (x - x_0)^2$ является пренебрежимо малой в точке x_0 .

Доказательство. Ясно, что $h(x_0) = 0$. Докажем, что $h'(x_0) = 0$. Предположим противное. Пусть $h'(x_0) = k > 0$. Тогда $k > \frac{k}{2}$ и, следовательно, функция $h(x)$ обгоняет в x_0

линейную функцию $L(x) = \frac{k}{2}(x - x_0)$ (скорость которой равна $\frac{k}{2}$ по свойству 1). Это значит, что слева от x_0 , в некотором интервале $(a; x_0)$, будет $h(x) < \frac{k}{2}(x - x_0) < 0$, что невоз-

можно, так как $h(x) = (x - x_0)^2 \geq 0$ при всех x . Если $h'(x_0) = k < 0$, то $k < \frac{k}{2}$ и, следова-

тельно, линейная функция $L(x) = \frac{k}{2}(x - x_0)$ обгоняет $h(x)$ в x_0 . Это значит, что справа от

x_0 , в некотором интервале $(x_0; b)$, будет $h(x) < \frac{k}{2}(x - x_0) < 0$, что невозможно, так как $h(x) \geq 0$ при всех x .

Обобщение. Для любой [дифференцируемой!] функции $f(x)$ такой, что $f(x_0) = 0$, имеем $(f^2)'(x_0) = 0$.

Пример 2. Линейная функция $L(x) = k(x - x_0)$ является пренебрежимо малой в точке x_0 тогда и только тогда, когда $k = 0$. Это сразу следует из свойства 1 производной.

Леммы о пренебрежимо малых

Лемма 1. Произведение пренебрежимо малой на константу является пренебрежимо малой.

Пусть $\alpha'(x_0) = 0$ и C – константа. Предположим противное. Пусть $(C\alpha)'(x_0) \neq 0$. Пусть, например, $(C\alpha)'(x_0) = k > 0$ и $C > 0$. Тогда $k > \frac{k}{2}$ и функция $C\alpha(x)$ обгоняет функцию $L(x) = \frac{k}{2}(x - x_0)$ в момент x_0 (так как скорость $C\alpha(x)$ в этот момент равна k , а скорость $L(x)$ равна $\frac{k}{2}$). Тогда очевидно, что $\alpha(x)$, равная $\frac{C\alpha(x)}{C}$, обгоняет функцию $L_1(x) = \frac{k}{2C}(x - x_0)$ в момент x_0 , что невозможно (поскольку $\alpha'(x_0) = 0 < \frac{k}{2C}$).

Лемма 2. Сумма пренебрежимо малых пренебрежимо мала.

Пусть $\alpha(x)$ и $\beta(x)$ пренебрежимо малы в момент x_0 . Предположим противное. Пусть $(\alpha + \beta)'(x_0) \neq 0$. Пусть, например, $(\alpha + \beta)'(x_0) = k > 0$. Тогда $L(x) = \frac{k}{4}(x - x_0)$ обгоняет $\alpha(x)$ и обгоняет $\beta(x)$ в момент x_0 (у $L(x)$ скорость равна $\frac{k}{4}$ и $\frac{k}{4} > 0$). Тогда функция $L(x) + L(x) = \frac{k}{2}(x - x_0)$ обгоняет $\alpha(x) + \beta(x)$ в момент x_0 , что невозможно (так как скорость $2L(x)$ равна $\frac{k}{2}$, а скорость $\alpha(x) + \beta(x)$ в момент x_0 равна k и $k > 0$).

Геометрическое определение пренебрежимо малой

Пусть $\alpha(x)$ пренебрежимо мала в точке x_0 . Проведём через точку x_0 оси Ox прямую L_1 с угловым коэффициентом $k_1 > 0$ и прямую L_2 с угловым коэффициентом $k_2 < 0$. Тогда линейная функция с графиком L_1 обгоняет функцию $\alpha(x)$ (напомним, что производная (скорость) $\alpha(x)$ в точке x_0 равна нулю), а линейная функция с графиком L_2 отстаёт от функции $\alpha(x)$. Из этого следует, что на некотором интервале $(a; x_0)$ слева от x_0 и на некотором интервале $(x_0; b)$ справа от x_0 график функции $\alpha(x)$ находится между прямыми L_1 и L_2 (здесь, разумеется, необходим рисунок). Другими словами, вертикальные углы (L_1, x_0, L_2) , образованные прямыми L_1 и L_2 , содержат часть графика функции $\alpha(x)$, соответствующую интервалу $(a; b)$.

Не трудно доказать (от противного) и обратное: если для любой пары вертикальных углов (L_1, x_0, L_2) , содержащих ось Ox , найдётся интервал $(a; b)$, на котором вертикальные углы (L_1, x_0, L_2) содержат график функции $\alpha(x)$, то функция $\alpha(x)$ является пренебрежимо малой в точке x_0 .

Производная и касательная: идея линеаризации

Рассмотрим прямолинейное движение двух тел. Первое тело движется по закону $S = f(x)$ (здесь время обозначено буквой x), а второе движется равномерно по закону $S = K(x)$. Предположим, что в момент x_0 второе тело поравнялось с первым. Тогда закон движения второго тела имеет вид $K(x) = k(x - x_0) + f(x_0)$. Если в момент x_0 и скорость второго тела оказалась равна скорости первого, то $k = f'(x_0)$. Естественно ожидать, что разность $f(x) - K(x)$ окажется пренебрежимо малой в момент x_0 . Докажем это. Обозначим $\alpha(x) = f(x) - K(x)$, заметим, что $\alpha(x_0) = 0$, и предположим, что $\alpha'(x_0) \neq 0$. Пусть, например, $\alpha'(x_0) > 0$. Тогда $\alpha'(x_0) > \frac{\alpha'(x_0)}{2}$ и функция $\alpha(x)$ обгоняет функцию

$L(x) = \frac{\alpha'(x_0)}{2}(x - x_0)$ в момент x_0 . Тогда $\alpha(x) + K(x)$ (равная $f(x)$) обгоняет функцию

$$L(x) + K(x) = \frac{\alpha'(x_0)}{2}(x - x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + f(x_0) = \left[\frac{\alpha'(x_0)}{2} + f'(x_0) \right](x - x_0) + f(x_0),$$

что невозможно, так как скорость этой функции равна $\frac{\alpha'(x_0)}{2} + f'(x_0)$ и эта скорость больше, чем $f'(x_0)$ – скорость функции $f(x)$ в момент x_0 .

Определение. Прямая K называется касательной к графику функции f в точке $(x_0; f(x_0))$, если разность между функцией $f(x)$ и линейной функцией с графиком K является пренебрежимо малой в точке x_0 .

Выше было доказано, что график функции $K(x) = f'(x_0)(x - x_0) + f(x_0)$ (то есть график равномерного движения со скоростью $f'(x_0)$) является касательной к графику функции $f(x)$ в точке $(x_0; f(x_0))$. Легко доказать и обратное (как всегда «от противного»): если прямая K является касательной к графику функции $f(x)$ в точке $(x_0; f(x_0))$, то угловой коэффициент этой прямой равен $f'(x_0)$.

Теоремы о вычислении производной

Теорема 1. Константу можно выносить за знак производной.

Если $u'(x_0) = k$, то $u(x) = k(x - x_0) + u(x_0) + \alpha(x)$, где $\alpha(x)$ пренебрежимо мала в x_0 . Тогда $Cu(x) = Ck(x - x_0) + Cu(x_0) + C\alpha(x)$. Так как $C\alpha(x)$ пренебрежимо мала по лемме 1, то $(Cu)'(x_0) = Ck = Cu'(x_0)$.

Теорема 2. Производная суммы равна сумме производных.

Если $u'(x_0) = k$ и $v'(x_0) = l$, то $u(x) = k(x - x_0) + u(x_0) + \alpha(x)$ и $v(x) = l(x - x_0) + v(x_0) + \beta(x)$, где $\alpha(x)$ и $\beta(x)$ пренебрежимо малы в x_0 . Тогда $u(x) + v(x) = (k + l)(x - x_0) + (u(x_0) + v(x_0)) + \alpha(x) + \beta(x)$. Применяя лемму 2, получаем: $(u + v)'(x_0) = k + l = u'(x_0) + v'(x_0)$.

Теорема 3. Производная произведения двух функций вычисляется по формуле $(uv)' = u'v + v'u$.

Сначала докажем формулу $(h^2)'(x_0) = 2h(x_0) \cdot h'(x_0)$. Для этого обозначим $f(x) = h(x) - h(x_0)$. Так как $f(x_0) = 0$, то $(f^2)'(x_0) = 0$ (см. пример 1, обобщение). Учитывая, что $h^2(x) = (f(x) + h(x_0))^2 = f^2(x) + 2h(x_0)f(x) + h^2(x_0)$ и применяя теоремы 1 и 2, получаем: $(h^2)'(x_0) = (f^2)'(x_0) + 2h(x_0)f'(x_0) + 0 = 2h(x_0)h'(x_0)$.

Учитывая, что $(u+v)^2 = u^2 + 2uv + v^2$ и $uv = \frac{1}{2}((u+v)^2 - u^2 - v^2)$, получаем:

$$(uv)' = \frac{1}{2}[2(u+v)(u+v)' - 2uu' - 2vv'] = uu' + uv' + vu' + vv' - uu' - vv' = uv' + vu'.$$

Теорема 4. Производная частного двух функций вычисляется по формуле $\left(\frac{u}{v}\right)' = \frac{u'v - v'u}{v^2}$ (в тех точках, где функция $v(x)$ не равна нулю).

Так как $\frac{u}{v} \cdot v = u$, то $\left(\frac{u}{v} \cdot v\right)' = u'$ и, следовательно, $\left(\frac{u}{v}\right)' \cdot v + \frac{u}{v} \cdot v' = u'$. Отсюда

$$\left(\frac{u}{v}\right)' = \frac{1}{v}(u' - \frac{u}{v} \cdot v') = \frac{u'v - v'u}{v^2}.$$

Заключительные замечания

При начальном изучении математического анализа не предполагается доказательство формулы производной сложной функции (кроме очевидного случая, когда «внешняя» функция линейна). Однако, доказательство в общем случае легко получить, опираясь на утверждение, что пренебрежимо малая от любой [дифференцируемой] функции является пренебрежимо малой.

Доказательство необходимого условия экстремума не вызывает ни малейших затруднений. В самом деле, предположение о том, что $f'(x_0) \neq 0$, сразу приводит к противоречию, так как при $k = \frac{f'(x_0)}{2}$ линейная функция $L(x) = k(x - x_0) + f(x_0)$ отстаёт от $f(x)$ в момент x_0 , если $f'(x_0) > 0$, и обгоняет $f(x)$ в момент x_0 , если $f'(x_0) < 0$. В обоих случаях с одной из сторон от точки x_0 функция $f(x)$ оказывается больше, чем $f(x_0)$ (противоречие для случая максимума).

При доказательстве теорем об исследовании функций обычно существенную роль играет теорема Лагранжа. Нам представляется целесообразным на начальном уровне отказаться даже от формулировки этой теоремы существования, а просто принять без доказательства ещё одно утверждение: «Если производная (скорость) на некотором интервале положительна, то на этом интервале функция возрастает (пройденный путь увеличивается)».

Несомненный интерес представляет и то, что при введении производной как скорости довольно просто получить оценку погрешности, возникающей при замене функции на её касательную (а не только локальную линеаризацию).

Литература

1. Гаврилюк, А.В. Наглядные определения непрерывности и дифференцируемости / А.В. Гаврилюк, А.А. Гаврилюк // Международная научная конференция «Х Белорусская математическая конференция». Ч. 1. – Минск, 2008. – С. 124–125.

2. Гаврилюк, А.В. Понятия непрерывности и дифференцируемости в курсе математического анализа: практическое пособие для студентов математических специальностей / А.В. Гаврилюк, А.А. Гаврилюк // Мин-во обр. РБ, Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2009. – 62 с.

3. Гаврилюк, А.В. Проблема определения производной без использования понятия предела / А.В. Гаврилюк, А.А. Гаврилюк // Проблемы физики, математики и техники. – 2010. – № 4(5). – С. 24–28.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступило 03.09.12

Оптимальное управление тепловым процессом в стержне с использованием состояния задачи

Д.С. КУЗЬМЕНКОВ

В статье рассматривается задача оптимального управления тепловым процессом в стержне, предлагается метод ее решения с использованием конечномерных состояний задачи.

Ключевые слова: тепловой процесс, задача оптимального управления, состояние задачи, оптимальная обратная связь, оптимальный регулятор.

The article deals with an optimal control problem of a thermal process in the rod, it offers the method of its solution using finite-dimensional states of a problem.

Keywords: thermal process, optimal control problem, problem state, optimal feedback, optimal regulator.

Введение

Процессы, поведение которых описывается уравнениями параболического типа, встречаются во многих приложениях и являются объектом исследований многочисленных публикаций XX века, они интенсивно изучаются и в настоящее время.

Фундамент современной теории оптимального управления составляют принцип максимума Понтрягина и динамическое программирование Беллмана, которые были разработаны для систем с сосредоточенными параметрами. Эти результаты впоследствии были обобщены на системы с распределенными параметрами [1]–[3]. При этом основное внимание уделялось вопросам качественной теории оптимального управления, значительно меньше работ посвящено конструктивным методам решения задач оптимального управления системами с распределенными параметрами. Проблема синтеза оптимальных систем до сих пор остается одной из трудных задач даже для обыкновенных систем как в рамках принципа максимума, так и в рамках динамического программирования. Исключением является лишь линейно-квадратичная задача Летова-Калмана, которая не содержит геометрических ограничений на управляющие воздействия. В последнее время в теории управления широко используется методология MPC (Model Predictive Control), которая основана на принципе управления в реальном времени. Современная вычислительная техника и новые методы оптимизации позволяют реализовать этот принцип на практике, что особенно важно для решения задач, поведение которых описывается системами обыкновенных дифференциальных уравнений высокого порядка.

В статье рассматривается задача оптимального управления тепловым процессом в стержне с теплообменом на правом конце. Цель данной статьи – обосновать метод управления в реальном времени тепловым процессом в стержне с использованием конечномерных состояний задачи. Эффективность описанного метода подтверждается вычислительными экспериментами.

Постановка задачи, сведение к интервальной задаче ЛП

Рассмотрим задачу оптимального управления тепловым процессом в стержне:

$$\begin{aligned} J(u) &= \int_{t_*}^{t^*} c(t)|u(t)|dt \rightarrow \min, \quad x_t = a^2 x_{ss}, \quad (s, t) \in \Omega; \\ x_s(0, t) &= 0, \quad x_s(l, t) = \mu[u(t) - x(l, t)], \quad t \in T; \quad x(s, t_*) = x_0(s), \quad s \in S; \\ g_* &\leq \int_0^l [x(s, t^*) - y(s)]\phi(s)ds \leq g^*; \\ u(t) &\in U = \{u \in R : |u(t)| \leq u^*\}, \quad t \in T, \end{aligned} \quad (1)$$

где t_* , $t^* > t_*$, $l > 0$, a^2 , $\mu > 0$, $u^* > 0$ – заданные константы; $\Omega = S \times T$, $S = [0, l]$, $T = [t_*, t^*]$; $T_h = \{t_*, t_* + h_t, \dots, t^* - h_t\}$, $h_t = (t^* - t_*)/N$, $I = \{1, 2, \dots, m\}$, m, N – натуральные числа; $c(t) > 0$, $t \in T$, $x_0(s)$, $y(s) \in R$, $\phi(s) \in R^m$, $s \in S$, – непрерывные функции; $g_*, g^* \in R^m$ – заданные векторы, $x = x(s, t) \in R$ – температура в точке $s \in S$ в момент времени $t \in T$, $u = u(t) \in R$ – температура внешней среды в момент времени $t \in T$.

Задачу (1) будем рассматривать в классе дискретных управляющих воздействий $u(t) \in R$, $t \in T$.

Аппроксимируя уравнение объекта управления методом прямых [4], задача (1) сводится к задаче оптимального управления специальной системой обыкновенных дифференциальных уравнений большой размерности

$$J(u) = \int_{t_*}^{t^*} c(t)|u(t)|dt \rightarrow \min, \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_t(s_1, t) = \bar{a}^2 [x(s_2, t) - x(s_1, t)], \\ x_t(s_i, t) = \bar{a}^2 [x(s_{i-1}, t) - 2x(s_i, t) + x(s_{i+1}, t)], i = \overline{2, n-1}; \\ x_t(s_n, t) = \bar{a}^2 [x(s_{n-1}, t) - (1 + h_s \mu)x(s_n, t)] + h_s \bar{a}^2 \mu u(t); \\ x(s_i, t_*) = x_0(s_i), i = \overline{1, n}; \end{cases} \quad (3)$$

$$g_* \leq \sum_{i=1}^n [x(s_i, t^*) - y(s_i)]\phi(s_i) \leq g^*; \quad (4)$$

$$u(t) \in U, t \in T, \quad (5)$$

где $h_s = l/(n-1)$, n – натуральное число; $\bar{a}^2 = a^2/h_s^2$; $s_i = ih_s$, $\phi(s_i) \in R^m$, $i = \overline{1, n}$; $\phi(s_i) = h_s \phi(s_i)$, $i = \overline{2, n-1}$, $\phi(s_1) = h_s \phi(s_1)/2$, $\phi(s_n) = h_s \phi(s_n)/2$.

Программа $u^0(t)$, $t \in T$, называется *оптимальной*, если $J(u^0) = \min_u J(u)$. Соответствующую ей траекторию $x^0(t)$, $t \in T$, будем называть *оптимальной траекторией*.

Для определения *позиционного решения* задачи (2)–(5) погрузим ее в семейство задач

$$\begin{cases} J(u) = \int_{\tau}^{t^*} c(t)|u(t)|dt \rightarrow \min; \\ x_t(s_1, t) = \bar{a}^2 [x(s_2, t) - x(s_1, t)], \\ x_t(s_i, t) = \bar{a}^2 [x(s_{i-1}, t) - 2x(s_i, t) + x(s_{i+1}, t)], i = \overline{2, n-1}; \\ x_t(s_n, t) = \bar{a}^2 [x(s_{n-1}, t) - (1 + h_s \mu)x(s_n, t)] + h_s \bar{a}^2 \mu u(t), \\ x(s_i, \tau) = \chi(s_i), i = \overline{1, n}; \end{cases} \quad (6)$$

$$g_* \leq \sum_{i=1}^n [x(s_i, t^*) - y(s_i)]\phi(s_i) \leq g^*;$$

$$u(t) \in U, t \in T(\tau) = [\tau, t^*],$$

зависящих от позиции $(\tau, \chi(\cdot))$, где $\tau \in T_h$, $\chi(\cdot) = (\chi(s_i) \in R, i = \overline{1, n})$ – непрерывная функция.

Пусть $u^0(t | \tau, \chi(\cdot))$, $t \in T(\tau)$, – оптимальная программа задачи (6) для позиции $(\tau, \chi(\cdot))$; X_τ – множество всех состояний $\chi(\cdot)$, для которых существует оптимальная программа.

Функционал

$$u^0(\tau, \chi(\cdot)) = u^0(t | \tau, \chi(\cdot)), \chi(\cdot) \in X_\tau, \tau \in T_h, \quad (7)$$

называется *оптимальной (дискретной) обратной связью по состоянию системы (позиционным решением задачи (2)–(5))*.

Получение оптимальной обратной связи (7) в явной форме или синтез оптимальных систем в классической постановке представляет собой сложную задачу, которая не решена до сих пор. В статье используется другой подход к синтезу оптимальных систем – оптимальное управление в реальном времени.

Оптимальная обратная связь (7) определена по математической модели (3), но предназначена для управления реальной системой. Замкнем ее оптимальной обратной связью и запишем поведение замкнутой системы

$$\begin{cases} x_t(s_1, t) = \bar{a}^2 [x(s_2, t) - x(s_1, t)] + w, \\ x_t(s_i, t) = \bar{a}^2 [x(s_{i-1}, t) - 2x(s_i, t) + x(s_{i+1}, t)] + w, i = \overline{2, n-1}, \\ x_t(s_n, t) = \bar{a}^2 [x(s_{n-1}, t) - (1 + h_s \mu)x(s_n, t)] + h_s \bar{a}^2 \mu u^0(t, x(t)) + w, \\ x(s_i, t_*) = x_0(s_i), i = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (8)$$

где $u^0(t, x(t)) = u^0(\tau, x(\tau))$, $t \in [\tau, \tau + h_t]$, $\tau \in T_h$; w – совокупность членов, отражающих неточность реализации оптимальной обратной связи, неточности математического моделирования, неточность реализации оптимальной обратной связи и возмущение, действующее на физический объект в процессе управления. Для краткости будем в дальнейшем w называть возмущением.

Предположим, что в процессе управления возмущения реализуются в виде кусочно-непрерывной функции $w^*(t)$, $t \in T$. Они порождают траекторию $x^*(s_i, t)$, $i = \overline{1, n}$, $t \in T$, удовлетворяющую тождеству

$$\begin{cases} x_t^*(s_1, t) = \bar{a}^2 [x^*(s_2, t) - x^*(s_1, t)] + w^*(t), \\ x_t^*(s_i, t) = \bar{a}^2 [x^*(s_{i-1}, t) - 2x^*(s_i, t) + x^*(s_{i+1}, t)] + w^*(t), i = \overline{2, n-1}, \\ x_t^*(s_n, t) = \bar{a}^2 [x^*(s_{n-1}, t) - (1 + h_s \mu)x^*(s_n, t)] + \\ + h_s \bar{a}^2 \mu u^0(t, x^*(t)) + w^*(t), \\ x^*(s_i, t_*) = x_0(s_i), i = \overline{1, n}. \end{cases} \quad (9)$$

Из (9) видно, что в конкретном процессе управления оптимальная обратная связь (7) не используется полностью, нужны лишь ее значения

$$u^*(t) \equiv u^0(t, x^*(t, \cdot)) = u^0(\tau, x^*(\tau, \cdot)), \quad t \in [\tau, \tau + h_t], \quad \tau \in T_h, \quad (10)$$

вдоль одной траектории $x^*(s_i, t)$, $i = \overline{1, n}$, $t \in T$.

Функцию (10) назовем *реализацией оптимальной обратной связи* (7) в конкретном процессе управления.

Согласно принципу управления в реальном времени оптимальная обратная связь (7) не строится, а текущие значения $u^*(\tau)$, $\tau \in T_h$, ее реализации (10) вычисляются в процессе управления за время, не превосходящее h_t , т. е. в режиме реального времени.

Устройство, способное вычислять значения $u^*(\tau)$, $\tau \in T_h$, в режиме реального времени, назовем *оптимальным регулятором*.

Пусть $(f_{1j} \ f_{2j} \ \dots \ f_{nj})$, $j = \overline{1, n}$, – столбцы фундаментальной матрицы системы (3). Они удовлетворяют системе из n обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{f}_{1j} &= \bar{a}^2 (f_{2j} - f_{1j}), \quad \dot{f}_{ij} = \bar{a}^2 (f_{i-1j} - 2f_{ij} + f_{i+1j}), i = \overline{2, n-1}; \\ \dot{f}_{nj} &= \bar{a}^2 (f_{n-1j} - (1 + h_s v(t))f_{nj}), \quad f_{ij}(t_*) = 0, i = \overline{1, n-1}, \quad f_{nj}(t_*) = 1, \quad j = \overline{1, n}, \end{aligned}$$

где $f_{ij} = f(s_i, t; s_j, \theta)$, $t, \theta \in T_h$, $i, j = \overline{1, n}$.

С помощью формулы Коши показывается, что задача (2)–(5) эквивалентна интервальной задаче линейного программирования:

$$J(u) = \sum_{t \in T_h} c_h(t) |u(t)| \rightarrow \min, \quad \tilde{g}_* \leq \sum_{t \in T_h} d_h(t) u(t) \leq \tilde{g}^*, \quad u(t) \in U, \quad t \in T_h, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{где } c_h(t) &= \int_t^{t+h_t} c(\tau) d\tau, \quad \tilde{g}_{*k} = g_{*k} - \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n f(s_i, t^*; s_j, t_*) x_0(s_j) - y(s_i) \right) \varphi_k(s_i), \quad \tilde{g}_k^* = g_k^* - \\ &- \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n f(s_i, t^*; s_j, t_*) x_0(s_j) - y(s_i) \right) \varphi_k(s_i), \quad f_h(s_i, t; s_n, \tau) = h_s \bar{a}^2 \mu \int_\tau^{\tau+h_t} f(s_i, t; s_n, \xi) d\xi, \end{aligned}$$

$$d_{hk}(t) = \sum_{i=1}^n f_h(s_i, t^*; s_n, t) \phi_k(s_i), \quad t \in T_h, \quad k = \overline{1, m}. \quad (12)$$

Далее задача (11) решается двойственным методом [5]. На итерациях двойственного метода вместо фундаментальной матрицы решений системы (3) будем использовать ее квазидекомпозицию [6]. Она позволяет интегрирование системы порядка n заменить на параллельное интегрирование r систем значительно меньшего порядка m , что существенно при оптимальном управлении в реальном времени (функции (12) строятся за более короткие промежутки времени).

Состояние задачи

При решении линейно-выпуклых задач оптимального управления системами с распределенными параметрами (2)–(5) вместо бесконечномерных состояний системы (3) можно использовать конечномерные состояния задачи, учитывающие не только состояния системы, но и ограничения задачи [7]. Для задачи (2)–(5) бесконечномерную позицию системы $(\theta, \chi(\cdot))$ заменим на конечномерную позицию задачи (θ, ξ) , где $\xi = \xi(\theta, \chi(\cdot)) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n f(s_i, t^*; s_j, \theta) \chi(s_j) - y(s_i) \right) \phi(s_i)$.

Вектор $\xi = \xi(\theta, \chi(\cdot)) \in R^m$ назовем *состоянием задачи* (2)–(5) для позиции задачи $(\theta, \chi(\cdot))$. Он содержит информацию, достаточную для построения оптимальной программы общей задачи семейства (6) [7].

Используя формулу Коши для позиции $(\theta, \chi(\cdot))$, вместо задачи (11) получаем задачу

$$J(u) = \sum_{t \in T_h} c_h(t) |u(t)| \rightarrow \min, \\ g_* - \xi \leq \sum_{t \in T_h} \bar{d}_h(t) u(t) \leq g^* - \xi, \quad u(t) \in U, \quad t \in T_h, \quad (13)$$

$$\text{где } \bar{d}_{hk}(t) = \sum_{i=1}^n f_h(s_i, t; s_n, \theta) \phi_k(s_i), \quad t \in T_h, \quad k = \overline{1, m}.$$

Пусть $u^0(t | \theta, \xi)$, $t \in T(\theta)$, – оптимальная программа задачи (13) для позиции задачи (θ, ξ) , Ξ_θ – множество всех состояний задачи ξ , для которых существует оптимальная программа. Функционал

$$u^0(\theta, \xi) = u^0(\theta | \theta, \xi), \quad \xi \in \Xi_\theta, \quad \theta \in T_h, \quad (14)$$

называется *оптимальным управлением типа (дискретной) обратной связи по состоянию задачи (оптимальной обратной связью по состоянию задачи)*.

Траектория $x^*(t, \cdot)$, $t \in T$, порождает состояния задачи $\xi^*(\tau) = \xi^*(\tau, x^*(\tau, \cdot))$, $\tau \in T_h$, которые будем считать доступными в каждый момент времени $\tau \in T_h$ в процессе управления.

Функцию $u^*(t) \equiv u^*(\tau) = u^0(\tau, \xi^*(\tau))$, $t \in [\tau, \tau + h_t[$, $\tau \in T_h$, назовем *реализацией оптимальной обратной связи* (14) в конкретном процессе управления.

Алгоритм работы оптимального регулятора

До начала процесса управления оптимальный регулятор, используя двойственный метод [5], строит оптимальную опору $K_{on}^0(t_*) = \{I_{on}^0(t_*), T_{on}^0(t_*)\}$ и оптимальную программу $u^0(t | t_*, \xi^*(t_*))$, $t \in T_h$, задачи (2)–(5) для начальной позиции $(t_*, \xi^*(t_*))$, сохраняет текущую информацию для момента времени t_* : $K_{on}^0(t_*)$; $T_{n0}^{+,0}(t_*)$; $T_{n0}^{-,0}(t_*)$; $v_{on}(t_*)$; $D(I, T_{on}^0 | t_*)$; $D_{on}^{-1}(t_*)$; $\tilde{F}(t)$, $t \in T_{on}^0(t_*) \cup T_{n0}^{+,0}(t_*) \cup T_{n0}^{-,0}(t_*)$; $p(t_*)$; $\omega(t | t_*)$, $t \in T_{on}^0$; $\zeta(t_*)$.

С началом процесса управления оптимальный регулятор подает на вход объекта (8) управляющее воздействие $u^*(t) \equiv u^*(t_*) = u^0(t_* | t_*, \xi^*(t_*))$, $t \in [t_*, t_* + h_t + \vartheta(t_* + h_t)[$, где $\vartheta(\tau)$,

$\tau \in T_h$, – время, затрачиваемое на вычисление значения $u^*(\tau)$ реализации оптимальной обратной связи (14).

Пусть процесс управления проведен на промежутке $[t_*, \tau[$. Оптимальный регулятор уже выработал управляющие воздействия $u^*(t_*)$, $u^*(t_* + h_t)$, ..., $u^*(\tau - h_t)$. Под действием этих управляющих воздействий и возмущения $w^*(t)$, $t \in [t_*, \tau[$, физический объект оказался в состоянии $x^*(\tau, \cdot)$, которое порождает состояние задачи $\xi^*(\tau)$. Оно становится известным оптимальному регулятору. В предыдущий момент $\tau - h_t$ оптимальный регулятор для отыскания значения $u^*(\tau - h_t)$ решил задачу (6) для позиции $(\tau - h_t, \xi^*(\tau - h_t))$ и запомнил ее оптимальную опору $K_{on}^0(\tau - h_t)$. Функциональная форма этой задачи принимает вид

$$\begin{aligned} J(u) &= \sum_{t \in T_h(\tau - h_t)} c_h(t) |u(t)| \rightarrow \min, \\ g_* - \xi^*(\tau - h_t) &\leq \sum_{t \in T_h(\tau - h_t)} \bar{d}_h(t) u(t) \leq g^* - \xi^*(\tau - h_t), \\ u(t) &\in U, \quad t \in T_h(\tau - h_t) = (\tau - h_t, \tau, \dots, t^* - h_t), \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{где } \xi^*(\tau - h_t) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n f(s_i, t^*; s_j, \tau - h_t) x^*(s_j, \tau - h_t) - y(s_i) \right) \phi(s_i).$$

В результате решения задачи (15) к моменту τ была получена и сохранена в памяти компьютера следующая информация: $K_{on}^0(\tau - h_t)$; $T_{n0}^{+,0}(\tau - h_t)$; $T_{n0}^{-,0}(\tau - h_t)$; $v_{on}(\tau - h_t)$; $D(I, T_{on}^0 | \tau - h_t)$; $D_{on}^{-1}(\tau - h_t)$; $\tilde{F}(\tau - h_t)$, $t \in T_{on}^0(\tau - h_t) \cup T_{n0}^{+,0}(\tau - h_t) \cup T_{n0}^{-,0}(\tau - h_t)$; $p(\tau - h_t)$; $\omega(t | \tau - h_t)$, $t \in T_{on}^0$; $\zeta(\tau - h_t)$. Для построения текущего значения $u^*(\tau)$ реализации оптимальной обратной связи для позиции $(\tau, \xi^*(\tau))$ оптимальный регулятор на промежутке $[\tau, \tau + h_t[$ должен решить задачу

$$\begin{aligned} J(u) &= \sum_{t \in T_h(\tau)} c_h(t) |u(t)| \rightarrow \min, \\ g_* - \xi^*(\tau) &\leq \sum_{t \in T_h(\tau)} \bar{d}_h(t) u(t) \leq g^* - \xi^*(\tau), \\ u(t) &\in U, \quad t \in T_h(\tau), \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{где } \xi^*(\tau) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n f(s_i, t^*; s_j, \tau) x^*(s_j, \tau) - y(s_i) \right) \phi(s_i).$$

Для решения задачи (16) оптимальный регулятор находит значения псевдопрограммы в опорные моменты времени $\omega_{on}(\tau) = D_{on}^{-1}(\tau - h_t)(\zeta_{on}(\tau - h_t) - \xi_{on}(\tau) - p_{on}(\tau))$ и неопорные значения выходного псевдосигнала $\zeta_n(\tau) = D(I_n, T_{on}^0 | \tau - h_t) \omega_{on}(\tau) + \xi_n(\tau) + p_n(\tau)$. При выполнении неравенств $|\omega(t | \tau)| \leq u^*$, $t \in T_{on}^0(\tau)$; $g_{*i} \leq \zeta_i(\tau) \leq g_i^*$, $i \in I_n(\tau)$, оптимальная опора задачи (15) согласно критерию оптимальности [5] является оптимальной и в задаче (16): $K_{on}^0(\tau) = K_{on}^0(\tau - h_t)$. В противном случае осуществим итерации двойственного метода [5], выбрав в качестве начальной опоры $K_{on}^1(\tau)$ оптимальную опору $K_{on}^0(\tau - h_t)$. При этом будет преобразована текущая информация: $D(I, T_{on}^0 | \tau) = D(I, T_{on}^0 | \tau - h_t)$; $D_{on}^{-1}(\tau) = D_{on}^{-1}(\tau - h_t)$; $v_{on}(\tau) = v_{on}(\tau - h_t)$; $p(\tau) = p(\tau - h_t) - D(\tau - h_t) u^* D(\tau - h_t)$; $\zeta_{on}(\tau) = \zeta_{on}(\tau - h_t)$. Если $\tau \notin T_{n0}^{+,0}(\tau - h_t)$, то положим $T_{n0}^{+,0}(\tau) = T_{n0}^{+,0}(\tau - h_t)$; если $\tau \in T_{n0}^{+,0}(\tau - h_t)$, то $T_{n0}^{+,0}(\tau) = T_{n0}^{+,0}(\tau - h_t) \setminus \tau$. Если же $\tau \notin T_{n0}^{-,0}(\tau - h_t)$, то положим $T_{n0}^{-,0}(\tau) = T_{n0}^{-,0}(\tau - h_t)$; если $\tau \in T_{n0}^{-,0}(\tau - h_t)$, то $T_{n0}^{-,0}(\tau) = T_{n0}^{-,0}(\tau - h_t) \setminus \tau$.

Построив оптимальную опору $K_{on}^0(\tau)$ задачи (16), оптимальный регулятор подает на вход системы (8) управляющие воздействие $u^*(t) = u^*(\tau) = u^0(\tau | \tau, \xi^*(\tau))$, $t \in [\tau + \vartheta(\tau), \tau + h_i + \vartheta(\tau + h_i)]$.

Заключение

В статье рассматривается задача оптимального управления тепловым процессом в стержне и предлагается метод ее решения, основанный на динамической реализации двойственного метода [5] и процедуре квазидекомпозиции [6]. Использование вместо бесконечномерных состояний системы (3) конечномерных состояний задачи позволяет быстро строить текущие значения оптимальной обратной связи. Описанные результаты могут быть использованы при решении других задач оптимального управления системами с распределенными параметрами.

Литература

1. Бутковский, А.Г. Методы оптимального управления системами с распределенными параметрами / А.Г. Бутковский. – М. : Наука, 1975. – 568 с.
2. Егоров, А.И. Оптимальное управление тепловыми и диффузионными процессами / А.И. Егоров. – М. : Наука, 1978. – 468 с.
3. Лионс, Ж.Л. Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными / Ж.Л. Лионс. – М. : Мир, 1972. – 414 с.
4. Крылов, В.И. Начала теории вычислительных методов. Уравнения в частных производных / В.И. Крылов, В.В. Бобков, П.И. Монастырный. – Минск : Наука и техника, 1986. – 311 с.
5. Габасов, Р. Конструктивные методы оптимизации : в 5 ч. / Р. Габасов, Ф.М. Кириллова, А.И. Тятюшкин. – Минск : Университетское, 1984–1998. – Ч. 1 : Линейные задачи. – 1984. – 213 с.
6. Габасов, Р. Оптимальное управление тепловым процессом / Р. Габасов, Ф.М. Кириллова, Д.С. Кузьменков // Докл. НАН Беларуси. – 2009. – Т. 53, № 1. – С. 5–9.
7. Балашевич, Н.В. Оптимальное управление линейными системами с запаздыванием / Н.В. Балашевич, Р. Габасов, Ф.М. Кириллова // Докл. РАН. – 2006. – Т. 410, № 2. – С. 173–178.

Асимптотика эрмитовой аппроксимации экспонент

А.П. СТАРОВОЙТОВ

В данной работе изучаются асимптотические свойства интегралов Эрмита. В частности, найдены асимптотики диагональных аппроксимаций Эрмита-Паде для системы экспонент. Аналогичные результаты получены и для системы вырожденных гипергеометрических функций.

Ключевые слова: интегралы Эрмита, совместные аппроксимации Паде, аппроксимации Эрмита-Паде, асимптотические равенства.

The paper deals with asymptotic properties of Hermite integrals. In particular, the asymptotics of Hermite-Pade diagonal approximations for the system of exponents are determined. Similar results are proved for the system of confluent hypergeometric functions.

Keywords: Hermite integrals, Pade joint approximations, Hermite-Pade approximations, asymptotic equality.

Введение

Рассмотрим набор

$$f_j(z) = \sum_{i=0}^{\infty} f_i^j z^i, \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (1.1)$$

голоморфных в нуле функций или формальных степенных рядов. Зафиксируем произвольные целые неотрицательные числа $n, m_1, m_2, \dots, m_k$. По определению полагаем $m = \sum_{i=1}^k m_i$, $n_j = n + m - m_j$, $j = 1, 2, \dots, k$. Известно (см. [1]), что при $j = 1, 2, \dots, k$ существуют такие многочлены $Q_m(z)$, $P_{n_j}^j(z)$, $\deg Q_m \leq m$, $\deg P_{n_j}^j \leq n_j$, для которых

$$R_{n,m}^j(z) = Q_m(z)f_j(z) - P_{n_j}^j(z) = A_j z^{n+m+1} + \dots \quad (1.2)$$

Если $k = 1$, то согласно теореме Паде ([2], теорема 1.1.1) многочлены $Q_m(z)$, $P_n^1(z)$ определяются с точностью до однородной константы, а их отношение задает единственную рациональную функцию $\pi_{n,m}(z, f_1) = P_n^1(z) / Q_m(z)$, которую называют аппроксимацией Паде для $f_1(z)$. При $k \geq 2$ дроби $\pi_{n,m}^j(z) = \pi_{n_j,m}^j(z; f_j) = P_{n_j}^j(z) / Q_m(z)$, $j = 1, 2, \dots, k$ условиями (1.2) определяются, вообще говоря, не однозначно. В случае единственности множества $\{\pi_{n,m}^j(z)\}_{j=1}^k$ его элементы называют совместными аппроксимациями Паде для системы функций (1.1). Единственность, в частности, имеет место для совершенных систем функций (определение и примеры совершенных систем функций см. в [1], [3]–[5]). Совершенной является, например, система экспонент $f_j(z) = e^{\lambda_j z}$, $j = 1, 2, \dots, k$, где $\{\lambda_j\}_{j=1}^k$ – различные комплексные числа (см. [1], теорема 2.1). Без формального определения этот факт был установлен Ш. Эрмитом [6].

В случае одной экспоненты e^z явные выражения для числителя и знаменателя $\pi_{n,m}(z; e^z)$ получил Паде (см. [1]). Опираясь на полученные представления, он доказал, что при $n/m \rightarrow \gamma$, $0 \leq \gamma \leq +\infty$ на компактах комплексной плоскости дроби $\pi_{n,m}(z; e^z)$ равномерно сходятся к e^z . О. Перрон [7] обобщил результаты о сходимости $\pi_{n,m}(z; e^z)$ к e^z , доказав ее при $n+m \rightarrow +\infty$. Г. Мейнардус сформулировал гипотезу об асимптотике поведения разности $e^z - \pi_{n,m}(z; e^z)$. Гипотеза Г. Мейнардуса была доказана Д. Браессом [8]: для любого комплексного z при $n+m \rightarrow +\infty$

$$e^z - \pi_{n,m}(z; e^\xi) = \frac{(-1)^m n! m! e^{2mz/(n+m)}}{(n+m)!(n+m+1)!} z^{n+m+1} (1 + o(1)). \quad (1.3)$$

При доказательстве асимптотического равенства (1.3) Д. Браесс опирается на полученные О. Перроном [7] интегральные представления числителя и знаменателя $\pi_{n,m}(z; e^\xi)$:

$$P_n^1(z; e^\xi) = \int_0^\infty t^m (t+z)^n e^{-t} dt, \quad Q_m(z; e^\xi) = \int_0^\infty t^n (t-z)^m e^{-t} dt.$$

Позже выяснилось (см., например, [1], [9]), что явный вид числителей и знаменателей аппроксимаций Паде для e^z и, более того, для совместных аппроксимаций Паде к набору экспонент $\{e^{\lambda_j z}\}_{j=1}^k$ фактически был известен ещё Эрмиту.

Эрмит [6] ввел в рассмотрение интегралы

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{(p-1)!} \int_0^\infty [x \prod_{i=1}^k (x-i)]^{p-1} e^{-x} dx, \\ M_j &= \frac{e^j}{(p-1)!} \int_j^\infty [x \prod_{i=1}^k (x-i)]^{p-1} e^{-x} dx, \\ \varepsilon_j &= \frac{e^j}{(p-1)!} \int_0^j [x \prod_{i=1}^k (x-i)]^{p-1} e^{-x} dx, \end{aligned} \quad (1.4)$$

которые после небольших преобразований (см. [1], [9]) приводят к решению системы (1.2) для набора экспонент $\{e^{\lambda_j z}\}_{j=1}^k$:

$$\begin{aligned} Q_m(z) &= \frac{z^{n+m+1}}{(n+m)!} \int_0^\infty [x^n \prod_{i=1}^k (x-\lambda_i)^{m_i}] e^{-zx} dx, \\ P_{n_j}^j(z) &= \frac{e^{\lambda_j z} z^{n+m+1}}{(n+m)!} \int_{\lambda_j}^\infty [x^n \prod_{i=1}^k (x-\lambda_i)^{m_i}] e^{-zx} dx, \\ R_{n,m}^j(z) &= \frac{e^{\lambda_j z} z^{n+m+1}}{(n+m)!} \int_0^{\lambda_j} [x^n \prod_{i=1}^k (x-\lambda_i)^{m_i}] e^{-zx} dx. \end{aligned} \quad (1.5)$$

В первых двух интегралах (1.5) интегрирование осуществляется по контуру, идущему в $+\infty$ и $\operatorname{Re} z > 0$. При $\operatorname{Re} z \geq 0$ значения $Q_m(z)$, $P_{n_j}^j(z)$ находятся с помощью аналитического продолжения. В интеграле, определяющем $R_{n,m}^j(z)$, интегрирование проводится по любой кривой, соединяющей точки 0 и λ_j .

Интегралы Эрмита (1.4) при некоторых простых p дают удачное приближение к набору $\{e^j\}_{j=1}^k$:

$$e^j - \frac{M_j}{M} = \frac{\varepsilon_j}{M}, \quad j=1, 2, \dots, k. \quad (1.6)$$

Так, в предположении существования равенства

$$a_0 + a_1 e + \dots + a_k e^k = 0,$$

где $a_0 \neq 0$ и $a_0, a_1, \dots, a_k$ — целые числа, из (1.6) следует, что

$$(a_0 M + a_1 M_1 + \dots + a_k M_k) + (a_0 \varepsilon + a_1 M \varepsilon_1 + \dots + a_k \varepsilon_k) = 0.$$

Последнее соотношение противоречит элементарным свойствам этих интегралов: M — целое отличное от нуля число, не делящееся на p при достаточно большом простом p ; M_j — целые числа кратные p ; ε_j убывают к нулю при $p \rightarrow +\infty$. Таково, в общих чертах, доказательство трансцендентности числа e , предложенное Эрмитом (см. [10]).

В 1882 году Линдеман, несколько усложнив рассуждения Эрмита, доказал трансцендентность числа π , решив тем самым одну из самых старых задач математики — «задачу о

квадратуре круга». В основу предложенного им доказательства (см. [10]) легли элементарные свойства интегралов (1.5) и равенства

$$e^{\lambda_j} - \frac{P_{n_j}^j(1)}{Q_m(1)} = \frac{R_{n,m}^j(1)}{Q_m(1)}, \quad j=1,2,\dots,k,$$

где λ_j – различные алгебраические числа, а $P_{n_j}^j(z)$, $Q_m(z)$, $R_{n,m}^j(z)$ определены равенствами (1.5), если положить в них $n = m_1 = m_2 = \dots = m_k$.

Е.М. Никишин был один из первых, кто обратил внимание на важность дальнейшего изучения свойств интегралов (1.4), (1.5). В частности, им была поставлена задача об исследовании сходимости совместных аппроксимаций Паде для системы экспонент. Её решение было получено А.И. Аптекаревым [9], который, найдя асимптотику поведения первого из интегралов в (1.5), показал, что при $n+m \rightarrow +\infty$ для любого $j=1,2,\dots,k$ $\pi_{n_j,m}^j(z; e^{\lambda_j \xi})$ сходится равномерно на компактах комплексной плоскости к $e^{\lambda_j z}$. В частности, в [9] установлен следующий аналог леммы Перрона (см. [7]), доказывающей сходимость $\pi_{n,m}(z; e^{\xi})$ к e^z : для любых n, m_j

$$\left| Q_m(z) - \exp \left\{ - \frac{\sum_{j=1}^r \lambda_j m_j}{n+m} z \right\} \right| \leq \frac{\left| z \sum_{j=1}^r \lambda_j \right|^2}{n+m} \exp \left\{ \left| z \sum_{j=1}^r \lambda_j \right| \right\},$$

где $Q_m(z)$ – знаменатель совместных аппроксимаций Паде к набору $\{e^{\lambda_j z}\}_{j=1}^k$. Из этого неравенства следует, что при $n+m \rightarrow +\infty$ для любого $|z| \leq L$

$$Q_m(z) = \exp \left\{ - \frac{\sum_{j=1}^r \lambda_j m_j}{n+m} z \right\} \cdot \left\{ 1 + O \left(\frac{1}{n+m} \right) \right\}. \quad (1.7)$$

Здесь и далее L – положительная постоянная. Учитывая более современную терминологию (см., например, [5], [11]), в дальнейшем совместные аппроксимации Паде будем называть аппроксимациями Эрмита-Паде.

В данной работе изучаются асимптотические свойства интегралов Эрмита, определяющих в равенствах (1.5) функции $R_{n,m}^j(z)$. При $j=1,2,\dots,k$ найдены асимптотики эрмитовой аппроксимации системы экспонент $\{e^{jz}\}_{j=1}^k$ дробями $\pi_{kn,kn}^j(z; e^{j\xi})$. Аналогичные результаты установлены и для системы вырожденных гипергеометрических функций $\{F_\gamma^j(z) = {}_1F_1(1, \gamma; jz)\}_{j=1}^k$.

Первый результат об асимптотике аппроксимаций Эрмита-Паде к набору из двух марковских функций был получен В.А. Калягиным [12]. Главный член асимптотики, а также сходимость аппроксимаций Эрмита-Паде для набора марковских функций, порожденных системой Анжелеско, были исследованы в фундаментальной работе А.А. Гончара и Е.А. Рахманова [4]. Вопросы единственности, а также свойства главного члена асимптотики аппроксимаций Эрмита-Паде марковских функций для системы Никишина интенсивно исследовались рядом авторов (см. [14]–[16]). Отметим работы [5], [17]–[19] А.И. Аптекарева с соавторами (см. также обзор [11]), в которых рассматривались близкие задачи для различных совершенных систем функций.

Далее, полагаем

$$\begin{aligned} \phi(x) &= x(x+1) \cdot \dots \cdot (x+k), \\ S(x) &= \ln \left((-1)^i \phi(x) \right), \quad x \in (-i, -i+1), \\ S(i) &= -\infty, \quad i=1,2,\dots,k. \end{aligned}$$

Многочлен $\phi(x)$ имеет нули только в точках $0, -1, -2, \dots, -k$. Следовательно, на каждом из интервалов $(-1, 0), (-2, -1), \dots, (-k, -k+1)$ производная $\phi'(x)$ обращается в ноль. Пусть $x_1, x_2, \dots, x_k$ – нули $\phi'(x)$, занумерованные в порядке убывания, т. е. $x_i \in (-i, -i+1)$, $i = 1, 2, \dots, k$. Так как $\deg \phi'(x) = k$, то других нулей у многочлена $\phi'(x)$ нет. Нетрудно заметить, что на интервале $(-i, -i+1)$ функция $S(x)$ принимает наибольшее значение в точке x_i , т. е. $S(x) < S(x_i)$ при $x \in (-i, -i+1) \setminus \{x_i\}$. На каждом из интервалов $(-i, -i+1)$

$$S'(x) = \frac{\phi'(x)}{\phi(x)},$$

$$S''(x) = \frac{\phi''(x)\phi(x) - [\phi'(x)]^2}{\phi^2(x)} = -\frac{1}{x^2} - \frac{1}{(x+1)^2} - \dots - \frac{1}{(x+k)^2}.$$

Отсюда, в частности, следует, что

$$S''(x_i) = \phi''(x_i) / \phi(x_i) < 0.$$

Перейдем к формулировке основного результата настоящей работы.

Теорема 1. Пусть $n = m_1 = m_2 = \dots = m_k$ и $\pi_{kn, kn}^j(z; e^{j\xi})$ – аппроксимации Эрмита-Паде для системы экспонент $\{e^{jz}\}_{j=1}^k$. Тогда для любого комплексного z , $|z| \leq L$, при $n \rightarrow +\infty$

$$e^{jz} - \pi_{kn, kn}^j(z; e^{j\xi}) = (-1)^{kn} \frac{z^{kn+n+1}}{(kn+n)!} e^{(j+k/2)z} \times$$

$$\times \sum_{i=1}^j (-1)^{(i+1)n} \sqrt{-\frac{2\pi}{nS''(x_i)}} e^{nS(x_i)} e^{zx_i} (1 + O_i(1/n)), \quad (1.8)$$

где $j = 1, 2, \dots, k$.

В частности, при $k = 1$

$$\phi(x) = x(x+1), \quad S(x) = \ln[-x(x+1)], \quad x \in (-1, 0),$$

$$x_1 = -1/2, \quad S(x_1) = -\ln 4, \quad S''(x_1) = -8.$$

Поэтому

$$e^z - \pi_{n, n}^1(z; e^\xi) = (-1)^n \frac{z^{2n+1}}{(2n)!} e^z \sqrt{\frac{\pi}{4n}} \frac{1}{4^n} (1 + o(1)). \quad (1.9)$$

Напомним, что бесконечно малые (б. м.) величины $\{\alpha_n\}_{n=0}^\infty$, $\{\beta_n\}_{n=0}^\infty$ называют эквивалентными ($\alpha_n \sim \beta_n$), если $\alpha_n / \beta_n \rightarrow 1$ при $n \rightarrow +\infty$.

С помощью формулы Стирлинга нетрудно показать, что

$$\frac{(n!)^2}{(2n+1)!} \sim \sqrt{\frac{\pi}{4n}} \frac{1}{4^n}.$$

Это означает, что асимптотические равенства (1.3) и (1.9) согласуются. Таким образом, при $n = m$ получили другое доказательство теоремы Д. Браесса [8].

Подробнее остановимся на случаях, когда $k = 2, 3$.

Следствие 1. Пусть $\{e^z, e^{2z}\}$ – набор из двух экспонент и $n = m_1 = m_2$. Тогда для любого комплексного z , $|z| \leq L$, при $n \rightarrow +\infty$

$$e^z - \pi_{2n, 2n}^1(z; e^\xi) = \frac{z^{3n+1}}{(3n)!} e^z \sqrt{\frac{2\pi}{9n}} \left(\frac{2}{3\sqrt{3}}\right)^n e^{z/\sqrt{3}} (1 + o(1)),$$

$$e^{2z} - \pi_{2n, 2n}^2(z; e^{2\xi}) =$$

$$= \frac{z^{3n+1}}{(3n)!} e^{2z} \sqrt{\frac{2\pi}{9n}} \left(\frac{2}{3\sqrt{3}}\right)^n \left\{ e^{z/\sqrt{3}} + (-1)^n e^{-z/\sqrt{3}} \right\} (1 + o(1)). \quad (1.10)$$

Для доказательства равенств (1.10) достаточно заметить, что при $k = 2$

$$\phi(x) = x(x+1)(x+2), \quad x_1 = -1 + 1/\sqrt{3}, \quad x_2 = -1 - 1/\sqrt{3},$$

$$S(x_1) = S(x_2) = \ln[2/(3\sqrt{3})], \quad S''(x_1) = S''(x_2) = -9.$$

Ранее другим методом аналогичные (1.10) равенства были получены в [20]. В них вместо б. м. $\sqrt{2\pi/9n} \cdot [2/(3\sqrt{3})]^n$ в качестве множителя правой части стоит эквивалентная ей б. м. $B((n+1)/2; n+1)$, где $B(\cdot; \cdot)$ – бета-функция Эйлера.

Следствие 2. Пусть $\{e^z, e^{2z}, e^{3z}\}$ – набор из трёх экспонент и $n = m_1 = m_2 = m_3$. Тогда для любого комплексного z , $|z| \leq L$, при $n \rightarrow +\infty$

$$\begin{aligned} e^z - \pi_{3n,3n}^1(z; e^z) &= (-1)^n \frac{z^{4n+1}}{(4n)!} e^z \sqrt{\frac{\pi}{5n}} e^{\sqrt{5}z/2} (1 + o(1)), \\ e^{2z} - \pi_{3n,3n}^2(z; e^{2z}) &= (-1)^n \frac{z^{4n+1}}{(4n)!} e^{2z} \sqrt{\frac{\pi}{5n}} e^{\sqrt{5}z/2} (1 + o(1)), \\ e^{3z} - \pi_{3n,3n}^3(z; e^{3z}) &= (-1)^n \frac{z^{4n+1}}{(4n)!} e^{3z} \sqrt{\frac{\pi}{5n}} \{e^{\sqrt{5}z/2} + e^{-\sqrt{5}z/2}\} (1 + o(1)). \end{aligned} \quad (1.11)$$

Для доказательства равенств (1.11) достаточно заметить, что при $k = 3$

$$\phi(x) = x(x+1)(x+2)(x+3), \quad x_1 = (-3 + \sqrt{5})/2, \quad x_3 = (-3 - \sqrt{5})/2,$$

$$x_2 = -3/2, \quad S(x_1) = S(x_3) = 0, \quad S(x_2) = \ln(9/16),$$

$$S''(x_1) = S''(x_3) = -10, \quad S''(x_2) = -80/9.$$

При исследовании асимптотики интегралов Эрмита (1.5) применяем метод Лапласа (см., например, [21]). В §2 приводятся необходимые сведения об интегралах Лапласа, доказывается основная теорема 1. В §3 получено обобщение теоремы 1. Здесь рассматриваются аппроксимации Эрмита-Паде системы вырожденных гипергеометрических функций.

Доказательство теоремы 1

Интегралы вида

$$F(\lambda) = \int_I f(x) e^{\lambda S(x)} dx \quad (2.1)$$

называют интегралами Лапласа. Здесь I – либо отрезок $[a, b]$, либо интервал (a, b) , λ – большой параметр. Будем считать, что функция $S(x)$ принимает только действительные значения. Функция $f(x)$ может быть комплекснозначной. Считаем также, что $f(x)$ и $S(x)$ непрерывны при $x \in I$. Нас интересует асимптотическое поведение интеграла $F(\lambda)$ при $\lambda \rightarrow +\infty$.

Следующее утверждение (см. [21], §43, п. 1, лемма 1) дает грубую экспоненциальную оценку для интеграла Лапласа.

Утверждение 1. Пусть $I = (a, b)$ – конечный или бесконечный интервал, $S(x) \leq c$ при $x \in I$ и интеграл (2.1) сходится абсолютно при некотором $\lambda_0 > 0$. Тогда при $\operatorname{Re} \lambda \geq \lambda_0$

$$|F(\lambda)| \leq c_1 e^{c \operatorname{Re} \lambda},$$

где c_1 – положительная постоянная.

В дальнейшем ограничимся случаем, когда $S(x)$ достигает наибольшего значения на отрезке $I = [a, b]$ в единственной точке, лежащей внутри этого отрезка. Справедливо (см. [21], §43, п. 4, теорема 2) следующее

Утверждение 2. Пусть $S(x) < S(x_0)$, $x \neq x_0$, $a < x_0 < b$, $S''(x_0) \neq 0$ и функции $f(x)$, $S(x)$ бесконечно дифференцируемы в некоторой окрестности точки x_0 . Тогда при $\lambda \rightarrow +\infty$ справедливо асимптотическое равенство

$$F(\lambda) = \sqrt{-\frac{2\pi}{nS''(x_0)}} e^{\lambda S(x_0)} \{f(x_0) + O(\lambda^{-1})\}. \quad (2.2)$$

Перейдем к доказательству теоремы 1.

Лемма 1. Пусть $n = m_1 = m_2 = \dots = m_k$ и $R_{n,m}^j(z)$ – функции, определяемые равенствами (1.5) для системы экспонент $\{e^{jz}\}_{j=1}^k$. Тогда для любого комплексного z , $|z| \leq L$, при $n \rightarrow +\infty$

$$R_{n,m}^j(z) = (-1)^{kn} \frac{z^{kn+n+1}}{(kn+n)!} e^{jz} \times \\ \times \sum_{i=1}^j (-1)^{(i+1)n} \sqrt{-\frac{2\pi}{nS''(x_i)}} e^{nS(x_i)} e^{zx_i} (1 + O_i(1/n)), \quad (2.3)$$

где $j = 1, 2, \dots, k$.

Доказательство. В условиях теоремы

$$R_{n,kn}^j(z) = \frac{z^{kn+n+1}}{(kn+n)!} e^{jz} \int_0^j x^n (x-1)^n \dots (x-k)^n e^{-zx} dx. \quad (2.4)$$

Интеграл в правой части равенства (2.4) обозначим через $I_j(z)$ и представим в виде

$$I_j(z) = \sum_{i=1}^j I_j^i(z), \text{ где } I_j^i(z) = \int_{i-1}^i x^n (x-1)^n \dots (x-k)^n e^{-zx} dx. \quad (2.5)$$

В $I_j^i(z)$ заменим переменную интегрирования x на $-x$. Тогда

$$I_j^i(z) = (-1)^{kn+(i+1)n} \int_{-i}^{-i+1} e^{zx} e^{n \ln[(-1)^i x(x+1) \dots (x+k)]} dx = \\ = (-1)^{kn+(i+1)n} \int_{-i}^{-i+1} e^{zx} e^{nS(x)} dx.$$

В последнем интеграле разобьем область интегрирования $(-i, -i+1)$ на три части: $(-i, -i+\tau]$, $[-i+\tau, -i+1-\tau]$, $[-i+1-\tau, -i+1)$, где $0 < \tau < 1$ и выбрано так, чтобы $x_i \in [-i+\tau, -i+1-\tau]$. Поскольку на интервале $(-i, -i+1)$ функция $S(x)$ принимает наибольшее значение в единственной точке x_i , то, в силу утверждения 1, несобственные интегралы по первому и третьему промежуткам экспоненциально малы по сравнению с $e^{nS(x_i)}$. Асимптотика интеграла по отрезку $[-i+\tau, -i+1-\tau]$ вычисляется по формуле (2.2), если положить в ней $f(x) = e^{zx}$. Поэтому при $n \rightarrow +\infty$

$$I_j^i(z) = (-1)^{kn+(i+1)n} \sqrt{-\frac{2\pi n}{S''(x_i)}} e^{nS(x_i)} e^{zx_i} (1 + O_i(1/n)).$$

Отсюда и из равенств (2.4), (2.5) следуют равенства (2.3). Лемма 1 доказана.

Легко заметить, что утверждения (1.8) теоремы 1 вытекают из (2.3). Для этого достаточно учесть, что при $n = m_1 = m_2 = \dots = m_k$, $\lambda_j = j$, $j = 1, 2, \dots, k$ из неравенства А.И. Аптекарева (см. (1.7)) при $n \rightarrow +\infty$ следует

$$Q_m(z) = e^{-kz/2} (1 + O(1/n)).$$

Таким образом, теорема 1 доказана.

Замечание 1. В общем случае, когда λ_j – отличные от нуля действительные числа и $\lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_k$, асимптотика диагональных аппроксимаций Эрмита-Паде $\pi_{kn,kn}^j(z; e^{\lambda_j \xi})$, $j = 1, 2, \dots, k$ находится аналогичным образом. Нужно только положить

$$\phi(x) = x(x+\lambda_1) \dots (x+\lambda_k)$$

и соответствующим образом переопределить функцию $S(x)$. Как и прежде, $x_1, x_2, \dots, x_k$ – нули $\phi'(x)$. Выбор чисел $\lambda_j = j$ в теореме 1 обусловлен, прежде всего, связью с классической постановкой и простотой формулировок следствий.

Замечание 2. Теорема 1, как и её обобщения, позволяют в некоторых случаях получать эффективные оценки для совместных приближений рациональными числами значений показательной функции $e^{\lambda_1}, e^{\lambda_2}, \dots, e^{\lambda_k}$. В этом смысле полученные результаты могут быть полезными в теории диофантовых приближений (см., например, [23]).

Эрмитова аппроксимация вырожденных гипергеометрических функций

Рассмотрим систему вырожденных гипергеометрических функций (функций Миттаг-Леффлера) $\{F_\gamma^j(z) = {}_1F_1(1, \gamma; jz)\}_{j=1}^k$, где

$${}_1F_1(1, \gamma; jz) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{j^p}{(\gamma)_p} z^p, \quad j = 1, 2, \dots, k;$$

$(\gamma)_0 = 1$, $(\gamma)_p = \gamma(\gamma+1)\cdots(\gamma+p-1)$, а $\gamma \in \mathbb{C} \setminus \{0, -1, -2, \dots\}$.

А.И. Аптекаревым [22] установлено, что эта система функций является совершенной (при $\gamma=1$ она совпадает с системой экспонент $\{e^{jz}\}$) и при фиксированных n и m_j таких, что $n \geq m_j - 1$, $j = 1, 2, \dots, k$, общий знаменатель $\tilde{Q}_m(z)$ и остаток $\tilde{R}_{n,m}^j(z)$ в случае, когда $n = m_1 = m_2 = \dots = m_k$, имеют вид:

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_m(z) &= \frac{z^{kn+n+\gamma}}{\Gamma(kn+n+\gamma)} \int_0^\infty [x^{n+\gamma-1} \prod_{i=1}^k (x-i)^n] e^{-zx} dx, \\ \tilde{R}_{n,m}^j(z) &= \frac{e^{jz} z^{kn+n+1}}{j^{\gamma-1} (\gamma)_{kn+n}} \int_0^j [x^{n+\gamma-1} \prod_{i=1}^k (x-i)^n] e^{-zx} dx, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функция Эйлера, а интегралы имеют тот же смысл, что и в формулах (1.5). В [22] также доказано, что при $|z| \leq L$ и $n \rightarrow +\infty$

$$\tilde{Q}_m(z) = \exp \left\{ -\frac{kn(k+1)/2}{kn+n+\gamma-1} z \right\} \cdot (1 + O(1/n)). \quad (3.2)$$

В случае, когда $k=1$, а γ принимает действительные значения, асимптотические свойства аппроксимаций Паде $\pi_{n,m}(z; F_\gamma)$ функций $F_\gamma(z) = F_\gamma^1(z) = {}_1F_1(1, \gamma; z)$ изучались в [24]. В этой работе, в частности, установлен следующий аналог равенства Д. Браесса (1.3): для любого комплексного z , $|z| \leq L$, при $m \leq n$ и $n+m \rightarrow \infty$

$$F_\gamma(z) - \pi_{n,m}(z; F_\gamma) = (-1)^m \frac{m! (\gamma)_n}{(\gamma)_{n+m} (\gamma)_{n+m+1}} e^{2mz/(n+m)} z^{n+m+1} (1 + o(1)). \quad (3.3)$$

Доказательство следующей теоремы существенно не отличается от доказательства теоремы 1. В его заключительной части необходимо вместо (1.7) воспользоваться соотношением (3.2).

Теорема 2. Пусть $n = m_1 = m_2 = \dots = m_k$ и $\tilde{\pi}_{n_j, m}^j(z) = \pi_{kn, kn}^j(z; F_\gamma^j)$ – аппроксимации Эрмита-Паде для системы $\{F_\gamma^j(z)\}_{j=1}^k$. Тогда для любого комплексного z , $|z| \leq L$, при $n \rightarrow +\infty$

$$\begin{aligned} F_\gamma^j(z) - \tilde{\pi}_{n_j, m}^j(z) &= (-1)^{kn} \frac{z^{kn+n+1}}{(\gamma)_{kn+n}} e^{(j+k/2)z} \times \\ &\times \sum_{i=1}^j (-1)^{(i+1)n} \sqrt{-\frac{2\pi}{nS''(x_i)}} e^{nS(x_i)} e^{zx_i} (-jx_i)^{\gamma-1} (1 + O_i(1/n)), \end{aligned} \quad (3.4)$$

где $j = 1, 2, \dots, k$, $(-jx_i)^{\gamma-1} = e^{(\gamma-1)\ln(-jx_i)}$, $\ln 1 = 0$.

В частности, при $k=1$, $\gamma \in \mathbb{C} \setminus \{0, -1, -2, \dots\}$ из теоремы 2 следует, что для любого комплексного z , $|z| \leq L$ и $n \rightarrow +\infty$

$$F_{\gamma}(z) - \pi_{n,n}(z; F_{\gamma}) = (-1)^n \frac{z^{2n+1}}{(\gamma)_{2n}} e^z \sqrt{\frac{\pi}{n}} \frac{1}{2^{2n+\gamma}} (1 + O(1/n)). \quad (3.5)$$

Применяя при действительных значениях $\gamma \neq 0, -1, -2, \dots$ формулу Стирлинга и учитывая равенство $(\gamma)_k = \Gamma(k + \gamma) / \Gamma(\gamma)$, нетрудно показать, что

$$\frac{n! (\gamma)_n}{(\gamma)_{2n+1}} \sim \sqrt{\frac{\pi}{n}} \frac{1}{2^{2n+\gamma}}.$$

Это значит, что при $n = m$ и $\gamma \in \mathbb{R} \setminus \{0, -1, -2, \dots\}$ асимптотические равенства (3.3) и (3.5) согласуются. Таким образом, в диагональном случае получено другое доказательство теоремы 1 из [24], которое, к тому же, справедливо и в случае комплексных $\gamma \neq 0, -1, -2, \dots$. Из теоремы 2 легко получить аналоги следствий 1 и 2 для систем, состоящих из двух и трех вырожденных гипергеометрических функций.

Замечание 3. Как и в случае системы экспонент, достаточно просто получить аналог теоремы 2 для системы $\{F_{\gamma}^j(\lambda_j z) = {}_1F_1(1, \gamma; \lambda_j z)\}_{j=1}^k$ вырожденных гипергеометрических функций, где $\lambda_1 < \lambda_2 < \dots < \lambda_k$ — отличные от нуля действительные числа.

Литература

1. Никишин, Е.М. Рациональные аппроксимации и ортогональность / Е.М. Никишин, В.Н. Сорокин. — М. : Наука, 1988. — 256 с.
2. Бейкер, Дж. Аппроксимации Паде. 1. Основы теории. 2. Обобщения и приложения / Дж. Бейкер мл., П. Грейвс-Моррис. — М. : Мир, 1986. — 502 с.
3. Mahler, K. Perfect systems / K. Mahler // Compositio mathematica. — 1968. — Vol. 19, № 2. — P. 95–166.
4. Гончар, А.А. О сходимости совместных аппроксимаций Паде для систем функций марковского типа / А.А. Гончар, Е.А. Рахманов // Тр. МИАН СССР. — 1981. — Т. 157. — С. 31–48.
5. Аптекарев, А.И. Системы марковских функций, генерируемые графами, и асимптотика их аппроксимаций Эрмита-Паде / А.И. Аптекарев, В.Г. Лысов // Матем. сборник. — 2010. — Т. 201, № 2. — С. 29–78.
6. Hermite, C. Sur la fonction exponentielle / C. Hermite // C.R. Akad. Sci. (Paris). — 1873. — Vol. 77. — P. 18–293.
7. Perron, O. Die Lehre von den Kettenbrüchen / O. Perron. — Leipzig-Berlin : Teubner, 1929. — 322 p.
8. Braess, D. On the conjecture of Meinardus on rational approximation of e^z / D. Braess // J. Approx. Theory. — 1984. — Vol. 40, № 4. — P. 375–379.
9. Аптекарев, А.И. О сходимости рациональных аппроксимаций к набору экспонент / А.И. Аптекарев // Вестн. МГУ. Сер. 1. Математика. Механика. — 1981. — № 1. — С. 68–74.
10. Клейн, Ф. Элементарная математика с точки зрения высшей : в 2-х т. Т. 1. Арифметика. Алгебра. Анализ / Ф. Клейн. — М. : Наука, 1987. — 324 с.
11. Аптекарев, А.И. Аппроксимации Паде, непрерывные дроби и ортогональные многочлены / А.И. Аптекарев, В.И. Буслаев, А. Мартинес-Финкельштейн, С.П. Суетин // Успехи матем. наук. — 2011. — Т. 66, № 6(402). — С. 37–122.
12. Калягин, В.А. Об одном классе полиномов, определяемых двумя соотношениями ортогональности / В.А. Калягин // Матем. сборник. — 1979. — Т. 110(152), № 4. — С. 609–627.
13. Никишин, Е.М. Совместные аппроксимации Паде / Е.М. Никишин // Матем. сборник. — 1980. — Т. 113(155), № 4. — С. 499–519.
14. Гончар, А.А. Об аппроксимациях Эрмита-Паде для систем функций марковского типа / А.А. Гончар, Е.А. Рахманов, В.Н. Сорокин // Матем. сборник. — 1997. — Т. 188, № 5. — С. 33–58.

15. Driver, K. Simultaneous rational approximants to Nikishin systems. I / K. Driver, H. Stahl // Acta Sci. Math. – 1995. – Vol. 60. – P. 245–263.
16. Driver, K. Simultaneous rational approximants to Nikishin systems. II / K. Driver, H. Stahl // Acta Sci. Math. – 1995. – Vol. 61. – P. 261–284.
17. Аптекарев, А.И. Сильная асимптотика многочленов совместной ортогональности для системы Никишина / А.И. Аптекарев // Матем. сборник. – 1999. – Т. 190, № 5. – С. 3–44.
18. Аптекарев, А.И. Случайные матрицы с внешним источником и асимптотика совместно ортогональных многочленов / А.И. Аптекарев, В.Г. Лысов, Д.Н. Туляков // Матем. сборник. – 2011. – Т. 202, № 2. – С. 3–56.
19. Аптекарев, А.И. Аппроксимации Эрмита-Паде и ансамбли совместно ортогональных многочленов / А.И. Аптекарев, А.Э. Койзлаарс // Успехи матем. наук. – 2011. – Т. 66, № 6(402). – С. 123–190.
20. Рябченко, Н.В. Эрмитовская аппроксимация двух экспонент / Н.В. Рябченко, А.П. Старовойтов, Г.Н. Казимиров // Проблемы физики, математики и техники. – 2012. – № 1(10). – С. 97–100.
21. Сидоров, Ю.В. Лекции по теории функций комплексного переменного / Ю.В. Сидоров, М.В. Федорюк, М.И. Шабунин. – М. : Наука, 1989. – 389 с.
22. Аптекарев, А.И. Об аппроксимациях Паде к набору $\{ {}_1F_1(1, c; \lambda_i z) \}_{i=1}^k$ / А.И. Аптекарев // Вестн. МГУ. Сер. 1. Математика. Механика. – 1981. – № 2. – С. 58–62.
23. Шмидт, В. Диофантовы приближения / В. Шмидт. – М. : Мир, 1983. – 345 с.
24. Старовойтов, А.П. Аппроксимации Паде функций Миттаг-Леффлера / А.П. Старовойтов, Н.А. Старовойтова // Матем. сборник. – 2007. – Т. 198, № 7. – С. 109–122.

О топологической сопряженности вещественных неабелевых линейных действий на плоскости

В.Ю. ТЫЩЕНКО

Получен критерий топологической сопряженности вещественных неабелевых линейных действий на плоскости. Полученный результат применен к топологической классификации вещественных вполне разрешимых неавтономных линейных дифференциальных систем второго порядка и комплексных вещественно голоморфных вполне разрешимых неавтономных линейных дифференциальных уравнений.

Ключевые слова: вещественные линейные действия на плоскости, топологическая сопряженность, топологическая эквивалентность, дифференциальные системы.

The criterion of a topological conjunction of real non-Abelian linear actions on a plane is received. The result received is applied to topological classification of real completely solvable nonautonomous linear differential systems of the second order and complex real holomorphic completely solvable nonautonomous linear differential equations.

Keywords: real linear actions on a plane, topological conjunction, topological equivalence, differential systems.

Постановка задачи

Задача о топологической сопряженности абелевых линейных действий, а также вопросы гладкой и голоморфной сопряженностей как абелевых, так и неабелевых линейных действий на пространстве $\mathbb{R}^n$ изучались в [1]. В данной статье будем рассматривать задачу о топологической сопряженности неабелевых линейных действий на плоскости $\mathbb{R}^2$. Затем полученные результаты применим к топологической классификации вещественных вполне разрешимых [2] неавтономных линейных дифференциальных систем второго порядка и комплексных $\mathbb{R}$ -голоморфных вполне разрешимых [3], [4] неавтономных линейных дифференциальных уравнений.

Предварительные сведения

В данном пункте приведем вспомогательные сведения из [1], необходимые нам в дальнейшем.

Определение 1. Пусть A и B есть линейно связные гладкие многообразия размерностей $\dim A = n$ и $\dim B = t$. Гладкое слоение $\mathcal{R}$ размерности t на многообразии $A \times B$, локально трансверсальное к $A \times \{b\}$ для всех $b \in B$, будем называть **накрывающим слоением**, если проекция $p: A \times B \rightarrow B$ на второй сомножитель определяет для каждого слоя этого слоения накрытие многообразия B . При этом многообразие A будем называть **фазовым слоем**, а многообразие B – **базой** накрывающего слоения $\mathcal{R}$.

Определение 2. Пусть $\mathcal{R}_c$ есть слой накрывающего слоения $\mathcal{R}$, содержащий точку $c \in A \times B$. **Фазовой группой** $Ph(\mathcal{R}, b_0)$, $b_0 \in B$, накрывающего слоения $\mathcal{R}$ будем называть группу диффеоморфизмов $Diff(A, \pi_1(B, b_0))$ действий на фазовом слое A фундаментальной группы $\pi_1(B, b_0)$ с отмеченной точкой b_0 , определяемых по формулам $\Phi^\gamma(a) = q \circ r \circ s(1)$, $\forall a \in A$, $\forall \gamma \in \pi_1(B, b_0)$, где r есть поднятие одного из путей $s(\tau) \subset B$, $\forall \tau \in [0, 1]$, соответствующих элементу γ группы $\pi_1(B, b_0)$, на слой $\mathcal{R}_{(a, s(0))}$ накрывающего слоения $\mathcal{R}$ в точку $(a, s(0))$, $q: A \times B \rightarrow A$ есть проекция на первый сомножитель.

Нетрудно видеть, что в силу линейной связности и гладкости многообразия B фазовые группы $Ph(\mathfrak{R}, b_1)$ и $Ph(\mathfrak{R}, b_2)$ гладко сопряжены для любых двух точек b_1 и b_2 этого многообразия. Поэтому будем просто говорить о **фазовой группе** $Ph(\mathfrak{R})$ накрывающего слоения $\mathfrak{R}$, не связывая ее с какой-либо точкой многообразия B .

Определение 3. Накрывающее слоение с абелевой фазовой группой будем называть **абелевым**, в противном случае – **неабелевым**.

Определение 4. Накрывающее слоение будем называть **невыврожденным**, если его фазовая группа имеет конечное (отличное от нуля) число неподвижных точек.

Определение 5. Будем говорить, что накрывающее слоение $\mathfrak{R}^1$ на многообразии $A_1 \times B_1$ **топологически (гладко, $\mathbb{R}$ -голоморфно) эквивалентно** накрывающему слоению $\mathfrak{R}^2$ на многообразии $A_2 \times B_2$, если существует гомеоморфизм (диффеоморфизм, вещественный биголоморфизм) $h: A_1 \times B_1 \rightarrow A_2 \times B_2$ такой, что $q_2 \circ h(A_1 \times B_1) = A_2$, $h(\mathfrak{R}_{c_1}^1) = \mathfrak{R}_{h(c_1)}^2$, $\forall c_1 \in A_1 \times B_1$, где q_2 есть проекция на первый сомножитель.

Предложение 1. Для топологической (гладкой, $\mathbb{R}$ -голоморфной) эквивалентности накрывающих слоений $\mathfrak{R}^1$ и $\mathfrak{R}^2$ необходимо и достаточно существования изоморфизма μ фундаментальных групп $\pi_1(B_1)$ и $\pi_1(B_2)$, порожденного гомеоморфизмом (диффеоморфизмом, вещественным биголоморфизмом) $g_\mu: B_1 \rightarrow B_2$, и гомеоморфизма (диффеоморфизма, вещественного биголоморфизма) $f: A_1 \rightarrow A_2$ фазовых слоев таких, что $f \circ \Phi_1^{\gamma_1} = \Phi_2^{\mu(\gamma_1)}$, $\forall \gamma_1 \in \pi_1(B_1)$, где $\Phi_\xi^{\gamma_\xi} \in Ph(\mathfrak{R}^\xi)$, $\gamma_\xi \in \pi_1(B_\xi)$, $\xi = \overline{1, 2}$.

Топологическая сопряженность вещественных неабелевых линейных действий на плоскости

Рассмотрим задачу о нахождении необходимых и достаточных условий существования такого гомеоморфизма $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$, что имеют место тождества

$$f(P_r x) = Q_r f(x), \forall x \in \mathbb{R}^2, r = \overline{1, \nu}, \quad (1)$$

где $x = (x_1, x_2)$, $f(x) = (f_1(x), f_2(x))$, квадратные матрицы $P_r \in GL(2, \mathbb{R})$, $Q_r \in GL(2, \mathbb{R})$, $r = \overline{1, \nu}$. Группу линейных действий на $\mathbb{R}^2$, образованную отображениями $P_r x$, $\forall x \in \mathbb{R}^2$, $r = \overline{1, \nu}$ (отображениями $Q_r x$, $\forall x \in \mathbb{R}^2$, $r = \overline{1, \nu}$), будем обозначать через L^1 (через L^2).

Теорема 1. Топологическая сопряженность неабелевых линейных групп L^1 и L^2 общего положения равносильна сопряженности этих групп посредством невырожденного линейного отображения.

Доказательство. Пусть имеют место соотношения (1). На их основе получаем тождества $f_1(P_r x)/f_2(P_r x) \equiv (Q_r f(x))_1 / (Q_r f(x))_2$, $r = \overline{1, \nu}$, где $(\cdot)_i$ есть i -я компонента, $i = \overline{1, 2}$. Вводя вспомогательную функцию $\psi(x) = f_1(x)/f_2(x)$, от данных тождеств перейдем к следующим: $\psi(P_r x) \equiv (Q_r(\psi(x), 1))_1 / (Q_r(\psi(x), 1))_2$, $r = \overline{1, \nu}$. Теперь, принимая во внимание следующие факты: 1) в случае, когда все матрицы P_r и Q_r , $r = \overline{1, \nu}$, сильно гиперболические [1, с. 95] (т. е. у них все собственные значения различны между собой и по модулю отличны от единицы), точка $O(0, 0)$ есть неподвижная точка сопрягающего гомеоморфизма f ; 2) сильно гиперболические отображения $P_r x$, $\forall x \in \mathbb{R}^2$, и $Q_r x$, $\forall x \in \mathbb{R}^2$, $r = \overline{1, \nu}$, допускают дискретную симметрию [5] $(-x)$, $\forall x \in \mathbb{R}^2$, и в силу теоремы 2 из [5] – и группу растяжений $e^\alpha x$, $\forall x \in \mathbb{R}^2$, $\forall \alpha \in \mathbb{R}$, с соответствующим ей инфинитезимальным оператором $x_1 \partial_{x_1} + x_2 \partial_{x_2}$; 3) теорему 1 из [5] и теорему 5.2.1 из [1, с. 126], – приходим к выводу, что в случае неабелевых линейных групп L^1 и L^2 общего положения имеет место представление $\psi(x) = (R_1 x)_1 / (R_1 x)_2$, где матрица $R_1 \in GL(2, \mathbb{R})$. Поэтому, принимая во внимание последние тождества, приходим к соотношениям $Q_r R_1 = \lambda_r R_1 P_r$, $\lambda_r \neq 0$,

$r = \overline{1, \nu}$, из которых вытекает, что $f(P_r x) = \lambda_r R_1 P_r R_1^{-1} f(x)$, $\forall x \in \mathbb{R}^2$, $r = \overline{1, \nu}$. Далее с помощью замены $\xi(x) = R_1^{-1} f(x)$, $\forall x \in \mathbb{R}^2$, от этих тождеств переходим к следующему:

$$\xi(P_r x) = \lambda_r P_r \xi(x), \forall x \in \mathbb{R}^2, r = \overline{1, \nu}. \quad (2)$$

Теперь аналогичным образом, как и ранее, приходим к матричным равенствам $P_r R_2 = \mu_r R_2 P_r$, $\mu_r \neq 0$, $r = \overline{1, \nu}$, на основании которых получаем, что $J(P_r) R_{3r} = \mu_r R_{3r} J(P_r)$, где $J(P_r)$ есть нормальная жорданова форма матрицы P_r с, вообще говоря, комплексными коэффициентами, $r = \overline{1, \nu}$. Отсюда с учетом того, что мы рассматриваем случай общего положения, имеем $\mu_r = 1$, $r = \overline{1, \nu}$. Поэтому топологическая сопряженность (2) всегда может быть осуществлена невырожденным линейным отображением $R_2 x$, $\forall x \in \mathbb{R}^2$. Теперь с учетом линейности используемой замены приходим к утверждению теоремы 1.

На основании теоремы 1 рассуждениями, аналогичными проведенным в [1, с. 12], имеем такие утверждения.

Следствие 1. *Вещественные неабелевы невырожденные накрывающие слоения с двумерным фазовым слоем структурно неустойчивы.*

Следствие 2. *Если вещественное невырожденное накрывающее слоение с двумерным фазовым слоем структурно устойчиво, то оно абелево.*

Следствие 3. *Если вещественное абелево невырожденное накрывающее слоение с двумерным фазовым слоем структурно устойчиво, то фундаментальная группа его базы имеет одну независимую образующую.*

Вещественные вполне разрешимые неавтономные линейные дифференциальные системы второго порядка

Рассмотрим вполне разрешимые линейные дифференциальные системы

$$dx = \sum_{j=1}^m A_j(t_1, \dots, t_m) x dt_j \quad (3)$$

и

$$dx = \sum_{j=1}^m A_j(t_1, \dots, t_m) x dt_j, \quad (4)$$

где квадратные матрицы $A_j(t_1, \dots, t_m) = \|a_{ikj}(t_1, \dots, t_m)\|$ и $B_j(t_1, \dots, t_m) = \|b_{ikj}(t_1, \dots, t_m)\|$ порядка 2 состоят из гладких функций $a_{ikj}: A_1 \rightarrow \mathbb{R}$ и $b_{ikj}: B_1 \rightarrow \mathbb{R}$, $i = \overline{1, 2}$, $k = \overline{1, 2}$, $j = \overline{1, m}$, линейно связные гладкие многообразия A_1 и B_1 диффеоморфны друг другу, фундаментальные группы $\pi_1(A_1)$ и $\pi_1(B_1)$ имеют конечное число $\nu \in \mathbb{N}$ образующих. Общие решения линейных дифференциальных систем (3) и (4) определяют накрывающие слоения $\mathfrak{Z}^1$ и $\mathfrak{Z}^2$ соответственно на многообразиях $\mathbb{R}^2 \times A_1$ и $\mathbb{R}^2 \times B_1$. Будем говорить, что линейные дифференциальные системы (3) и (4) **топологически (гладко) эквивалентны**, если топологически (гладко) эквивалентны накрывающие слоения $\mathfrak{Z}^1$ и $\mathfrak{Z}^2$. Фазовая группа накрывающего слоения $\mathfrak{Z}^1$ (группа монодромии системы (3)) порождена образующими невырожденными отображениями $P_r x$, $\forall x \in \mathbb{R}^2$, $r = \overline{1, \nu}$, а фазовая группа накрывающего слоения $\mathfrak{Z}^2$ (группа монодромии системы (4)) – образующими невырожденными отображениями $Q_r x$, $\forall x \in \mathbb{R}^2$, $r = \overline{1, \nu}$. Теперь на основании предложения 1 и теоремы 1 имеем такие утверждения.

Теорема 2. *Из топологической эквивалентности линейных дифференциальных систем (3) и (4) с неабелевыми группами монодромии общего положения следует их гладкая эквивалентность.*

Следствие 4. *Линейные дифференциальные системы (3) с коэффициентами, гладкими на линейно связных гладких многообразиях с неабелевыми фундаментальными группами, являются структурно неустойчивыми.*

Комплексные $\mathbb{R}$ -голоморфные вполне разрешимые неавтономные линейные дифференциальные уравнения

Рассмотрим вполне разрешимые линейные дифференциальные уравнения

$$dw = \sum_{j=1}^m \{ (a_j(z_1, \dots, z_m)w + b_j(z_1, \dots, z_m)\bar{w})dz_j + (a_{m+j}(z_1, \dots, z_m)w + b_{m+j}(z_1, \dots, z_m)\bar{w})d\bar{z}_j \} \quad (5)$$

и

$$dw = \sum_{j=1}^m \{ (c_j(z_1, \dots, z_m)w + d_j(z_1, \dots, z_m)\bar{w})dz_j + (c_{m+j}(z_1, \dots, z_m)w + d_{m+j}(z_1, \dots, z_m)\bar{w})d\bar{z}_j \}, \quad (6)$$

где $w = x_1 + ix_2$, $z_j = t_j + it_{m+j}$, $j = \overline{1, m}$, $i^2 = -1$, черта обозначает операцию комплексного сопряжения, $\mathbb{R}$ -голоморфные функции $a_j: A_2 \rightarrow \mathbb{C}$, $b_j: A_2 \rightarrow \mathbb{C}$, $c_j: B_2 \rightarrow \mathbb{C}$, $d_j: B_2 \rightarrow \mathbb{C}$, $j = \overline{1, 2m}$, линейно связные $\mathbb{R}$ -голоморфные многообразия A_2 и B_2 являются $\mathbb{R}$ -голоморфно эквивалентными друг другу, фундаментальные группы $\pi_1(A_2)$ и $\pi_1(B_2)$ имеют конечное число $\nu \in \mathbb{N}$ образующих. Общие решения линейных дифференциальных уравнений (5) и (6) определяют накрывающие слоения $\mathfrak{Z}^3$ и $\mathfrak{Z}^4$ соответственно на многообразиях $\mathbb{C} \times A_2$ и $\mathbb{C} \times B_2$. Будем говорить, что линейные дифференциальные уравнения (5) и (6) **топологически (гладко, $\mathbb{R}$ -голоморфно) эквивалентны**, если топологически (гладко, **$\mathbb{R}$ -голоморфно**) эквивалентны накрывающие слоения $\mathfrak{Z}^3$ и $\mathfrak{Z}^4$. Фазовая группа накрывающего слоения $\mathfrak{Z}^3$ (группа монодромии уравнения (5)) порождена образующими невырожденными отображениями $p_r w + p_{v+r} \bar{w}$, $\forall w \in \mathbb{C}$, $r = \overline{1, \nu}$, а фазовая группа накрывающего слоения $\mathfrak{Z}^4$ (группа монодромии уравнения (6)) – образующими невырожденными отображениями $q_r w + q_{v+r} \bar{w}$, $\forall w \in \mathbb{C}$, $r = \overline{1, \nu}$. Теперь аналогично предыдущему пункту получаем утверждения.

Теорема 3. Из топологической эквивалентности линейных дифференциальных уравнений (5) и (6) с неабелевыми группами монодромии общего положения следует их гладкая ($\mathbb{R}$ -голоморфная) эквивалентность.

Следствие 5. Линейные дифференциальные уравнения (5) с коэффициентами, $\mathbb{R}$ -голоморфными на линейно связных $\mathbb{R}$ -голоморфных многообразиях с неабелевыми фундаментальными группами, являются структурно неустойчивыми.

Литература

1. Тыщенко, В.Ю. Накрывающие слоения дифференциальных систем / В.Ю. Тыщенко. – Гродно : ГрГУ, 2011. – 180 с.
2. Горбузов, В.Н. Интегралы дифференциальных систем / В.Н. Горбузов. – Гродно : ГрГУ, 2006. – 447 с.
3. Горбузов, В.Н. $\mathbb{R}$ -голоморфные решения уравнения в полных дифференциалах / В.Н. Горбузов, В.Ю. Тыщенко // Дифференц. уравнения. – 1999. – Т. 35, № 4. – С. 447–452.
4. Горбузов, В.Н. Об $\mathbb{R}$ -голоморфных решениях системы уравнений в полных дифференциалах / В.Н. Горбузов, В.Ю. Тыщенко // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 1999. – № 3. – С. 124–126.
5. Тыщенко, В.Ю. Об инвариантах дискретных динамических систем / В.Ю. Тыщенко // Дифференц. уравнения. – 2010. – Т. 46, № 5. – С. 752–755.

ИНФОРМАТИКА

УДК 519.688

Методика применения программы вероятностно-алгебраического моделирования при исследовании параметров надежности технических систем с сетевой структурой

Д.В. РАТОБЫЛЬСКАЯ

В статье изложена методика применения программы вероятностно-алгебраического моделирования PALS для расчета показателей надежности технических систем с сетевой структурой. В качестве примеров сетевых структур рассмотрены информационные системы и компьютерные сети, транспортные системы сообщения, энергетические и тепловые сети. Описаны порядок работы с программой, средства построения схем функциональной целостности, рассчитываемые показатели надежности.

Ключевые слова: вероятностно-алгебраическое моделирование, сетевая структура, граф, надежность, транспортная система.

This article describes the methodology of using the probability-algebraic simulation program PALS for calculations of reliability characteristic of technical systems with network structure. As examples of network structures the article describes the information systems and computer networks, transport systems, energetic and heating networks. This article shows how to use the program, the means of building schemes of functional integrity and reliability calculation.

Keywords: probability-algebraic simulation, network structure, graph, reliability, transport system.

Введение

Многие практические задачи исследования надежности информационных сетей, транспортных систем сообщения, энергетических и тепловых сетей могут быть представлены с помощью сетевых моделей. Под сетевой моделью будем понимать структуру, состав и связи которой представимы в виде сетевой схемы функциональной целостности (СФЦ) [1].

Модель информационной сети, включающей ненадежные элементы, обычно представляют неориентированным графом $G(E, V)$ с набором узлов V и набором ребер E . Причем ребра могут находиться в одном из двух состояний – работоспособности или отказа, с заданными вероятностями нахождения в каждом из выделенных состояний соответственно. Типовыми допущениями для данной модели являются: независимость отказов ребер; абсолютная надежность узлов; отсутствие возможности восстановления отказавших ребер.

Модели транспортных систем сообщения также возможно представить в виде неориентированного графа. Ребра графа (участки автомобильных дорог, пути перегона) могут находиться в одном из двух и более выделенных состояний, характеризующих степень изношенности, пропускную способность. Узлы (развязки автомобильных дорог, остановки, железнодорожные станции) при этом считают абсолютно надежными, зачастую предполагается возможность восстановления отказавших ребер.

При анализе надежности энергетических и тепловых сетей используют структурно-логические схемы надежности, представляющие собой совокупность выделенных элементов (узлов), соединенных последовательно и/или параллельно ребрами. Ребра предполагаются абсолютно надежными, узлы могут находиться в одном из двух и более выделенных состояний. Типовыми параметрами данных моделей являются: наличие соединения типа « m из n »; наличие мостиковых структур [2].

В качестве параметров надежности перечисленных технических систем с сетевой структурой выступают показатели надежности, безотказности, отказоустойчивости [1], [3].

В статье рассматривается методика использования программной системы вероятностно-алгебраического моделирования PALS (Probability Algebraic Simulation) [4] для исследования надежности указанных технических систем с сетевой структурой.

Методика применения программы вероятностно-алгебраического моделирования для расчета надежности систем с сетевой структурой

Анализ структурной надежности технических систем, как правило, включает следующие типовые операции [2]:

- анализ устройства, выполняемых системой и ее составными частями функций, определение взаимосвязей составных частей;
- формирование содержания понятия «безотказной работы» для данной системы;
- определение возможных отказов составных частей и системы в целом, их причин и возможных последствий;
- оценку влияния отказов составных частей системы на ее работоспособность;
- разделение системы на элементы, показатели надежности которых известны;
- составление структурно-логической схемы надежности ТС, которая является моделью ее безотказной работы;
- составление расчетных зависимостей для определения показателей надежности ТС с использованием данных по надежности ее элементов и с учетом структурной схемы.

В зависимости от поставленной задачи на основании результатов расчета характеристик надежности ТС делаются выводы о необходимости изменения или доработки структуры системы, режима её эксплуатации. Программа вероятностно-алгебраического моделирования (ВАЛМ) позволяет автоматизировать последний (седьмой) этап анализа надежности ТС, а также проводить расчет влияния отказов отдельных элементов системы на ее работоспособность (четвертый этап анализа надежности).

Каждая из рассматриваемых ТС сетевого типа может быть представлена в виде неориентированного графа. Для первых двух видов систем (информационные сети и транспортные системы) функциональными элементами являются ребра. Каждому ребру привязан собственный вектор, задающий значение вероятностей нахождения элемента в каждом из выделенных состояний. Для каждого ребра также имеется возможность задания закона изменения вероятностей пребывания в выделенных состояниях. Узлы определяют порядок и направление связи ребер, задают источник и приемник информации (пункты отправления и назначения).

Для энергетических и тепловых сетей функциональными элементами служат узлы. Каждый узел характеризуется вектором вероятностей пребывания элемента в каждом из выделенных состояний. Для электрических сетей это состояния работоспособности, отказа типа «обрыв» и отказа типа «замыкание», для теплосетей – эффективность работы узла (пропускная способность).

Условием работоспособности сети будем считать возможность передачи информации (перемещения транспортного потока, распространения энергии) от источника к целевому узлу. Количественной оценкой такой возможности является мера надежности R – вероятность (вектор вероятности) того, что существует работоспособный путь от источника к приемнику. Критерием для определения вида соединения элементов (последовательного или параллельного) при построении СФЦ является влияние их отказа на работоспособность ТС.

Приведем реализованные в программе возможные виды соединения элементов и соответствующие им формулы расчета результирующих вероятностей.

Последовательное соединение элементов в системе характерно для связи, при которой отказ любого элемента приводит к отказу всей системы. В системе с последовательным соединением для безотказной работы в течение некоторой наработки необходимо и достаточно, чтобы каждый из ее элементов работал безотказно в течение этой наработки. Считая отказы элементов независимыми, вероятность одновременной безотказной работы n элементов определяется по теореме умножения вероятностей:

$$P(t) = p_1(t)p_2(t)\dots p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t),$$

где p_i – вероятность безотказной работы i -го элемента системы в момент времени t .

Для случая, когда выделено более двух состояний, в которых могут находиться элемент и система в целом, используется формула:

$$P(t) = (P_0, P_1, \dots, P_k) = \left(\prod_{i=1}^n p_0^i(t), \prod_{i=1}^n (p_0^i(t) + p_1^i(t)) - \prod_{i=1}^n p_0^i(t), \dots, 1 - \prod_{i=1}^n \sum_{j=0}^{k-1} p_j^i(t) \right),$$

где p_j^i – вероятность нахождения i -го элемента системы в j -ом состоянии, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{0, k}$.

В системе с *параллельным соединением* элементов отказ происходит только в случае совместного отказа всех элементов. Вероятность данного события (при допущении независимости отказов) может быть найдена по теореме умножения вероятностей как произведение вероятностей отказа элементов, следовательно, вероятность безотказной работы:

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i).$$

Для случая, когда выделено более двух состояний, применяется расчетная формула:

$$P(t) = (P_0, P_1, \dots, P_k) = \left(\prod_{i=1}^n (p_0^i(t) + p_1^i(t)) - \prod_{i=1}^n p_1^i(t), \prod_{i=1}^n \sum_{j=0}^2 p_j^i(t) - \prod_{i=1}^n p_2^i(t), \dots, \prod_{i=1}^n p_k^i(t) \right).$$

Система типа « m из n » является вариантом системы с параллельным соединением элементов, отказ которой произойдет, если из n элементов, соединенных параллельно, работоспособными окажутся менее m элементов ($m < n$). Такие связи характерны для электрических и связных систем, а также при наличии в системе структурного резервирования [2].

Расчет вероятностей безотказной работы для системы с данным видом соединения в программе осуществляется путем сведения их к параллельным подсистемам с помощью алгоритма исключения [3].

Мостиковая структура не сводится к параллельному или последовательному типу соединения элементов, а представляет собой параллельное соединение последовательных цепочек элементов с диагональными элементами, включенными между узлами различных параллельных ветвей. Работоспособность такой системы определяется не только количеством отказавших элементов, но и их положением в структурной схеме. Расчет вероятностей безотказной работы для таких систем производится на основании алгоритмов исключения и вероятностно-алгебраического метода [3].

Большинство реальных ТС имеет сложную комбинированную структуру, часть элементов которой образует последовательное соединение, другая часть – параллельное, отдельные ветви структуры образуют мостиковые схемы или схемы типа « m из n ».

В таблице 1 приведены средства, предусмотренные в программе ВАЛМ для определения СФЦ.

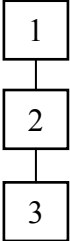
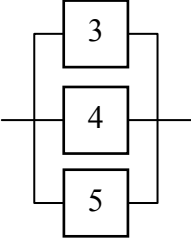
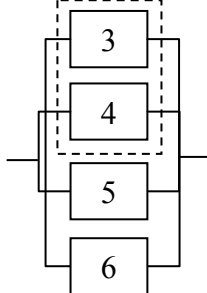
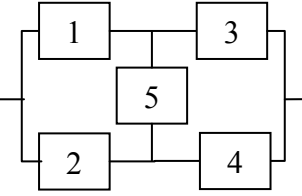
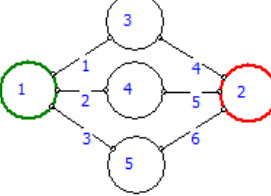
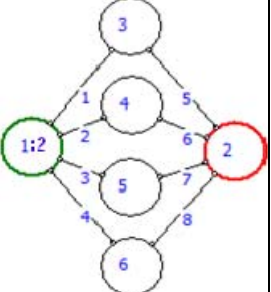
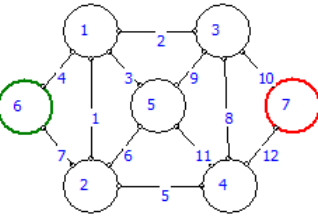
Таблица 1 – Аппарат построения схем функциональной целостности в программе PALS

Название	Узел	Однонаправленная связь	Двунаправленная связь
Вид элемента			
Назначение	Выполняет роль функционального / фиктивного элемента; определяет начальную (вход) и целевую (выход) точки системы; служит для определения связи типа « m из n »	Выполняет роль фиктивного / функционального элемента; реализует направленную связь (ориентированный граф)	Выполняет роль фиктивного / функционального элемента; реализует двунаправленную связь (неориентированный граф)

В таблице 2 приведены примеры задания реализованных видов соединения элементов системы средствами программы ВАЛМ.

После задания структуры системы с помощью контекстного меню указываются начальный (источник) и целевой (приемник) узлы (границы таких узлов выделяются зеленым и красным цветами соответственно).

Таблица 2 – Возможные варианты соединения элементов в программе PALS

Вид связи	Параллельная	Последовательная	« m из n »	Мостик
Графический вид				
Программное задание (функциональные элементы – узлы)				

Далее на панели задания параметров определяются, в зависимости от типа задачи, функциональные элементы – узлы или ребра. Каждому функциональному элементу схемы задаются:

- вектор вероятностей нахождения элемента в выделенных состояниях в начальный момент времени;
- закон изменения вероятностей пребывания функциональных элементов в выделенных состояниях (экспоненциальный, биномиальный, Пуассона и др. законы);
- период функционирования системы (количество циклов эксплуатации).

На базе данных по надежности составных элементов системы и с учетом структурной схемы программа ВАЛМ строит расчетные зависимости для определения показателей надежности.

Расчетные параметры надежности системы

В программе ВАЛМ реализован расчет количественных и качественных показателей надежности ТС сетевого типа. Количественные показатели позволяют оценить надежность, отказоустойчивость и время наработки на отказ для всей системы. Качественные показатели характеризуют структуру системы с точки зрения влияния отдельных элементов системы на надежность.

Под *надежностью* понимается способность системы сохранять работоспособность при случайных реализациях элементарных событий возникновения отказов ее элементов в нормальных (заданных) условиях эксплуатации. Показатель надежности – вероятность (вектор вероятности) пребывания системы в целом в выделенных состояниях в момент окончания моделирования.

Время *наработки до отказа* – количество единиц времени (циклов эксплуатации), в течение которых значение вероятности нахождения системы в последнем из выделенных со-

стояний (в случае двух состояний – в состоянии отказа) не превышает заранее заданной (критической) величины.

Динамика развития – показатель, позволяющий отслеживать изменение вероятностей пребывания системы в целом и отдельных ее элементов в выделенных состояниях в течение периода моделирования.

Для элементов системы реализовано вычисление показателей веса, вклада и значимости.

Вес – показатель влияния элемента на показатель надежности системы. Полностью базируется на логической модели системы, без учета влияния вероятностей нахождения элемента в выделенных состояниях.

Значимость позволяет оценить влияние элемента на показатель надежности системы с учетом вероятностей пребывания его (элемента) в выделенных состояниях. Рассчитывается как отношение приращения показателя надежности системы к приращению надежности элемента.

Вклад позволяет учесть вклад элемента в текущее значение показателя надежности системы в сравнении с наилучшим (положительный вклад) и наихудшим (отрицательный вклад) значениями надежности системы. Рассчитывается как произведение значимости элемента на вероятность его безотказной работы.

Пример исследования системы с помощью программы PALS

Рассмотрим поэтапно процесс расчета показателей надежности системы с помощью программы ВАЛМ PALS. В качестве объекта исследования рассмотрим систему, структурная схема, интенсивность потоков отказов составных элементов и критический уровень наработки на отказ которой приведены на рисунке 1 [2].

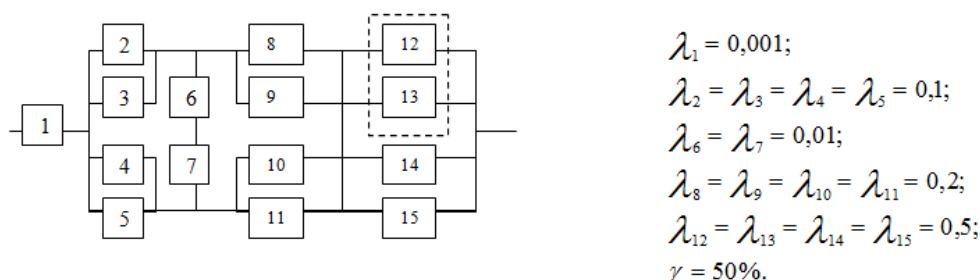


Рисунок 1 – Структурная схема надежности тепловой сети

СФЦ и параметры модели, заданные в программе ВАЛМ, представлены на рисунках 2 и 3 соответственно. Узлы схемы, выделенные желтым цветом, представляют собой так называемые «фиктивные» узлы и служат для корректного определения связей в системе.

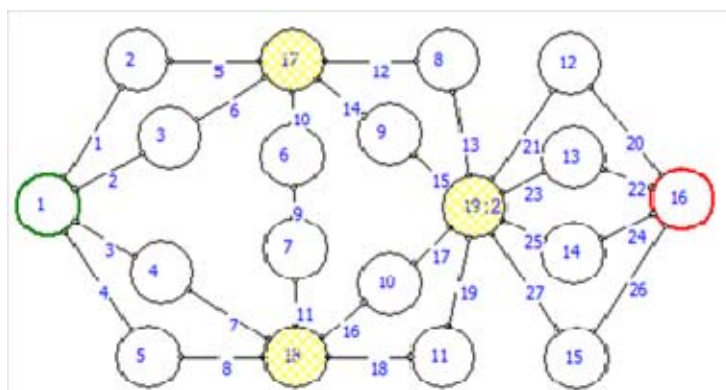


Рисунок 2 – Схема функциональной целостности технической системы с сетевой структурой

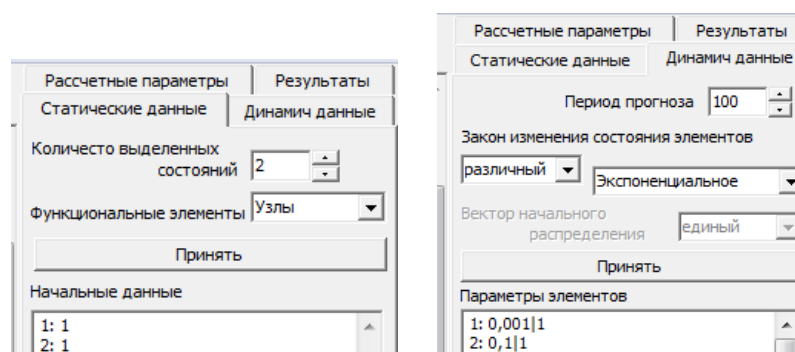


Рисунок 3 – Панели задания статических и динамических параметров элементов модели

От функциональных узлов «фиктивные» отличаются заданной для них абсолютной надежностью (вероятность пребывания в исправном состоянии для узла равна единице) как в начальный момент времени, так и на протяжении всего прогнозируемого периода.

Полученные в результате работы программы набор минимальных путей (согласно алгоритму исключения [2]) и общий показатель надежности системы после 100 итераций $R = 0,7851$ (вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии) согласуются с данными, полученными при стандартном поэтапном приведении системы к последовательно-параллельному виду [2]. Согласно показателям веса, наибольшее влияние на показатель надежности системы оказывают узлы с номерами 1 и с 12 по 15.

Заключение

Многие практические задачи оптимизации надежности, связанные с информационными сетями, трубопроводными и энергетическими системами, могут быть представлены в виде сетевой модели. В статье описана методика применения программы ВАЛМ для расчета параметров структурной и составной надежности системы, выявления узких мест. Рассмотрен пример простейшей задачи оценки надежности сетевой системы. Результаты, полученные средствами программы, подтверждены сравнением с результатами классического решения задачи анализа надежности путем преобразования системы к последовательно-параллельному виду. Реализованные возможности формализации систем, строгость и обоснованность метода вероятностно-алгебраического моделирования обеспечивают оперативное получение точных характеристик совокупности вероятностных показателей надёжности, характеризующих функционирование ТС.

Литература

1. Скворцов, М.С. Решение задачи оптимизации надежности с помощью метода логико-вероятностных вкладов / М.С. Скворцов // Надежность. – 2009. – № 2(30). – С. 15–29.
2. Токочаков, В.И. Моделирование, оптимизация и управление теплотехническими системами: лабораторный практикум для студентов дневного и заочного отделения специальности 1-4301 05 «Промышленная теплоэнергетика» / В.И. Токочаков. – Ч. 1. – Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2009.
3. Ратобильская, Д.В. Вероятностная оценка надежности структуры сложной системы / Д.В. Ратобильская // Математические машины и системы. – 2012. – № 2. – С. 177–187.
4. Ратобильская, Д.В. Оценка изменения надежности системы с использованием вероятностно-алгебраического подхода / Д.В. Ратобильская // Доклады БГУИР. – 2012. – № 4(66). – С. 17–23.

УДК 681.3.06:624.131

Численный анализ изменения несущей способности грунтового основания цилиндрической сваи

Д.В. ПРОКОПЕНКО

В работе рассматривается несущая способность грунтового основания цилиндрической сваи с учетом уплотнения грунта вокруг сваи. Для исследования несущей способности был применен численный анализ экспериментальных данных осадки одиночной сваи.

Ключевые слова: несущая способность, цилиндрическая свая, грунтовое основание, модуль деформации, механико-математическая модель, аналитическое приближённое решение.

This work deals with the bearing ability of the cylindrical pile soil base taking into account consolidation of the ground round the pile. The numerical analysis of experimental data of the deposits of a single pile has been applied to the research of bearing ability.

Keywords: bearing ability, cylindrical pile, soil base, deformation module, mechanical and mathematical model, analytical approximate solution.

Введение

При устройстве фундаментов зданий на основе цилиндрических свай происходит уплотнение грунта вокруг ствола сваи с постепенным убыванием его до первоначального состояния. В настоящее время все расчеты несущей способности грунтового основания происходят без учета этой особенности, что ведет к недоиспользованию несущей способности грунтового основания и, как следствие, к повышению стоимости возводимого здания. В настоящей работе уточняется механико-математическая модель модуля деформации грунтового основания, примыкающего к боковой поверхности одиночной сваи, и уточняется методика аналитического приближённого решения задачи об осадке цилиндрической сваи при линейно-упругом и нелинейном деформировании при действии на сваю сжимающей нагрузки.

Деформации грунтов как оснований фундаментов

Грунты как основания зданий обладают определенными физико-механическими характеристиками. К основным физико-механическим характеристикам относятся: модуль деформации E , коэффициент Пуассона μ , коэффициент консистенции B . Изменение этих характеристик значительно влияет на несущую способность грунтового основания как оснований фундаментов.

Физико-механические свойства любого деформируемого твёрдого тела определяют его состояние под нагрузкой. Характер и особенности деформационного процесса описываются аналитически или дискретно. Для любого однородного деформируемого твёрдого тела, в том числе элементов структуры грунтового основания, при упругой стадии работы имеет место соотношение (закон Гука) [1], [4]:

$$\sigma_i = E \varepsilon_i.$$

В этом случае достаточно двух физико-механических характеристик: E и μ . Существует несколько хорошо отработанных методик их определения [1]. Значительно сложнее обстоит дело при рассмотрении твёрдого тела и особенно грунта в стадиях за пределом линейного деформирования. В этом случае деформационный процесс в общем виде можно представить некоторой моделью общего типа [2]: $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$, в частности,

$$\sigma_i = A \varepsilon_i^m, \quad A > 0, \quad 0 < m < 1,$$

где σ_i, ε_i – интенсивности напряжений и деформаций; A, m – параметры закона нелинейного деформирования.

Эти параметры зависят от особенностей структуры и свойств деформируемого тела, а также от особенностей самого деформационного процесса. Параметры A , m определяются экспериментально. Представляет интерес определение этих параметров аналитическими методами на основе известных физико-механических характеристик деформируемого твердого тела [2].

Изменение модуля деформации грунтового основания при устройстве фундамента здания на основе цилиндрических свай

Характер взаимодействия цилиндрической сваи с грунтовым основанием в силу имеющихся конструктивных особенностей и способа её устройства существенно влияет на величину осадки отдельной сваи и свайного фундамента в целом. При анализе деформационного процесса грунтового основания цилиндрической сваи можно выделить два этапа: погружение сваи и взаимодействие сваи с грунтовым основанием при действии сжимающей нагрузки. При погружении цилиндрической сваи происходит смятие грунта и его уплотнение вследствие внедрения тела сваи с постепенным убыванием величины уплотнения до его первоначального состояния. В целом цилиндрическая свая с уплотнённой областью грунтового основания образуют сложную по структуре и свойствам неоднородную и нелинейную физическую систему. При действии на сваю сжимающей нагрузки происходит дальнейшее деформирование грунтового основания, при этом основные физико-механические характеристики грунта изменяются. Исследование изменения этих характеристик проводилось посредством специальных натурных экспериментов, выполненных в НИИОСП, город Москва, и БЕЛНИИС, город Минск [3]. Отдельные результаты этих исследований приведены на рисунках 1, 2. На рисунке 1 показано изменение модуля деформации грунтового основания вокруг сваи в зависимости от консистенции грунта и глубины от поверхности грунта. На рисунке 2 показано изменение модуля деформации грунтового основания вокруг сваи в зависимости от расстояния от сваи и глубины от поверхности грунта.

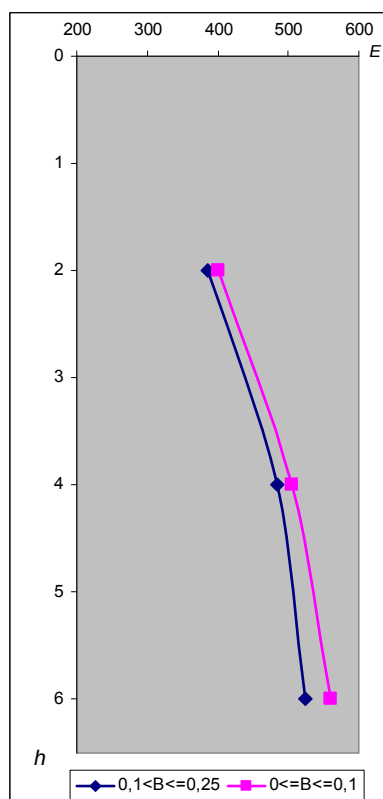


Рисунок 1 – Зависимость модуля деформации от консистенции грунта и глубины от поверхности грунта

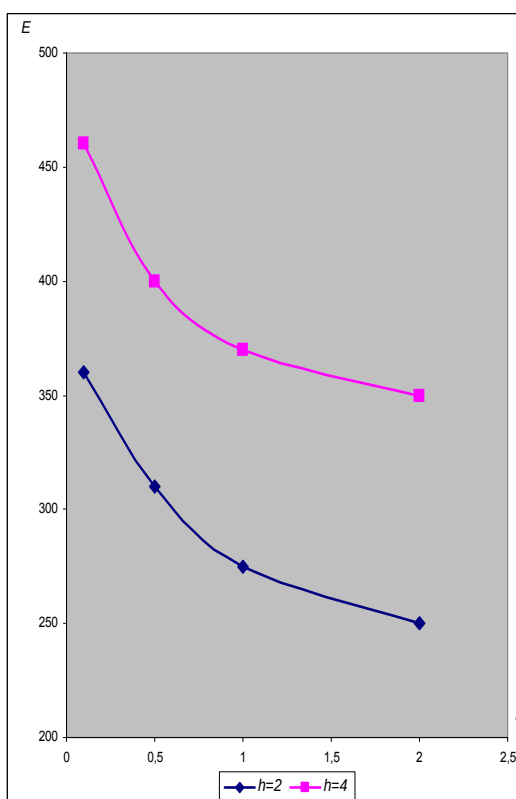


Рисунок 2 – Зависимость модуля деформации от расстояния от сваи и глубины от поверхности грунта

Приведенные экспериментальные данные были аппроксимированы методом наименьших квадратов. Для модуля деформации E_i в произвольной точке i деформируемой зоны в зависимости от консистенции грунта, расстояния от тела сваи и от поверхности грунта была получена следующая зависимость:

$$E_i = 3 \mu E_0 \frac{\sqrt[3]{h}}{(B r_i)^2}, \quad r_i < r_{\max}, \quad (1)$$

где E_0 – первоначальное значение модуля деформации грунтового основания; h – глубина от поверхности грунта; B – коэффициент консистенции грунта; r_i – расстояние от тела сваи, $r_{\max}$ – радиус деформируемой зоны вокруг сваи (выше конца сваи).

Формула (1) применима для глинистых грунтов и цилиндрических свай с диаметром ствола 30 см.

На графиках рисунков 3, 4 показано соответствие экспериментальных данных и полученных по формуле (1). Различие в значениях модуля деформации не превосходит 5%.

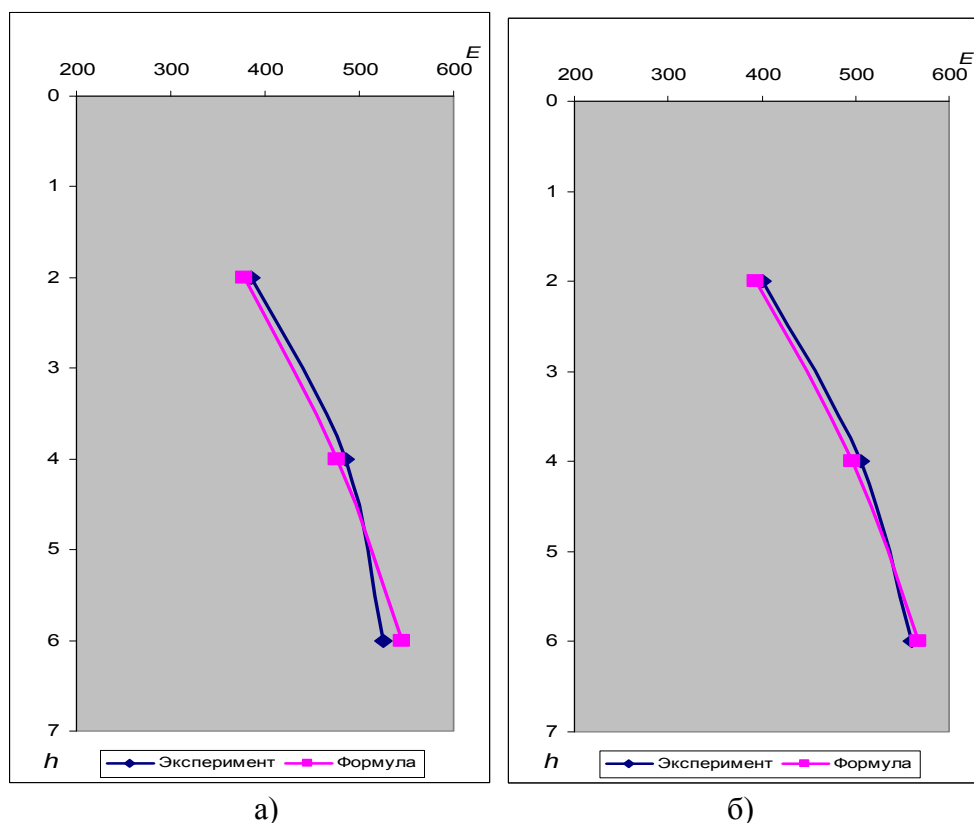
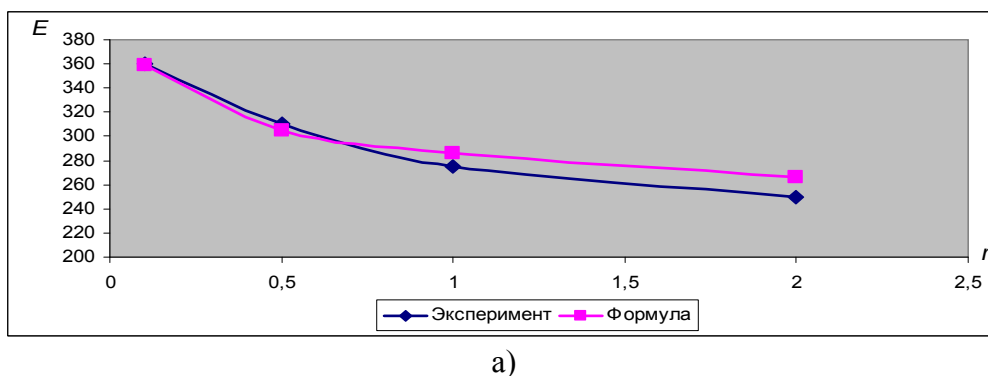
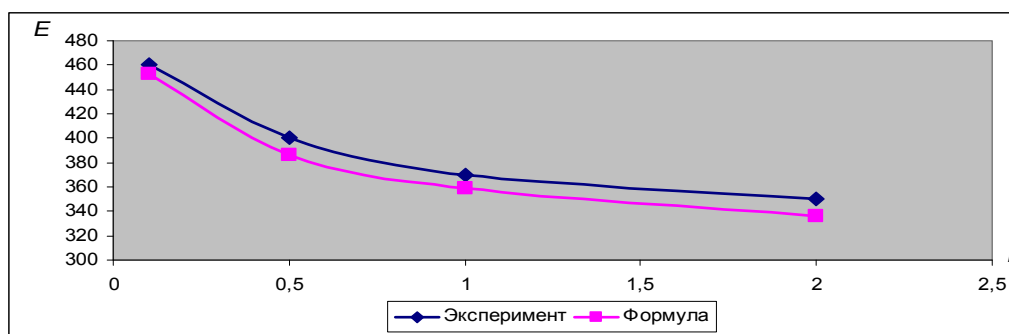


Рисунок 3 – Зависимость модуля деформации от консистенции грунта и глубины от поверхности грунта: а) $0,1 < B < 0,25$; б) $0 < B < 0,1$





б)

Рисунок 4 – Зависимость модуля деформации от расстояния от сваи и глубины от поверхности грунта: а) $h = 2$; б) $h = 4$

Полученный результат позволяет определить деформации грунтового основания одиночной сваи. При этом может быть два подхода: приближенный аналитический и метод компьютерного объектно-ориентированного моделирования. Ниже изложена уточненная методика приближенного аналитического метода определения деформации грунтового основания одиночной цилиндрической сваи.

Линейно-деформируемое грунтовое основание

Будем рассматривать одиночную сваю в однородном линейно-деформируемом грунтовом основании. В этом случае выше плоскости её конца существует так называемый телескопический сдвиг, т. е. будет

$$U = 0, W = f(r), \quad (2)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \varepsilon_z = 0, \quad \gamma_{rz} = \partial W / \partial r,$$

и состояние равновесия можно представить только одним уравнением:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} = 0; \quad (3)$$

или в более компактной форме

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right) = 0, \quad (4)$$

где U, W – горизонтальная и вертикальная составляющие вектора перемещения.

Решение уравнения (4) должно отвечать и физическим условиям задачи, т. е. в решении должны содержаться физические параметры сваи и физико-механические характеристики основания. Решение в виде

$$W = c_1 \ln \frac{c_2}{r_0}; \quad c_1 > 0; \quad c_2 > r_0 \quad (5)$$

удовлетворяет (4) и поставленным требованиям, если константы c_1 и c_2 будут определены посредством указанных параметров. В случае линейного деформирования основания осадка сваи линейно зависит от нагрузки и обратно пропорциональна модулю сдвига грунта основания и длине сваи. В известных решениях принята именно такая зависимость. Для прямой сваи при учёте радиуса ствола:

$$c_1 = \frac{\mu P}{G L}; \quad c_2 = \frac{(1 + \mu) L - 4 r_0}{2}; \quad (6)$$

$$W = \frac{\mu P}{G L} \ln \frac{(1 + \mu) L - 4 r_0}{2 r_i}, \quad (7)$$

где L – длина сваи; r_0 – радиус ствола сваи; P – нагрузка на сваю; G – модуль сдвига.

Используя полученную формулу (1) для нахождения модуля упругости в любой точке деформируемой области, преобразуем формулу (7) к виду:

$$W = \frac{P(1+\mu)(Br_i)^{\frac{\mu}{2}}}{3\sqrt[3]{hLE_0}} \ln \frac{(1+\mu)L - 4r_0}{2r_i}.$$

Используя полученный результат, принцип независимости действия сил и эффект телескопического сдвига, нетрудно определить осадку цилиндрической сваи при линейно-упругом деформировании.

Нелинейно-деформируемое грунтовое основание

Будем рассматривать одиночную сваю в однородном нелинейно-деформируемом грунтовом основании. В этом случае условия телескопического сдвига сохраняются (формула (2)), и состояние равновесия можно представить одним уравнением (3).

Уравнение состояния грунта при упругом деформировании может быть представлено законом Гука:

$$\sigma_i^e = E \varepsilon_i^e, \quad (8)$$

а при нелинейном деформировании – любым уравнением кривой параболического типа, но только для соотношения

$$\sigma_i = A \varepsilon_i^m \quad (9)$$

возможны аналитические преобразования, и оно позволяет достаточно точно описывать процесс нелинейного деформирования, поэтому в работе уравнение (9) принято в качестве закона деформирования грунта. В выражении (8) индекс «е» – признак линейного деформирования.

На основании метода энергетической линеаризации [2]:

$$\varepsilon_i^e = \left(\frac{1+m}{2} \frac{E}{A} \varepsilon_i^e \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (10)$$

где

$$\varepsilon_i^e = \frac{\sqrt{2}}{2(1+\mu)} \sqrt{(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2 + \frac{3}{2} \gamma_{rz}^2}. \quad (11)$$

Уравнение (10) устанавливает связь между интенсивностями деформаций, полученными при линейном и нелинейном решении исходной задачи.

Выражение (10) при учёте соотношений (2) и (11) примет вид

$$\frac{\partial W}{\partial r} = \left(\frac{1+m}{2} \frac{E}{A} \right)^{\frac{1}{m}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2(1+\mu)} \right)^{\frac{1-m}{m}} \left(\frac{\partial W^e}{\partial r} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (12)$$

При упругом деформировании из уравнения (7) следует

$$\frac{\partial W^e}{\partial r} = \frac{c_1}{r}, \quad c_1 = \frac{\mu P}{G L}. \quad (13)$$

Интегрируя (12) при учёте (13) и (1), получим

$$W = \frac{B^{\frac{\mu}{2}} \sigma_{i,кр}}{3\mu E_0 \sqrt[3]{h}} \left(\frac{1+m}{2} \frac{\sqrt{3}}{\sigma_{i,кр}} \frac{G}{GL} \frac{\mu P}{GL} \right)^{\frac{1}{m}} \frac{2(1+\mu)}{\sqrt{3}} \int_{r_0}^{\infty} r^{\frac{\mu m-2}{2m}} dr + c_1. \quad (14)$$

В (14) несобственный интеграл будет сходящимся. Выполнив интегрирование, получим

$$W = \frac{4\sqrt{3} m^2 (1+\mu) B^{\frac{\mu}{2}} \sigma_{i,кр}}{9\mu E_0 \sqrt[3]{h} (m-1)(2m-\mu m+2)} \left(\frac{\sqrt{3} (1+m) \mu P}{2 L \sigma_{i,кр} r_0^{\frac{\mu m-2}{2}}} \right)^{\frac{1}{m}} r_0.$$

Изложенный подход позволяет сравнительно легко определить осадку цилиндрической сваи при нелинейном деформировании.

Заключение

Фундаменты на основе цилиндрических свай отличаются высокой технологичностью устройства и большой несущей способностью, что показано результатами экспериментальных исследований, выполненных в БелНИИС [3]. Грунт необходимо рассматривать как нелинейно-деформируемую среду, и как следствие возникает задача определения физико-механических характеристик грунтового основания цилиндрической сваи. Вполне очевидно, что вследствие устройства цилиндрической сваи грунтовое основание в её окрестности будет находиться в уплотнённом состоянии. Возникает вопрос значимости этого уплотнения и его формального описания. При этом была уточнена механико-математическая модель модуля деформации грунтового основания, примыкающего к боковой поверхности одиночной сваи. Было построено аналитическое приближённое решение задачи о деформациях грунтового основания цилиндрической сваи в любой точке при линейно-упругом и нелинейном деформировании при действии на сваю сжимающей нагрузки.

Разработанная формула для получения модуля деформации в любой точке деформируемой области цилиндрической сваи может использоваться при компьютерном моделировании осадки цилиндрической сваи в нелинейно деформируемом грунтовом основании, так как она дает достаточно точный результат, который отличается от экспериментальных менее чем на 5%.

Полученные результаты в публикациях не обнаружены.

Литература

1. Цытович, Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М. : Стройиздат, 1963. – 542 с.
2. Быховцев, В.Е. Компьютерное объектно-ориентированное моделирование нелинейных систем деформируемых твёрдых тел / В.Е. Быховцев. – Гомель : УО «ГТУ им. Ф. Скорины», 2007. – 219 с.
3. Рекомендации по проектированию и устройству металлических винтовых свай и анкеров для сооружений в грунтовых условиях Республики Беларусь. – Минск : УП «УП Институт БелНИИС», 2006. – 57 с.
4. Безухов, Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н.И. Безухов. – М. : Высшая школа, 1968. – 512 с.

Метод имитационного моделирования транспортных систем сообщения с регламентированным расписанием движения транспорта

Е.И. СУКАЧ, В.Н. ГАЛУШКО, Г.И. БОЛЬШАКОВА

Рассматривается метод имитационного моделирования транспортных систем сообщения с регламентированным расписанием транспорта. На основе выделенных общих свойств железнодорожных систем сообщения и систем общественного транспорта разработаны типовые модели разного уровня детализации, согласованная работа которых обеспечивает отображение вероятностного процесса функционирования исследуемых транспортных систем сообщения.

Ключевые слова: имитационная модель, железнодорожная сеть, транспортные потоки, план формирования поездов.

The method of simulation of transport systems with formally regulated timetables is described. The standard models of different levels of detail are developed on the basis of the selected general properties of railway communication systems and public transport systems, the coordinated work of which provides the demonstration of the probability process of the observed transport systems' functioning.

Keywords: simulation model, railway system, transport streams, schedule of train forming.

Введение

Объектами исследования являются железнодорожная система сообщения (ЖСС), обслуживающая грузовые перевозки, и транспортная сеть общественного транспорта (СОТ), обеспечивающая перемещение пассажиров. Системы относятся к классу сложных систем графовой структуры и обладают всеми особенностями функционирования, характерными для транспортных систем сообщения (ТСС). Поэтому многие задачи, решаемые для автомобильных систем сообщения, такие, как определение максимального потока и его наиболее эффективного распределения, поиск кратчайшего пути по различным критериям и их сочетаниям, поиск «узких мест» в вариантах организации ТСС, полностью актуальны и для этих систем. Стохастический характер функционирования ЖСС и СОТ требует применения метода моделирования для определения вероятностных параметров нагрузки выделенных объектов и выбора варианта состава их транспортных маршрутов, в результате чего достигается рациональная загрузка всей сети с учётом её ресурсов. Для решения таких задач могут быть использованы метод вероятностно-алгебраического моделирования СС [1] и метод имитационного моделирования транзитных транспортных потоков ограниченного региона [2].

Однако, особенности формирования транспортного потока и определённые ограничения в перемещении его транспортных средств, связанные с наличием регламентированного расписания, требуют разработки метода, позволяющего на детальном уровне исследовать возможные траектории случайного процесса перемещения транспорта и указать способы совершенствования этого процесса в условиях вероятностного характера нагрузки.

Учитывая сложность ЖСС и СОТ, многоуровневый характер их функционирования, сложившуюся децентрализацию управления, значительное число управляемых объектов, быстрое изменение величины транспортного потока и его распределения во времени и пространстве, необходимость принятия решения в условиях дефицита времени и информации, случайный характер структуры транспортного потока, влияние неконтролируемых факторов в системе, выводящего ТСС из устойчивого состояния, можно сделать вывод о том, что наиболее подходящим в данном случае является использование метода имитационного моделирования и его ориентация на решение задач исследования ТСС с регламентированным характером движения.

В условиях автоматизации управления ЖСС и СОТ, когда система управления ТСС обеспечивается информацией о функционировании транспорта в реальном масштабе време-

ни, моделирование может стать одним из основных способов сравнения альтернатив и выбора управляющих воздействий на систему при ее отклонениях от нормального состояния. Кроме этого, существенными преимуществами имитационного моделирования ТСС являются: возможность накопления обширной информации о характеристиках ТСС; определение существенных переменных работы ТСС и определение характера их взаимодействия; вмешательство в работу модели на любом этапе моделирования; перестройка, вставка, устранение или замена отдельных блоков модели без перестройки остальных. В силу своей гибкости, хорошей адаптируемости к предметной области моделирования, нечувствительности к изменениям структуры и характеру переменных имитационные модели отлично соответствуют особенностям применения системного анализа к исследованию ЖСС и СОТ.

В статье даётся описание свойств ТСС с регламентированным движением транспорта, излагается метод имитационного моделирования объекта исследования, отмечаются направления применения метода.

Общие свойства объектов исследования и задачи эффективной организации железнодорожных потоков и потоков общественного транспорта

Рассмотрение особенностей организации ЖСС и СОТ, их формализация с целью реализации имитационного моделирования позволили выделить общие свойства, отражающие динамику взаимодействия типовых компонентов исследуемых систем [3], [4]. Характерным для ТСС с регламентированным расписанием движения является наличие объектов доставки. Для ЖСС это вагоны с грузом или порожние. Для СОТ таковыми являются пассажиры. Перемещение по ТСС объектов доставки реализуется с использованием средств доставки, которые движутся в пространстве регламентировано по времени. Для ЖСС это локомотивы, обладающие своими техническими характеристиками, задающие скорость перемещения и количество транспортируемых вагонов («вместимость»). Для СОТ – единицы общественного транспорта, также имеющие свою допустимую скорость движения и вместимость салона.

Формирование поездов на сортировочных станциях и заполнение салонов на остановках имеет во многом схожий алгоритм. Выбор состава, в который будет добавлен вагон, определяется направлением движения и зависит от места назначения вагона, так же, как и транспорт, который будет обслуживать пассажира, выбирается с учётом планируемого маршрута движения пассажира.

Планирование пути перемещения вагона происходит однозначно на основании плана формирования составов (ПФС), задающего ближайшую сортировочную станцию. Планирование маршрута передвижения пассажира подчиняется схеме движения транспортных средств общественного транспорта. То есть для обеих сетей (ЖСС и СОТ) имеем регламентированный маршрут перемещения выделенных типов объектов доставки, который определяется пунктом отправления и пунктом назначения.

Следует отметить отличительную особенность перемещения объектов доставки в ЖСС и СОТ. Если в ЖСС по ПФС устанавливается строго определённый маршрут перемещения объекта доставки, то в СОТ маршрут перемещения пассажиров (объектов доставки) носит вероятностный характер, что обуславливает особенности организации моделирования.

При перемещении транспортного средства доставки по сети сообщения объект доставки может сменить транспортное средство. В случае ЖСС возможно неоднократное переформирование составов в узлах ЖСС, что будет соответствовать рассмотрению участковой стратегии обслуживания вагонопотоков. При исследовании СОТ смена транспортного средства доставки происходит в том случае, если для перемещения пассажира с места отправления к месту назначения требуются несколько транспортных средств, обслуживающих разные маршруты следования общественного транспорта.

Альтернативным вариантом организации перемещения транспортных потоков (ТП) является случай, когда объект доставки не покидает транспортное средство на протяжении всего маршрута следования. В случае ЖСС это будет соответствовать рассмотрению сквозной стратегии обслуживания вагонопотоков, при которой составы полностью формируются вагонами, имеющими общую станцию назначения. Аналогичный способ доставки для СОТ

описывает реальную типовую ситуацию, когда пассажир использует одно транспортное средство от места отправления к пункту назначения.

Как для СОТ, так и для ЖСС имеются устройства, ограничивающие движение транспортных средств. В обоих случаях – это светофоры, разрешающие или запрещающие движение в местах пересечения маршрутных линий ТСС.

Таким образом, можно выделить следующие *общие свойства* транспортного обслуживания объектов доставки в ЖСС и СОТ:

- каждый объект доставки (пассажир, вагон) может быть доставлен в пункт назначения различными путями, что соответствует различным вариантам плана формирования составов ЖСС и различным маршрутам СОТ;
- различаются отдельные типы объектов доставки (пассажиров, вагонов) исходя из целевых мест назначения транспортного передвижения;
- различным типам объектов доставки соответствует собственная интенсивность появления в узлах ТСС в различные временные интервалы;
- для каждого типа объектов доставки имеются маршруты перемещения, которые регламентируются пунктом отправления и пунктом назначения в соответствии с установленным порядком следования транспорта;
- имеются средства, ограничивающие движение транспорта (список мест задержки транспортных средств доставки в процессе движения);
- различаются стратегии обслуживания объектов доставки в процессе транспортировки (движение без смены транспортного средства доставки и движение, допускающее смену транспортных средств);
- для определения вероятностных характеристик реального объекта исследования, как правило, выбирается суточный цикл функционирования ТСС.

Следует отметить существенное отличие при рассмотрении выделенных объектов моделирования. Если в случае СОТ обслуживание объектов доставки на остановке требует задания только случайного времени пребывания на остановке, то для ЖСС с целью повышения детализации моделирования необходимо рассмотреть сложные процессы обслуживания вагонопотоков на сортировочных станциях. Полученные результаты моделирования наиболее загруженной технологической линии переработки транзитного потока учитываются при задании исходных данных моделирования всей ЖСС [5].

Условием эффективной организации транспортного процесса в ЖСС и СОТ является согласование транспортного потока, составляющего нагрузку на сеть с эксплуатационными показателями сети. Как правило, при этом решаются две сложные задачи. Первая состоит в определении оптимального транспортного потока для исследуемой транспортной сети или ее участков. Если поток превышает это значение, сеть будет работать в режиме перегрузок, с задержками, заторами, отказами, экономическими потерями. Решение второй задачи предполагает определение оптимальной мощности сети для пропуска заданных или спрогнозированных потоков. К типовым задачам имитационного моделирования ТСС можно отнести следующие: оценку суточной пропускной способности ТСС; поиск рационального состава транспортных средств на маршрутных линиях; анализ выполнимости графиков движения транспортных средств доставки при заданных интенсивностях поступления объектов доставки в узлах сети; сбор и анализ статистик обслуживания объектов доставки и функционирования средств доставки; поиск «узких мест» в работе ТСС; выбор оптимальной стратегии функционирования ТСС, учитывающей как интересы транспортных организаций, так и объектов доставки (пассажиров, организаций, заинтересованных в доставке грузов).

При решении перечисленных задач очевидна необходимость использования имитационного моделирования. Причем, моделирование должно осуществляться на высоком уровне детализации процесса обслуживания объектов доставки транспортными средствами. Это обеспечит, во-первых, отображение всего многообразия траекторий движения объектов доставки по ТСС с учётом обслуживания их в промежуточных узлах (остановках, сортировочных станциях) сети. Во-вторых, позволит получить коэффициент загрузки транспортных

средств в динамике суточной работы транспорта и множество других характеристик, которые трудно получить на практике. В-третьих, позволит рассмотреть на детальном уровне типовой алгоритм обслуживания объектов доставки при их транспортировке средствами доставки. В-четвёртых, использование математического моделирования ЖСС и СОТ позволит определить «узкие места» на двух уровнях детализации: уровне обслуживания объектов доставки в узлах сети; уровне организации транспортного процесса доставки, позволяющего оценить влияние количества транспортных средств и ресурсов сети при обслуживании известного суточного (месячного или годового) потока объектов доставки.

Идея метода имитационного моделирования транспортных систем сообщения с регламентированным движением транспорта

Метод основан на поэтапном отображении в модели ТСС транспортного перемещения динамических единиц сети в имитационной модели ТСС в течение цикла её функционирования. При построении, испытании и эксплуатации имитационных моделей (ИМ) используются правила формализации и особенности функционирования ТСС различного назначения (СОТ и ЖСС) [6], [7], [8].

Все исходные данные для ИМ ТСС определяются путём статистического анализа результатов мониторинга потока динамических единиц за цикл функционирования реальной ТСС и последующего измерения исследуемых характеристик ТСС для имитации процесса обслуживания динамических единиц (пассажиров $\{PASS_{ir}\}$, вагонов $\{VAG_{ir}\}$) i -го типа, поступающих в ТСС в r -м узле ($STEL_{1r}$). На исследуемых участках ТСС (маршрутные линии для СОТ ($MLIN_j$), пути перемещения составов ЖСС по плану формирования составов ($PPER_j$)), где реализуется перемещение динамических единиц сети DEL_{1ir} , согласно разработанной технологии мониторинга [5] измеряется статистика их обслуживания сетью и фиксируется структура динамического потока, имеющая место в ТСС на момент проведения мониторинга. Эта статистика служит исходной информацией для имитационного моделирования ТСС.

В ходе имитации процесса обслуживания динамического потока статическими элементами сети $STEL_{1r}$ согласно статистике мониторинга воспроизводится структура динамического потока элементов сети, поступающих в ТСС за выбранный для исследования цикл ее функционирования. С помощью ИМ ТСС имитируются последовательные транспортные операции по обслуживанию множества динамических элементов сети $\{DEL_{1ir}\}$ имеющимся в ТСС составом транспортных средств доставки TSD_{kj} , движущихся согласно имеющимся в ТСС маршрутам движения MD_j (здесь kj – номер транспортного средства доставки на j -ом маршруте движения). Во время имитации движения транспортных средств доставки от пункта отправления до пункта назначения за исследуемый цикл обслуживания ими множества $\{DEL_{1ir}\}$ фиксируется статистика моделирования, являющаяся исходной информацией для вычисления интегральных статистик и откликов имитационного моделирования ТСС.

В результате моделирования с помощью ИМ ТСС на высоком уровне детализации отображается динамика обслуживания статическими элементами сети динамических элементов транспортного потока, в процессе чего фиксируется статистика использования ресурсов ТСС динамическими элементами и временные характеристики их обслуживания ТСС, которые в реально функционирующей ТСС определить практически невозможно. Кроме того, с использованием ИМ ТСС рассчитываются характеристики обслуживания существующего транспортного потока при проектируемом составе транспортных средств доставки, обслуживающем выделенные для исследования маршрутные линии.

Поскольку сам поток динамических элементов $\{DEL_{1ir}\}$ носит случайный характер, то его характеристики моделируются с помощью векторов вероятностей (P_{irj}), описывающих случайный процесс появления динамического элемента i -го типа в r -х узлах j -ого маршрута движения. Интервалы между поступлениями динамических элементов в ТСС также являются случайными величинами и разыгрываются в ИМ ТСС с помощью функций распределения $F_{1jkr}(\tau_1)$ и $F_{2jkr}(\tau_2)$, где τ_1 и τ_2 – соответственно интервалы между соседними поступлениями динамических элементов в местах их отправления и в местах назначения после выполнения

планируемых операций (время пребывания пассажиров в местах трудовой деятельности для СОТ или время разгрузки вагонов на станциях назначения для ЖСС). Необходимость задания случайных величин интервалов между соседними их поступлениями τ_{1l} и τ_{2l} в очередь на транспортные средства доставки обуславливает необходимость использования при имитационном моделировании ТСС метода статистических испытаний. Здесь l – номер реализации процедуры Монте-Карло ($l = \overline{1, N_R}$, где N_R – число реализаций ИМ ТСС, определяемое заранее на основании заданной точности имитации откликов модели). После завершения N_R реализаций ИМ ТСС обслуживания $\{DEL_{lir}\}$ заданным составом средств доставки $\{TSD_{kj}\}$ в исследуемый временной период, согласно процедуре Монте-Карло, осуществляется усреднение статистик имитации с определением оценок математического ожидания и дисперсий откликов моделирования.

Исходя из особенностей ТСС как объекта имитации [4], на основе декомпозиции транспортного процесса планируемых перевозок в ИМ ТСС выделен набор подмоделей разного уровня детализации взаимодействия динамических и статических элементов сети. Метод предполагает четыре уровня представления ТСС в соответствующих универсальных подмоделях:

- создание и уничтожение транспортного потока объектов доставки DEL_{lir} в выделенный для исследования временной период подмоделью поведения (уровень 1) до и после перемещения по сети транспортным средством доставки TSD_{kj} по маршруту движения MD_j ;
- обслуживание динамических элементов DEL_{lir} на маршруте MD_j с помощью средств доставки TSD_{kj} подмоделью транспортного обслуживания потока объектов доставки (уровень 2);
- имитация функционирования MD_j согласно установленному расписанию подмоделью организации транспортных маршрутов ТСС (уровень 3);
- обслуживание всей системой динамического транспортного потока на выделенном интервале времени подмоделью функционирования всего множества $\{MD_j\}$ (уровень 4).

Особенностью построения этих подмоделей является необходимость отображения вероятностного процесса наполняемости средств доставки во время имитации передвижения их по ТСС, а также уникальный характер структуры ТСС и состава транспортных средств для реальных объектов исследования.

Метод имитации ТСС предполагает итеративное использование результатов моделирования подмоделей одного уровня подмоделями других уровней с учётом коррекции их структуры и состава процессов, имитирующих транспортные операции. Поэтому для каждого уровня детализации ТСС (соответствующей подмодели) состав и структура процесса транспортного обслуживания объектов доставки параметризованы. Это обстоятельство позволило создать библиотеку универсальных подмоделей компонентов ТСС, специализированных по уровням детализации [5]. Параметры позволяют настроить универсальные подмодели ИМ ТСС под конкретную структуру исследуемой реальной ТСС. К ним относятся:

- маршрутные карты (MK_{ir}) движения объектов доставки i -го типа по запланированному маршруту движения MD_j от r -ого пункта отправления до места их назначения и возврат обратно в исследуемом временном цикле имитации;
- характеристики передвижения транспортных средств доставки TSD_{kj} (Z_{jk});
- количественные характеристики, определяющие число маршрутных линий (J), множество промежуточных узлов (R_j) на каждом MD_j , список мест задержки движения транспорта $\{SV_j\}$ на каждом маршруте, множество транспортных средств доставки $\{K_j\}$.

Метод реализуется в две стадии. Первая стадия включает в себя этапы создания ИМ ТСС, выполняемые специалистами, владеющими языками и основами имитационного моделирования. При создании ИМ ТСС необходимо реализовать следующие этапы: составление содержательного описания ТСС (этап 1); организация мониторинга функционирования ТСС для получения состава исходной информации, необходимой при построении ИМ ТСС (этап 2); формализация всех уровней представления ТСС (этап 3); разработка библиотеки программ ИМ ТСС (этап 4); формирование программы имитационного моделирования ТСС (этап 5); постановка натурных экспериментов на прототипах ТСС для получения исходной

информации моделирования (этап 6); установка в тексте ИМ ТСС подпрограмм обеспечения технологий имитационного эксперимента (ИЭ) (этап 7); перевод формального описания в текст ИМ (этап 8); отладка ИМ ТСС (этап 9); ввод данных варианта ИМ ТСС (этап 10); испытание и верификация универсальной программы ИМ ТСС, адаптированной для конкретной структуры исследуемой ТСС (этап 11); проверка адекватности варианта универсальной ИМ ТСС исследуемой ТСС с помощью реализованных процедур в составе комплекса имитации ТСС (этап 12) [4]. По завершении этих этапов ИМ ТСС готова к эксплуатации и записывается в виде очередной версии в библиотеку комплекса имитации ТСС.

На второй стадии реализацию метода обеспечивают сами специалисты транспортных организаций, которые эксплуатируют созданный вариант ИМ ТСС. Здесь уже не требуется высокой квалификации по программированию и моделированию, поскольку программа ИМ ТСС готова для использования этими специалистами, и требуется только выполнение инструкций по эксплуатации комплекса имитации ТСС. Вторая стадия метода реализуется тремя этапами эксплуатации вариантов ИМ исследуемой ТСС.

На этапе 13 иницируется очередной вариант ИМ ТСС для исследования динамики функционирования ТСС в условиях транспортного потока динамических элементов, параметры которого были определены ранее в ходе мониторинга. При этом осуществляется информационная стыковка компонентов ИМ ТСС для конкретной структуры ТСС и состава транспортных средств доставки в исследуемом варианте ТСС. Полученная на этапе 13 версия программы ИМ ТСС используется далее в качестве базовой программы.

Исследование динамики функционирования сети с помощью программы варианта ИМ ТСС осуществляется на этапе 14. По результатам имитации вариантов организации ТСС, полученных на этапе 14, на этапе 15 принимаются проектные или корректирующие решения по выбору состава транспортных средств доставки $\{TSD_{kj}\}$ и маршрутов их перемещения.

Как видим, число этапов эксплуатации параметризованной модели намного меньше числа этапов разработки новой программы имитационного моделирования ТСС. Только в тех случаях, когда универсальная, готовая к эксплуатации ИМ ТСС не подходит для исследований ТСС, приходится начинать исследование с первого этапа. В основном реализуются этапы эксплуатации настроенной параметризованной модели, когда специалисты ТСС желают разобраться в неэффективности организации обслуживания транспортного потока и принять обоснованные решения по устранению этих причин. Как видим, положительной чертой метода является отделение этапов создания от этапов использования ИМ ТСС. Когда возникает необходимость изменения алгоритмов компонентов ИМ ТСС, пользователю предлагается комплекс имитации ТСС и технология его использования для реализации метода.

Заключение

Единые принципы и правила составления содержательного описания ЖСС и СОТ как представителей класса ТСС с регламентируемым расписанием движения транспорта позволяют выделить типичные структурные компоненты исследуемых систем, формально описать их взаимодействие, установить цели и критерии оценки вариантов организации функционирования исследуемых систем и с учётом имеющихся запрограммированных компонентов оперативно построить ИМ ТСС. При этом метод имитации может использоваться как в случае модификации имеющейся ИМ, так и при создании новой модели. В обоих случаях исследователю необходимо последовательно пройти все перечисленные этапы, используя новые технологические приёмы построения детальной ИМ ТСС, а именно: организацию наследования информации транзактами при отображении в модели различных динамических единиц (вагонов и составов в модели ЖСС, пассажиров и средств общественного транспорта); согласование в динамике графа траекторий перемещения объектов доставки с графом маршрутов движения средств доставки исследуемой ТСС; представление времени обслуживания транзактов в узлах сети в виде сложных функций, значения которых определяются в зависимости от расчетных параметров соответствующих ИМ, полученных в результате имитации.

Литература

1. Сукач, Е.И. Методика оценки пропускной способности потоковой сети на основе вероятностно-алгебраического моделирования / Е.И. Сукач // Доклады БГУИР. – 2011. – № 4(58). – С. 18–24.
2. Максимей, И.В. Использование имитационного моделирования для нахождения интегрального максимального потока в транспортной сети региона / И.В. Максимей, Е.И. Сукач, П.В. Гируц // Реєстрація, зберігання і обробка даних (Data Recording, Storage & Processing). – 2008. – Т. 10, № 1. – С. 49–58.
3. Максимей, И.В. О технологии проектирования программной системы моделирования для предметных областей организации транспортных потоков региона / И.В. Максимей, П.В. Гируц, Е.А. Ерофеева, Е.И. Сукач // Третья международная научная конференция «Сетевые компьютерные технологии», 17–19 окт. 2007 г. – Минск : БГУ, 2007. – С. 110–115.
4. Сукач, Е.И. Использование комплекса автоматизации имитационного моделирования транспортных систем при решении задач управления транспортными потоками / Е.И. Сукач // Материалы трудов юбилейной научно-практической конференции, 11 июня 2009 г. : в 4 ч. Ч. 4. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2009. – С. 179–182.
5. Максимей, И.В. Автоматизация этапов разработки и эксплуатации имитационных моделей транспортных систем / И.В. Максимей, Е.А. Ерофеева, П.В. Гируц, Е.И. Сукач // Проблемы программирования. – 2008. – № 4. – С. 104–111.
6. Сукач, Е.И. Автоматизация обработки и анализа данных имитационного моделирования железнодорожной сети / Е.И. Сукач // Реєстрація, зберігання і обробка даних (Data Recording, Storage & Processing). – 2009. – Т. 11, № 2. – С. 59–69.
7. Максимей, И.В. Проектное моделирование технологии обслуживания пассажиропотока городской транспортной сетью / И.В. Максимей, Е.И. Сукач, В.Н. Галушко // Проблемы управления и информатики. – 2009. – № 2. – С. 121–131.
8. Галушко, В.Н. Метод имитационного моделирования функционирования городской транспортной системы / В.Н. Галушко, Е.И. Сукач // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. – 2010. – № 5(62). – С. 16–20.

Способ формализации объектов графовой структуры с вероятностными параметрами функционирования

Е.И. СУКАЧ, Д.В. РАТОБЫЛЬСКАЯ, Ю.В. ЖЕРДЕЦКИЙ, Г.А. МАЛЬЦЕВА

Предлагается способ формализации объектов графовой структуры, учитывающий динамику вероятностных параметров их элементов.

Ключевые слова: вероятностно-алгебраическое моделирование, стохастические матрицы, надёжность систем, цепи Маркова.

A method of formalizing graph structure objects is provided, which takes into account the dynamics of the probability parameters of their (objects') elements.

Keywords: probability-algebraic simulation, stochastic matrix, system reliability, Markov chains.

Введение

Сложные системы (СС), представляющие собой совокупность изменяющихся элементов, взаимосвязанных между собой и рассматриваемых как единое целое, обладают тем общим свойством, что на этапе формализации они представляются в виде графа, а это позволяет применить к исследованию характеристик таких систем методы теории графов. Представление СС в символьном виде позволяет произвести расчёты с использованием различных компьютерных методов, играющих роль механизма принятия решения.

В тех случаях, когда получение решений на реальном объекте дорого, сложно или, вообще, невозможно, возникает необходимость использования моделей. Модель упрощает, удешевляет и ускоряет процесс исследования оригинала. Меньшая сложность модели по сравнению с реальной ситуацией или объектом достигается тем, что модель описывает только отдельные элементы, связи и функции реального объекта, которые влияют на принимаемое решение. Сложность моделирования заключается в том, чтобы правильно выделить наиболее важные для поставленной задачи факторы и описать их влияние на объект. Как правило, не существует универсальных правил определения, какие из известных факторов объекта являются существенными для конкретного случая. Если условия моделирования позволяют, то рекомендуется построить несколько моделей с разными наборами «существенных» свойств и затем оценить их на адекватность объекту и цели моделирования, учитывая при этом, что разные схемы формализации по-разному определяют существенные структурные элементы исследуемых объектов. С другой стороны, с помощью одной и той же структурной схемы можно дать графическое описание систем из различных прикладных областей и определить функции взаимодействия их элементов в зависимости от целей и задач исследования. Именно этим определяется неоднозначность графического описания реальных объектов графовой структуры (ОГС).

Как правило, сложные системы, имеющие графовую структуру, в смысле исследуемого свойства (надёжности, производительности, стоимости функционирования) являются неоднородными. Это означает, что числовые показатели исследуемого свойства структурных элементов системы могут случайным образом изменяться в некотором (иногда достаточно большом) диапазоне.

При формализации СС в виде графа структурным элементам исследуемого ОГС с учётом особенностей решаемой задачи ставятся в соответствие рёбра или вершины [1]. Например, в случае анализа надёжности компьютерных сетей они обычно описываются графами, где рёбра отображают каналы связи, а в качестве вершин выступают элементы исследуемой сети. Такими элементами могут быть рабочие станции, серверы, повторители, переключатели, маршрутизаторы или другие устройства. Очевидно, что при исследовании компью-

терных сетей, относящихся к ОГС, вероятностные значения надёжности могут иметь как их узлы, так и линии связи. Поэтому нужно решать как одну группу задач, так и другую.

Таким образом, неоднородность, которая выражается в разных значениях исследуемого свойства элементов ОГС, при формализации может проецироваться как на вершины, так и на рёбра графа. Отсюда следуют разграничения в схемах формализации, методах и, соответственно, в программном инструментарии, предназначенном для расчёта вероятностных характеристик исследуемого свойства СС.

В первом случае, в случае представления элементов ОГС рёбрами графа, вершины графа представляют связи между элементами. Такая схема формализации, предполагающая учёт вероятностных характеристик рёбер при формировании вероятностных характеристик всего графа, являющегося образом СС, положена в основу логико-вероятностных методов (ЛВМ) [2]. Возможности ЛВМ ограничены числом элементов, составляющих графовую структуру, как в случае рассмотрения структурно-сложных систем (без циклов и повторов), так и в случае структурно-простых систем.

Во втором случае элементам ОГС сопоставляются вершины графа, а рёбра являются образом линий связи между выделенными элементами. В статье [3] приведён ряд примеров графовых структур, метод расчёта вероятностных характеристик надёжности которых предполагает именно такую схему формализации. Предложенный метод перекрытия ориентирован на исследование ОГС, содержащих, как правило, множество элементов с ограниченным числом соединений (степень вершин графа не превышает 3) и характеризующихся двумя (тремя) состояниями, не отличающимися по величине вероятностей для всех элементов исследуемых графовых структур. Указанные ограничения значительно снижают возможности применения метода при решении практических задач оценки надёжности.

В статье описывается *универсальный способ формализации СС*, ориентированный на применение метода вероятностно-алгебраического моделирования [4] для оценки вероятностных характеристик графовых структур, допускающий их эквивалентное преобразование из одной формы в другую. Он обеспечивает получение вероятностной оценки исследуемого свойства структурно-сложных систем (ССС) как в случае первой схемы формализации, в которой варьируются вероятностные значения рёбер графа, так и в случае второй схемы, предполагающей вероятностные изменения вершин, содержащихся в графе – образе исследуемой СС.

При исследовании структурно-простых систем (СПС) первая схема формализации, являющаяся частным случаем второй схемы, обеспечивает возможность одновременного рассмотрения вероятностных характеристик исследуемого свойства элементов системы и вероятностных функций взаимодействия между этими элементами. Эта особенность формализации обеспечивает универсальность подхода к формализации СПС и расширяет класс решаемых задач.

Классификация ОГС

Оценивая сложность формализации графовых СС, выделим два типа ОГС. К первому типу объектов графовой структуры (ОГС1) будем относить системы, имеющие явно выраженную графовую структуру. Это потоковые системы, которые в соответствии с семантикой графовой структуры могут интерпретироваться как транспортные, производственные, вычислительные и другие сети, осуществляющие перемещение единиц потока. Значительную часть потоковых систем составляют транспортные сети различного назначения, а среди них особое место занимают транспортные системы сообщения (ТСС), проблемы функционирования которых в настоящее время проявляются наиболее остро и требуют разработки математических методов, позволяющих реализовать единый подход к нахождению наиболее рационального варианта их организации. Основными классами ТСС являются автомобильные системы сообщения, железнодорожные системы сообщения, системы общественного транспорта. Кроме этого, к первому типу ОГС относятся электротехнические системы. Большинство ОГС1 являются СССР как по структуре, так и по числу несовместных состояний.

К объектам графовой структуры второго типа (ОГС2) отнесём сложные системы, явление структуры которых требует временных и материальных затрат для реализации твор-

ческого процесса определения совокупности их элементов и описания отношений между ними. Как правило, это функционально-сложные системы (ФСС), включающие небольшое число элементов, между которыми могут быть установлены функциональные связи (пространственные или временные), позволяющие представить систему в виде графа. Сложность ОГС2 в большей степени обусловлена неоднозначностью и нетривиальностью функциональных отношений между элементами системы. Структура таких систем, как правило, представляется в виде дерева.

Примером ОГС2 с пространственными функциональными связями являются механические системы, включающие множество элементов, согласованная работа которых обеспечивает безотказное функционирование всей системы. Примером ОГС2 с временными функциональными связями являются технологические процессы, включающие операции, выполнение которых упорядочено во времени. Кроме этого, к ОГС2 с временными связями можно отнести графически представленные сценарии опасного состояния (СОС). При этом для каждого конкретного случая (от взрыва, пожара, затопления, разгерметизации в технике; потоков природных вод, экзогенных геологических процессов в природе; панике на бирже, банкротств и дефолтов в экономике и финансах) необходимо уяснить, каким образом может возникнуть ущерб «большого масштаба». Поэтому описание возможного СОС и представление его в виде графа представляет наибольшую трудность и является эвристической творческой работой, которая не имеет алгоритма [2].

Следует отметить, что классификация ОГС является условной, и с учётом уровня детализации, множества анализируемых свойств, поставленных целей и критериев оценки объекты одного типа могут быть отнесены к классу объектов второго типа.

Формальное описание сложных систем графовой структуры

Определение вероятностных характеристик исследуемого свойства СС с заданным уровнем выполнения предписанных ей функций включает решение задач определения структурного состава образующих ее элементов, установления рабочих параметров элементов, учёта процессов взаимного влияния и взаимодействия этих элементов в ходе реализации моделирования. Зачастую непосредственное изучение объекта в целом как системы невозможно из-за его сложности, и исследователь сталкивается с проблемой декомпозиции СС: «...приходится расчленять объект на конечное число частей, учитывая связи между ними, характеризующие их взаимодействие. Здесь и начинается интерпретация исследуемого объекта как сложной системы, а его частей – как подсистем» [5].

В основу формализации СС, относящихся к классу ОГС, с целью их вероятностно-алгебраического моделирования положен способ их представления в виде графовых структур, отражающих связи между элементами системы. В случае если система имеет явно выраженную графовую структуру, выбор состава элементов системы не составляет труда. Им соответствуют реальные физические объекты. При этом функциональные связи между элементами рассматриваемых систем устанавливаются с учётом физического взаимного расположения элементов, а сами функции, определяющие характер взаимодействия, описываются в соответствии с решаемой исследовательской задачей.

Для ОГС2, который составляют ФСС, необходимы методы умозрительного структурирования, позволяющие определить состав элементов системы и описать их функциональные связи. В процессе формализации этих систем выбираются существенные и исключаются тривиальные связи, на основе чего определяется состав элементов и функциональные зависимости между ними.

В обоих случаях предполагается, что система представляется совокупностью элементов $K = \{K_i\}, i = \overline{1, m}$. Число элементов выделяется в соответствии с уровнем детализации изучаемого объекта. Это могут быть как неделимые элементы, представляющие самый высокий уровень детализации СС, так и подсистемы, включающие совокупность неделимых элементов, которые рассматриваются как самостоятельные неделимые элементы системы выбранного уровня абстрагирования.

Элементы характеризуются численными значениями совокупности параметров, которые изменяются в процессе функционирования системы и определяют несовместные состояния исследуемого свойства элементов. То есть состояние элемента характеризуется перечнем (обычно статическим) характеристик данного объекта и текущими (обычно динамическими) значениями каждого из этих свойств. В произвольный момент времени элемент с некоторой вероятностью может находиться в одном из этих состояний.

При анализе вероятностных характеристик реальных систем не всегда достаточно рассмотрения двух состояний (1 и 0). Следует иметь в виду, что состояния могут характеризовать различные уровни износа элементов, соответствовать различным видам отказов или определять возможные значения исследуемого свойства, имеющего вероятностную природу. В общем случае число состояний исследуемого свойства элементов задаётся множеством:

$$S = \{S_j\}, j = \overline{0, n}, \quad (1)$$

которое формируется с учётом особенностей объекта исследования и степени его детализации.

Описание сложных систем графовой структуры допускает рассмотрение различного числа состояний для выделенных элементов и системы в целом. Такая ситуация может соответствовать приобретению системой некоторых новых свойств, которые не характерны для ее отдельных элементов, или описывать случай, когда исследуемое свойство системы характеризуется большим числом значений параметра, определяющим её состояния, чем её отдельно взятые элементы.

Предполагается, что вероятности состояний известны и задаются векторами:

$$P^i = (p_0^i, p_1^i, \dots, p_n^i), \sum_{j=0}^n p_j^i = 1, i = \overline{1, m}. \quad (2)$$

Вектор вероятностей состояний является более информативным в смысле описания показателя исследуемого свойства системы, чем одно его значение. Он даёт целую линейку значений и их вероятности для выбранного показателя, характеризующего исследуемое свойство системы.

Предполагается, что система функционирует циклически и за определённый интервал времени выполняет некоторую функцию, которая обеспечивается согласованной работой всех элементов системы.

Связи между элементами системы зависят от решаемой задачи и отличают её от простого набора частей. Они формализуются с учётом отношений между элементами системы, установленными при решении задачи декомпозиции системы, и задаются функциями $F = \{F_j\}, j = \overline{1, z}$, которые могут быть как детерминированными, так и вероятностными. В случае детерминированных функций состояния системы однозначно определяются состояниями её исходных элементов. При случайном характере взаимодействия элементов используются вероятностные функции, позволяющие по установившимся состояниям исходных элементов определить вектор возможных состояний системы и их вероятности. Функциональные связи определяют условия функционирования системы, при которых различные сочетания уровней исследуемого свойства элементов обеспечивают определённый уровень исследуемого свойства всей системы.

Выделенные компоненты $K = \{K_i\}, i = \overline{1, m}$ и функциональные связи между ними $F = \{F_j\}, j = \overline{1, z}$ задают структуру графа исследуемой системы. Для ССС возможны два варианта формирования графовых структур.

Вариант 1. Схема формализации «элементы-рёбра». Выделенным элементам $K = \{K_i\}, i = \overline{1, m}$ сопоставляются рёбра графа, а вершины определяют места связи выделенных элементов. Будем считать, что структура системы задаётся графом $G(N, K)$, где $N = \{N_v\}, v = \overline{1, l}$ – конечное множество вершин, $K = \{K_i\}, i = \overline{1, m}$ – множество ребер, для которых указаны пары вершин, которые это ребро соединяют. На рисунке 1 представлена схема

ССС, которая в области электротехники называется структурой двух «звезд», включенных на «треугольник» [2].

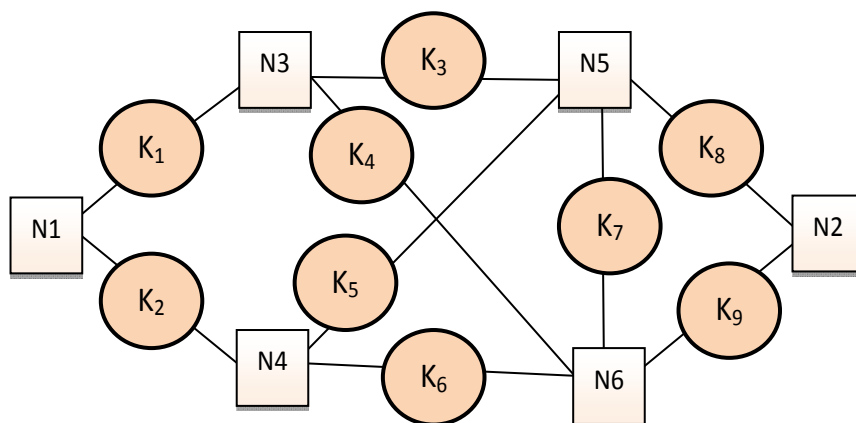


Рисунок 1 – Схема формализации СССР «элементы-рёбра»

Из множества вершин графа выделяется две вершины, определяющие вход в систему ($N_1 \in N$) и выход из неё ($N_2 \in N$).

Вариант 2. Схема формализации СССР «элементы-вершины». Элементом $K = \{K_i\}, i = \overline{1, m}$, образующим в совокупности СССР, сопоставляются вершины графа, а рёбра определяют линии связи между ними. В этом случае структура системы задаётся графом $G(K, N)$, где $K = \{K_i\}, i = \overline{1, m}$ – множество вершин, отображающих элементы, а $N = \{N_v\}, v = \overline{1, l}$ – конечное множество ребер. Пример графа, построенного с использованием указанной схемы формализации, представлен на рисунке 2. Очевидно, что при этой схеме формализации будут оцениваться вероятностные характеристики функционирования другой СССР, включающей только 6 элементов.

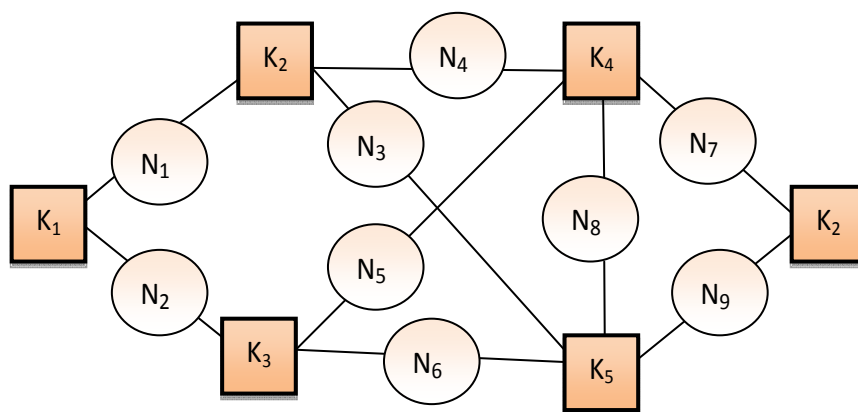


Рисунок 2 – Схема формализации СССР «элементы-вершины»

Из множества вершин графа выделяется две вершины, определяющие вход в систему ($K_1 \in K$) и выход из неё ($K_2 \in K$).

Для структурно-простых систем на основе выделенной совокупности элементов системы $K = \{K_i\}, i = \overline{1, m}$ и функциональных отношений между ними $F = \{F_j\}, j = \overline{1, z}$ разрабатывается графическая схема $G(F, K)$, представляющая собой древовидную структуру, отражающую связи между элементами (рисунок 3).

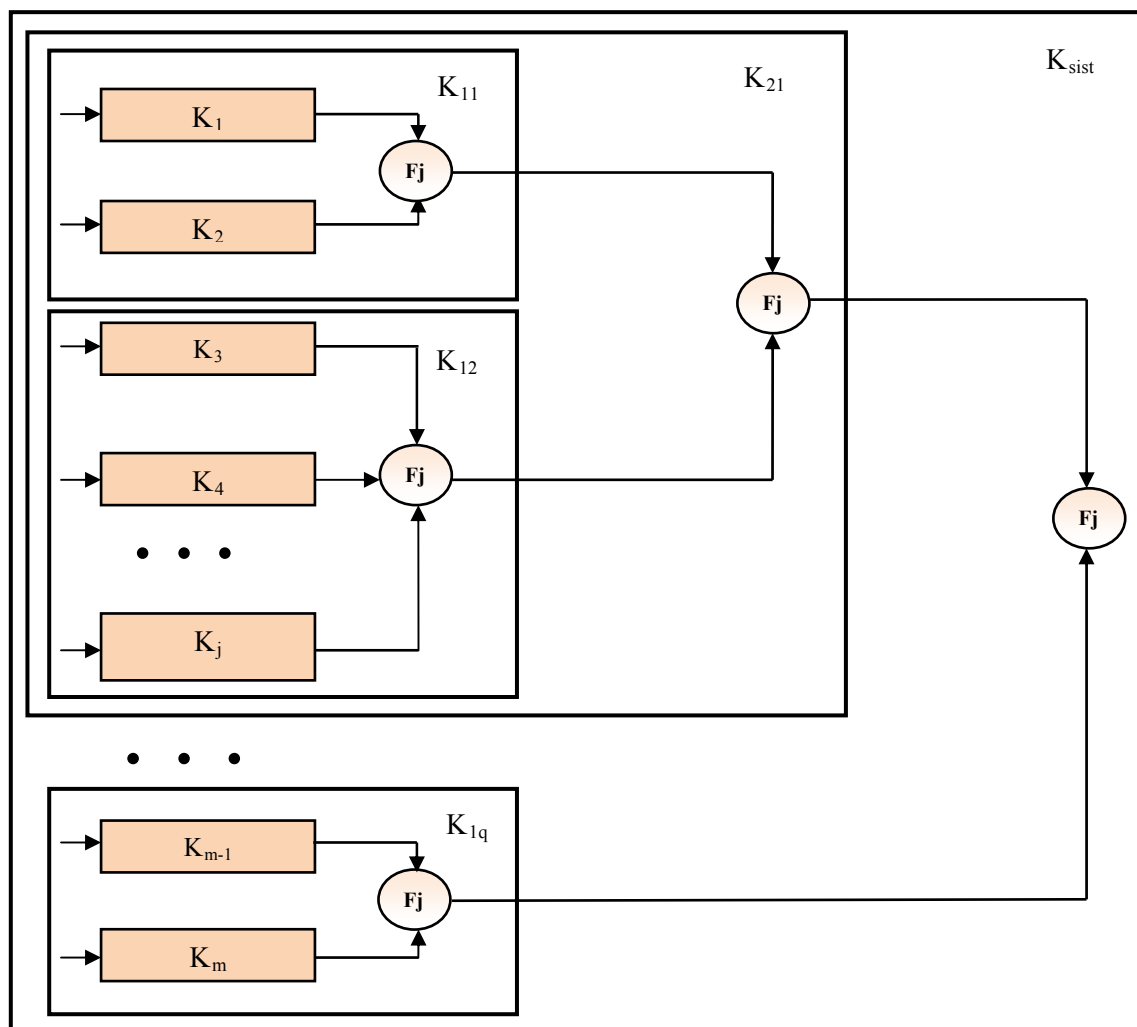


Рисунок 3 – Графическое представление связей между элементами СПС

На схеме F_j обозначает множество вершин, определяющих связи между элементами системы, $\{K_{ig}\}$ – множество рёбер, соответствующих структурным блокам (подсистемам) системы разного уровня детализации. Элементы $K = \{K_i\}, i = \overline{1, m}$ представлены листьями дерева.

Графическая схема является аналитически точным и строго формализованным отображением знаний о том, какие элементы выделены в процессе формализации и какие отношения между ними возникают в процессе её функционирования. Ставится задача определения вектора вероятностей состояний исследуемого свойства СС по вероятностным значениям исследуемого свойства её элементов:

$$P^s = (p_0^s, p_1^s, \dots, p_n^s), \sum_{j=0}^n p_j^s = 1. \quad (3)$$

Таким образом, обоснованное и целенаправленное разделение исследуемой системы на взаимосвязанные элементы и установление функциональных связей между ними обеспечивает формальное описание системы для последующего моделирования исследуемого свойства системы. Выделенные элементы $K = \{K_i\}, i = \overline{1, m}$ и функциональные связи между ними $F = \{F_j\}, j = \overline{1, z}$ задают структуру графа исследуемой СС. Вероятностные характеристики элементов (2), принимающие числовые значения, являются параметрами расчётных вероятностно-алгебраических моделей исследуемой системы. Вероятностные характеристики всей системы (3) являются откликами моделирования.

При рассмотрении объекта исследования в динамике выделяются следующие аспекты отображения процесса функционирования СС. Во-первых, необходимо учитывать дина-

$$P^{st} = (p_0^{st}, p_1^{st}, \dots, p_n^{st}), \sum_{j=0}^n p_j^{st} = 1, t = \overline{1, T}. \quad (2.9)$$

Они позволяют судить об изменении свойства системы в процессе её эксплуатации, определять режим её функционирования и стратегию динамического управления параметрами элементов, характеризующими исследуемое свойство.

Таким образом, формализация динамически изменяющейся СС с целью её вероятностного анализа включает следующие действия: выделение элементов $K = \{K_i\}, i = \overline{1, m}$, построение её графовой схемы с выделением её вероятностно-изменяющихся структурных составляющих, задание множества функций $F = \{F_j\}, j = \overline{1, z}$, описывающих отношения между выделенными элементами и определяющих структурные коэффициенты вероятностно-алгебраического моделирования, выбор способа вероятностного изменения элементов и задание специфической функции управления процессом моделирования (U) в виде совокупности продукционных правил, позволяющей реализовать во времени корректирующие воздействия на процесс моделирования.

Заключение

Предложенная схема формализации ОГС характеризуется следующими свойствами: иерархия графического представления ОГС; однотипность описания элементов разного уровня иерархии; типизация связности элементов; преобразуемость графовых структур.

Следует отметить, что более общим представлением СС является её формализация в виде графа с вероятностными значениями вершин, характеризующими исследуемое свойство её структурных элементов. При этом связи между элементами считаются детерминированными в смысле исследуемого свойства и представляются рёбрами графа. Это объясняется тем, что любая графовая структура с вероятностными значениями рёбер всегда может быть преобразована в графовую структуру с вероятностными значениями вершин, но не всякий граф с вероятностными вершинами может быть преобразован в структуру с вероятностными рёбрами.

Литература

1. Сукач, Е.И. О различных подходах к исследованию вероятностных характеристик надёжности сетевых структур / Е.И. Сукач // Шестая научно-практическая конференция «Математическое и имитационное моделирование систем. МОДС'2011», 27–29 июня 2011 г. – Чернигов, 2011. – С. 154–156.
2. Рябинин, И.А. Надёжность и безопасность структурно-сложных систем / А.И. Рябинин. – СПб. : изд-во Санкт-Петербургского университета, 2007. – 276 с.
3. Sahinoglu, M. Network reliability evaluation / M. Sahinoglu, R. Benjamin // Wiley Interdisciplinary Reviews : Computational Statistics. – Vol. 2 March/April, 2010. – P. 189–211.
4. Сукач, Е.И. Метод вероятностно-алгебраического моделирования надёжности функционально-сложных систем / Е.И. Сукач // Информатика. – 2010. – № 3. – С. 18–30.
5. Бусленко, Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. – М. : Наука, 1978. – 395 с.
6. Сукач, Е.И. Метод перераспределения автомобильных транспортных потоков региона на основе имитационного моделирования / Е.И. Сукач // Реєстрація, зберігання і обробка даних (Data Recording, Storage & Processing). – 2008. – Т. 10, № 3. – С. 37–45.

Содержание

Биология

Бачура Ю.М., Храмченкова О.М. Влияние ионов меди на морфологические показатели <i>Chlorococcium hypnosporum</i> Starr. в культуре.....	3
Дайнеко Н.М., Сапегин Л.М., Тимофеев С.Ф. Динамика продуктивности луговых агроэкосистем на пойменных землях.....	10
Собченко В.А., Храмченкова О.М., Цуриков А.Г., Бачура Ю.М., Веремеев В.Н., Галиновский Н.Г., Жадько С.В. Влияние отходов химического производства на видовое разнообразие лишайников, споровых растений и некоторых групп беспозвоночных.....	16
Цуриков А.Г., Храмченкова О.М., Цуканова Е.В. Лихенологический отдел гербария GSU. I. Род <i>Cladonia</i> Hill ex P. Browne.....	22
Шевцова Л.В., Богинская Л.А. Морфофизиологическая реакция <i>Aesculus hippocastanum</i> L. на условия урбанизированной среды.....	34
Гончаренко Г.Г., Потапов Д.В. Определительные таблицы семейств и видов аборигенных рыб и рыбообразных водоемов Беларуси.....	39
Ковалева О.В., Рассашко И.Ф. Оценка качества воды и экологическое состояние некоторых малых рек Беларуси.....	48
Багинский В.Ф., Зеленский В.В., Лапицкая О.В. Лесные таксы: история и современное состояние.....	54
Лазарева М.С. Прогноз трансформации площадей сосновых насаждений различных типов леса юго-восточной части Белорусского Полесья в связи с изменением климата.....	59
Лазарева М.С., Климович Л.К., Митин Н.В., Мальцева Н.В., Колодий Т.А., Климов А.В. Производные мелколиственные насаждения от широколиственных лесов Беларуси.....	65
Падутов А.Е. Кадровый состав охотничьего хозяйства Беларуси.....	73
Падутов А.Е., Козятинская М.В., Мальцева Н.В., Емельяненко Т.В. Санитарное состояние древесных насаждений г. Гомеля.....	77
Трухоневец В.В., Кожедуб Т.И., Переволоцкая Т.В. Макромицеты сосновых лесов Юго-Восточной Беларуси в 2011 г.....	84
Банний В.А., Евтухова Л.А., Игнатенко В.А. Полимерные композитные материалы для защиты биологических объектов от электромагнитных полей и излучений на основе термопластов и биополимеров.....	87
Стельмах В.С., Медведева Г.А., Дроздов Д.Н. Генотоксическое действие ЭМИ диапазона мобильной связи (900 МГц).....	92
Дроздова Н.И., Жученко Ю.М., Макаренко Т.В., Свириденко В.Г. Содержание и закономерности накопления меди, цинка, кадмия и свинца в почвах промышленной зоны г. Гомеля.....	97
Жученко Ю.М., Евтухов П.П. Первичный анализ эмпирических распределений.....	104
Макаренко Т.В., Пролесковский Ю.А., Зыкова Е.Л., Пырх О.В. Изучение состава поверхностных вод р. Сож в районе г. Гомеля.....	111
Хаданович А.В., Свириденко В.Г., Дроздова Н.И. Использование вольтамперометрического метода в анализе биологических объектов.....	117
Шумилин В.А., Собченко В.А. Сорбционные свойства препаратов бинарных ферроцианидов железа и цинка на угольной матрице.....	122

Экология

Тюлькова Е.Г., Никифоров М.Е. Характер и закономерности накопления свинца в тканях и органах птиц и выведение его из организма в условиях эксперимента.....	127
---	-----

ГЕОГРАФИЯ

Шершнева О.В., Ясоев М.Г., Флерко Т.Г., Гайдаш Е.А. Развитие научных исследований в области рекреационной деятельности в Беларуси.....	135
--	-----

МАТЕМАТИКА

Бородич Е.Н., Бородич Р.В., Селькин В.М. О максимальных подгруппах, близких к $\mathfrak{S}$ -абнормальным.....	140
---	-----

Васильев А.Ф., Тютянов В.Н. Знакопеременные группы с наследственно G-перестановочной подгруппой	148
Гаврилюк А.В., Гаврилюк А.А. О возможности изучения производной на основе почти аксиоматического подхода	151
Кузьменков Д.С. Оптимальное управление тепловым процессом в стержне с использованием состояния задачи	157
Старовойтов А.П. Асимптотика эрмитовой аппроксимации экспонент	163
Тыщенко В.Ю. О топологической сопряженности вещественных неабелевых линейных действий на плоскости	172

ИНФОРМАТИКА

Ратобыльская Д.В. Методика применения программы вероятностно-алгебраического моделирования при исследовании параметров надежности технических систем с сетевой структурой	176
Прокопенко Д.В. Численный анализ изменения несущей способности грунтового основания цилиндрической сваи	182
Сукач Е.И., Галушко В.Н., Большакова Г.И. Метод имитационного моделирования транспортных систем сообщения с регламентированным расписанием движения транспорта	188
Сукач Е.И., Ратобыльская Д.В., Жердецкий Ю.В., Мальцева Г.А. Способ формализации объектов графовой структуры с вероятностными параметрами функционирования	195

Contents

BIOLOGY

Yu.M. Bachura, O.M. Hramchenkova. <i>Copper ion influence on morphological indicators Chlorococcum hypnosporum</i> Starr. in culture.....	3
N.M. Daineko, L.M. Sapegin, S.F. Timofeev. <i>The dynamics of grassland agroecosystem productivity on floodplain areas</i>	10
V.A. Sobchenko, O.M. Hramchenkova, A.G. Tsurikov, Yu.M. Bachura, V.N. Veremeev, N.G. Galinovsky, S.V. Zhadko. <i>The influence of the stockpiles of chemical production on species diversity of lichens, cryptogamic plants and some groups of invertebrates</i>	16
A.G. Tsurikov, O.M. Hramchenkova, E.V. Tsukanova. <i>GSU lichenological herbarium. I. Cladonia Hill ex P. Browne</i>	22
L.V. Shevtsova, L.A. Boginskaya. <i>Morphophysiological reaction of Aesculus hippocastanum L. to urban environmental conditions</i>	34
G.G. Goncharenko, D.V. Potapov. <i>Defining tables of families and species of aboriginal fishes and jawless fishes in reservoirs of Belarus</i>	39
O.V. Kovaleva, I.F. Rassashko. <i>Assessment of water quality and ecological status of some small rivers in Belarus</i>	48
V.F. Baginsky, V.V. Zelensky, O.V. Lapitskaya. <i>Statutory stumpage prices: history and current state</i>	54
M.S. Lazareva. <i>Projections of dynamics of the area covered by pineries of different forest types in southeastern Belarussian Polesye</i>	59
M.S. Lazareva, L.K. Klimovich, N.V. Mitin, N.V. Maltseva, T.A. Kolody, A.V. Klimov. <i>Derived small-leaved plantations derived from broad-leaved forests in Belarus</i>	65
A.E. Padutov. <i>Staff specialists in hunting organizations of Belarus</i>	73
A.E. Padutov, M.V. Kozyatinskaya, N.V. Maltseva, T.V. Emelyanenko. <i>Sanitary condition of woody plantations of Gomel</i>	77
V.V. Truhonovets, T.I. Kozhedub, T.V. Perevolotskaya. <i>Pine forest macromycetes of South-Eastern Belarus in 2011</i>	84
V.A. Banny, L.A. Evtuhova, V.A. Ignatenko. <i>Polymer composite materials for protection of biological objects against radiation and electromagnetic fields based on thermoplastics and biopolymers</i>	87
V.S. Stelmah, G.A. Medvedeva, D.N. Drozdov. <i>Genotoxic action of EMR of mobile connection (900 MHz)</i>	92
N.I. Drozdova, Yu.M. Zhuchenko, T.V. Makarenko, V.G. Sviridenko. <i>Contents and regularities of accumulation of copper, zinc, cadmium and lead in soils of industrial zone of Gomel city</i>	97
Yu.M. Zhuchenko, P.P. Evtuhov. <i>Primary analysis of empirical distributions</i>	104
T.V. Makarenko, Yu.A. Proleskovsky, E.L. Zykova, O.V. Pyrh. <i>The study of the Sozh surface waters near Gomel</i>	111
A.V. Hadanovich, V.G. Sviridenko, N.I. Drozdova. <i>Usage of voltamperometric method in the analysis of biological objects</i>	117
V.A. Shumilin, V.A. Sobchenko. <i>Sorption properties of binary iron-zinc ferrocyanides on carbon activated matrix</i>	122

ECOLOGY

E.G. Tyulkova, M.E. Nikiforov. <i>Character and laws of lead accumulation in birds fabrics and bodies and its deducing from an organism in experiment conditions</i>	127
--	-----

GEOGRAPHY

O.V. Shershnev, M.G. Yasoveev, T.G. Flerko, E.A. Gaidash. <i>Development of scientific research in the field of recreation in Belarus</i>	135
---	-----

MATHEMATICS

E.N. Borodich, R.V. Borodich, M.V. Selkin. <i>About the maximal subgroups close to $\mathfrak{S}$-abnormal ones</i>	140
--	-----

A.F. Vasilyev, V.N. Tyutyanov. <i>Alternating groups with inherited G-permutation subgroup....</i>	148
A.V. Gavrilyuk, A.A. Gavrilyuk. <i>Possibility to study derivatives with the help of almost axiomatic approach</i>	151
D.S. Kuzmenkov. <i>Optimal control of a thermal process in the rod using a problem state</i>	157
A.P. Starovoitov. <i>Asymptotics of Hermitian approximation of exponents</i>	163
V.Yu. Tyshchenko. <i>About a topological conjunction of real non-Abelian linear operations on a plane.....</i>	172

INFORMATICS

D.V. Ratobylskaya. <i>Methodology of application of the probability-algebraic simulation programs in the study of parameters of reliability of complex systems with network structure</i>	176
D.V. Prokopenko. <i>The numerical analysis of bearing ability change of the cylindrical pile soil base</i>	182
E.I. Sukach, V.N. Galushko, G.I. Bolshakova. <i>The method of simulation of transport systems with formally regulated timetables</i>	188
E.I. Sukach, D.V. Ratobylskaya, Yu.V. Zherdetsky, G.A. Maltseva. <i>The way of formalizing the graph structure objects with probabilistic parameters of functioning.....</i>	195

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Статья представляется в редакцию в двух экземплярах на белорусском, русском или английском языках и является оригиналом для печати. Объем статьи, как правило, не должен превышать 10 страниц, и ее разметка не требуется. Статья должна иметь разрешение соответствующего научного учреждения на опубликование. Статья должна иметь индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК), к ней следует приложить краткое резюме и ключевые слова (на русском и английском языках), название статьи, фамилии и инициалы авторов на английском языке. Ее необходимо подписать всем авторам, указать полное название учреждения, где выполнена работа, а также почтовый адрес, номер телефона (служебный и домашний). Плата за опубликование статей не взимается.

Авторы представляют на дискете (либо по электронной почте e-mail: vesti@gsu.by) tex-файл со статьей, подготовленной в LaTeX'e с опцией 12pt в стандартном стиле article (`\textwidth 165 mm`, `\textheight 245 mm`). Аналогичны требования для статей, набранных в редакторе MS Word. При наборе формул в редакторе MS Word необходимо использовать Microsoft Equation. Для набора формул не должны использоваться пакеты сторонних разработчиков (MathType и др.). Занумерованные формулы выключаются в отдельную строку, номер формулы ставится у правого края страницы. Нумеровать следует лишь те формулы, на которые имеются ссылки.

Статьи, претендующие на научный приоритет, оформляются в виде кратких сообщений объемом до 2 страниц текста и, как правило, публикуются в ближайших номерах журнала.

Ссылки в тексте обозначаются порядковым номером в квадратных скобках. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Поступившие в редакцию статьи направляются на рецензию специалистам. Основным критерием целесообразности публикации является новизна и информативность статьи. Авторы не должны направлять статьи, которые уже опубликованы либо приняты к печати в других изданиях. Если по рекомендации рецензента статья возвращается автору на доработку, то переработанная рукопись вновь рассматривается редколлегией, и датой поступления считается день получения редакцией окончательного ее варианта. Лицам, осуществляющим послевузовское обучение, предоставляется право первоочередного опубликования статей.

Технический редактор: *И.В. Близнец*. Корректоры: *Е.В. Убоженко*, *И.А. Хорсун*

Подписано в печать 04.10.2012. Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 24,1. Уч.-изд. л. 21,0. Тираж 100 экз. Заказ № 580

Цена свободная

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»
ЛИ № 02330/0549481 от 14.05.2009.
Ул. Советская, 104, 246019, г. Гомель.