ISSN 2077-3366

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
RUSSIAN FEDERATION

FEDERAL STATE EDUCATIONAL INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION
«DONETSK STATE UNIVERSITY»

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ И ОХРАНЫ ПРИРОДЫ ТЕХНОГЕННОГО РЕГИОНА

Научно-практический журнал

№ 4

Основан в 1999 г.

PROBLEMS OF ECOLOGY AND NATURE PROTECTION OF TECHNOGENIC REGION

Scientific and practical journal

No 4

Founded in 1999

2024

Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. 2024. № 4

В журнале «Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона» публикуются статьи преподавателей, научных сотрудников и аспирантов вузов и научно-исследовательских организаций, которые охватывают широкий круг вопросов экологической, а также флористической, фаунистической, биофизической и физиологической направленности, которые касаются проблем экологии и охраны природы.

Предназначен для специалистов в области экологии, ботаники, зоологии, физиологии растений, человека и животных, биофизики, охраны природы, а также для преподавателей и студентов биологических, экологических факультетов и кафедр высших учебных заведений.

Редакционная коллегия

Беспалова С. В., проф., д-р физ.-мат. наук (***главный редактор***)	ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
Горецкий О. С., проф., д-р биол. наук (***зам. главного редактора***)	ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
Акатов В. В., проф., д-р биол. наук	ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет»
Алемасова А. С., проф., д-р хим. наук	ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
Вардуни Т. В., доц., д-р пед. наук	ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Ботанический сад ЮФУ, Академия биологии и биотехнологии им. Д. И. Ивановского
Глухов А. З., проф., д-р биол. наук	ФГБНУ «Донецкий ботанический сад»
Горбов С. Н., доц., д-р биол. наук	ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Академия биологии и биотехнологии им. Д. И. Ивановского
Демченко С. И., доц., канд. биол. наук	ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
Денисова Т. В., доц., д-р биол. наук	ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Академия биологии и биотехнологии им. Д. И. Ивановского
Казеев К. Ш., проф., д-р геогр. наук	ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Академия биологии и биотехнологии им. Д. И. Ивановского
Калаев В. Н., проф., д-р биол. наук	ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»
Клименко О. Е., с.н.с., д-р биол. наук	ФГБУН «Ордена Трудового Красного Знамени Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН»
Колесников С. И., проф., д-р с.-х. наук	ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Академия биологии и биотехнологии им. Д. И. Ивановского
Остапко В. М., проф., д-р биол. наук	ФГБНУ «Донецкий ботанический сад»
Прокопенко Е. В., доц., канд. биол. наук	ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
Сафонов А. И., доц., канд. биол. наук	ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
Сергеев М. Е., канд. биол. наук	ФНЦ Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН
Соболев В. И., проф., д-р биол. наук	ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», Гуманитарно-педагогическая академия
Труш В. В., доц., д-р биол. наук	ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
Чемерис О. В., канд. биол. наук (***отв. секретарь***)	ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
Пирко И. Ф., канд. биол. наук (***отв. секретарь***)	ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (**Перечень ВАК РФ** с 09.04.2024 г.) по следующим научным специальностям:

1.5.9. Ботаника (биологические науки); 1.5.15. Экология (биологические науки).

Журнал включен в Перечень РИНЦ (лицензионный договор № 378-06/2016 от 24.06.2016 г.).

Свидетельство о регистрации СМИ, выданное Министерством информации ДНР:
Серия ААА № 000073 от 21.11.2016 г.

Адрес редакции: Россия, 283050, ДНР, г. Донецк, ул. Щорса, 46, к. 202,
Донецкий государственный университет, биологический факультет
Тел.: +7 (856) 302-09-93
Сайт журнала: http://donnu.ru/ecolog E-mail: dongu_eco@mail.ru

Печатается по решению Ученого совета ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет» протокол № 13 от 03.12.2024 г.

© ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», 2024

Problems of ecology and nature protection of technogenic region. 2024. No 4

Papers of academic staff, scientific employees and post-graduate students of high schools and research organizations cover a wide range of questions of ecological, floristic, faunistic, biophysical and physiological orientation and touches problems of ecology and nature protection.

It is intended for ecologists, botanists, zoologists, plants physiologists, man and animals physiologists, biophysics, experts in nature protection and for teachers and students of biological and ecological faculties of higher educational institutions.

Editorial Board

Bespalova S. V. (Editor-in-Chief)	Donetsk State University
Goretsky O. S. (Associate Editor)	Donetsk State University
Akatov V. V.	Maikop State Technological University
Alemasova A. S.	Donetsk State University
Varduni T. V.	Academy of Biology and Biotechnology Botanical Garden of Southern Federal University
Glukhov A. Z.	Donetsk Botanical Garden
Gorbov S. N.	Academy of Biology and Biotechnology Southern Federal University
Demchenko S. I.	Donetsk State University
Denisova T. V.	Academy of Biology and Biotechnology Southern Federal University
Kazeev K. Sh.	Academy of Biology and Biotechnology Southern Federal University
Kalaev V. N.	Voronezh State University
Klimenko O. E.	Nikitsky Botanical Garden
Kolesnikov S. I.	Academy of Biology and Biotechnology Southern Federal University
Ostapko V. M.	Donetsk Botanical Garden
Prokopenko E. V.	Donetsk State University
Safonov A. I.	Donetsk State University
Sergeev M. E.	Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity
Sobolev V. I.	Humanities and Education Science Academy Crimean Federal University
Trush V. V.	Donetsk State University
Chemeris O.V. (Managing editor)	Donetsk State University
Pirko I. F. (Managing editor)	Donetsk State University

Journal is included in the List of Russian scientific citation index (license agreement No 378-06/2016 dated 24.06.2016).

The journal is included in the List of peer-reviewed scientific publications in which the main scientific results of dissertations for the scientific degree of Candidate of Sciences, for the scientific degree of Doctor of Sciences should be published (List of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation from April 9, 2024) in the following scientific specialties: 1.5.9. Botany (biological sciences); 1.5.15. Ecology (biological sciences).

Certificate of registration of the media, issued by the Ministry of Information DPR: Series AAA No 000073 of 21.11.2016.

Address of editorial board: Faculty of Biology, Donetsk State University,
Schorsa str., 46, room 202, Donetsk, DPR, 283050, Russia.
Tel.: +7 (856) 302-09-93
Web-site of journal: http://donnu.ru/ecolog E-mail: dongu_eco@mail.ru

Printed by decision of Donetsk State University Scientific Council
protocol No 13 dated 03.12.2024

© Donetsk State University, 2024

С О Д Е Р Ж А Н И Е

ФЛОРА, ЭКОЛОГИЯ И ОХРАНА РАСТИТЕЛЬНОГО МИРА

Демьяненко Т. В., Джерелей Д. А. Видовой состав древесных растений в городских насаждениях города Макеевки **6**

Загуменный Р. А., Николаева А. В., Панченко М. М. Динамика морфометрических показателей листьев сеянцев *Psidium guajava* L. при различном уровне освещенности в оранжерейном комплексе Донецкого ботанического сада **16**

Калинина А. В. Индикационная фенотипическая пластичность *Plantago major L.* в условиях антропогенной трансформации Донбасса **25**

Калинина Ю. С. Анализ ассортимента цветочного оформления «Сквера Славы» Центрально-Городского района г. Макеевки **33**

Ковалева Т. А., Зазнобина Н. И. Оценка эффективности очистки атмосферного воздуха зелеными насаждениями с целью снижения негативного воздействия выбросов производственных объектов **39**

Стрельников И. И. Разработка программной основы построения моделей природного распространения видов для оценки пределов экологической валентности интродуцентов по отношению к основным климатическим факторам **48**

ФАУНА, ЭКОЛОГИЯ И ОХРАНА ЖИВОТНОГО МИРА

Головко Л. С., Шевченко В. Н., Мальцева Т. А. Обзор современных подходов к определению сальмонелл в водных экосистемах как элемент обеспечения экологической безопасности **54**

ФИЗИОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ, МИКОЛОГИЯ

Демченко С. И. Оптимизация условий глубинного культивирования штамма *Phlebiopsis gigantea* P-1-96 ..... **70**

Чемерис О. В. Ферментативный гидролиз отходов переработки початков кукурузы целлюлазами штамма *Irpex lacteus* (Fr.) Fr. 2434 ..... **77**

Правила для авторов **82**

C O N T E N T S

FLORA, ECOLOGY AND PROTECTION OF THE PLANT KINGDOM

Demyanenko T. V., Jerelei D. A. Species composition of woody plants in urban plantations of the city of Makeyevka **6**

Zagumenny R. A., Nikolaeva A. V., Panchenko M. M. Dynamics of morphometric parameters of leaves of seedlings of *Psidium guajava* L. at different levels of illumination in the greenhouse complex of the Donetsk botanical garden **16**

Kalinina A. V. Indicative phenotypic plasticity of *Plantago major* L. in conditions of anthropogenic transformation of Donbass **25**

Kalinina Yu. S. Analysis of the assortment of floral decoration of the Glory Square of the Central Urban district of Makeyevka **33**

Kovaleva T. A., Zaznobina N. I. Assessment of the effectiveness of atmospheric air purification by green spaces in order to reduce the negative impact of emissions from production facilities **39**

Strelnikov I. I. Development of a software framework for constructing species distribution models to assess the limits of the ecological valence of introduced species in relation to the main climatic factors **48**

FAUNA, ECOLOGY AND PROTECTION OF THE ANIMAL KINGDOM

Golovko L. S., Shevchenko V. N., Maltseva T. A. Review of modern approaches to determining *Salmonella* in aquatic ecosystems as an element of environmental safety **54**

PHYSIOLOGY AND ECOLOGY OF THE PLANT, MYCOLOGY

Demchenko S .I. The optimization of conditions for deep cultivation of *Phlebiopsis gigantea* P-1-96 ..... **70**

Chemeris O. V. Enzymatic hydrolysis of corn cob processing waste by cellulases of the strain *Irpex lacteus* (Fr.) Fr. 2434 ..... **77**

Rules for authors **82**

ФЛОРА, ЭКОЛОГИЯ И ОХРАНА РАСТИТЕЛЬНОГО МИРА
FLORA, ECOLOGY AND PROTECTION OF THE PLANT KINGDOM

УДК 581.5: 502.2 (58) DOI: 10.5281/zenodo.14541697 EDN: ZFKQOV

© **Т. В. Демьяненко[1], Д. А. Джерелей[2]**

ВИДОВОЙ СОСТАВ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ В ГОРОДСКИХ НАСАЖДЕНИЯХ ГОРОДА МАКЕЕВКИ

[1]ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
Россия, 283050, ДНР, г. Донецк, ул. Щорса, 46
[2]ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»
Россия, 286123, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2

Демьяненко Т. В., Джерелей Д. А. **Видовой состав древесных растений в городских насаждениях города Макеевки**. – В статье приведены результаты изучения видового состава дендрофлоры города Макеевки. Проведен таксономический анализ, определены зимостойкость, засухоустойчивость, степень требовательности к питательности почвы и к уровню освещенности. Таксономический анализ показал, что наибольшее видовое разнообразие представлено в семействе Розовые. В результате исследования зимостойкости установили, что наибольший процент составляют виды, которые совершенно не подмерзают, либо подмерзают только отдельные кончики побегов или концы однолетних побегов, большинство растений в этой группе составляют виды местной флоры. Наибольшим количеством видов в исследованных насаждениях представлены засухоустойчивые и светолюбивые растения. По отношению к питательности почвы приблизительно одинаковое количество составляют не требовательные виды (48 %) и требовательные (42 %). В результате изучения наступления фенологических фаз, вегетативного периода развития деревьев, установлено наибольшее соответствие сроков наступления фаз экологическим условиям района исследований у растений местной флоры, и растений северо-американского, либо японо-китайского происхождения. Таким образом, выделена основа ассортимента древесных растений и рекомендуется увеличить ассортимент за счет введения высокодекоративных растений.

Ключевые слова: городские насаждения, древесные растения, морозоустойчивость, засухоустойчивость, сезонный ритм развития.

Введение. Озеленение населенных пунктов – один из главных факторов их благоустройства. Зеленые насаждения имеют большое санитарно-гигиеническое и оздоровительное значение. Успех зеленого строительства в значительной мере зависит от богатства ассортимента древесно-кустарниковых пород. Например, они принимают на себя всю силу ветра и резко уменьшают скорость его движения. В жаркое летнее время снижают температуру воздуха и, благодаря, значительному испарению влаги растениями, повышают влажность воздуха, также уменьшают колебания воздуха, защищают человека от шума, создаваемого на улицах и площадях движущимся транспортом. Зеленые насаждения являются частью городской экосистемы и ее состояние непосредственным образом взаимосвязано с условиями жизни людей. Поэтому разрушение биотического окружения человека, наносит ему невосполнимый ущерб. В озеленении городских насаждений используют в основном растения, имеющие хорошую, пылеулавливающую и фильтрующую способности. Растения являются активными поглотителями атмосферных загрязнителей и примесей, перенос которых, из воздуха на поверхность растительности осуществляется благодаря комплексу биологических, химических и физических процессов. Способность растений усваивать из атмосферы, загрязняющие ее вещества, особенно важна в связи с санитарно-гигиенической функцией древесных растений. Большое значение при этом имеет поверхность растений, которая обеспечивает их взаимодействие с атмосферой. После поступления пыли в воздушный бассейн города не могут быть осуществлены никакие

© **Демьяненко Т. В., Джерелей Д. А., 2024**

технические мероприятия кроме средств озеленения. Таким образом, создаваемые зеленые насаждения должны быть достаточно биологически устойчивыми применительно к местным условиям и полностью отвечать предъявленным к ним архитектурно-декоративным требованиям, а также быстро вступать в эксплуатацию. Поэтому изучение их видового состава и формового разнообразия, изучение их биологии, опыта интродукции имеет большое значение.

Цель проведенной работы – изучить видовой состав и проанализировать биологические особенности древесных растений в городских насаждения города Макеевки.

Материал и методы исследования

Исследования проводили в течение 2020–2021 гг. В указанный период изучали дендрофлору зеленых насаждений вблизи главного корпуса (рис. 1), третьего и пятого учебных корпусов ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» (ДонНАСА); вблизи остановки «Западная» и автозаправочной станции на Донецком шоссе; на перекрестке Донецкого шоссе и ул. Антропова.

В работе провели таксономический анализ древесных насаждений, определили следующие характеристики: требовательность к питательности почвы и к уровню освещенности, засухоустойчивость и зимостойкость. Полученные результаты обработали методами начальной статистической обработки [3, 4, 6].

Рис. 1. Одна из точек проведения исследования, главный корпус ДонНАСА (источник фото: dan-news.ru)

По требовательности к плодородию почвы декоративные древесные породы разделили на три группы: *требовательные* – хорошо развивающиеся лишь на богатых гумусом и минеральными веществами супесях, суглинках и черноземах; *среднетребовательные* – произрастающие на сравнительно небогатых супесчаных и подзолистых почвах; нетребовательные – те, которые могут расти на бедных почвах [8].

По засухоустойчивости, выделили следующие группы древесных растений: *незасухоустойчивые*, т. е. растения у которых под влиянием засухи подавляется рост, засыхают листья и побеги; растения *недостаточно засухоустойчивые*, у которых либо рост слабый, и наблюдаются ожоги листьев, либо растения удовлетворительно развиваются в обычные годы, в засушливые – изменяется ритм роста, у них частично повреждаются листья; *засухоустойчивые* – растения без повреждений, но возможно преждевременное сбрасывание части листьев; растения *высоко засухоустойчивые*, которые успешно развиваются без полива, в том числе на очень сухих и прогреваемых почвах.

Зимостойкость изучали по степени повреждения растений при перезимовке. Определение проводили в мае – июне по 8-бальной шкале [9]:

0 – совершенно не подмерзают или подмерзают только отдельные кончики побегов (прихвачены листья у вечнозеленых видов) на отдельных ветках или отдельных экземплярах;

1 – подмерзли концы однолетних (прошлогодних) побегов, а также листьев (у вечнозеленых);

2 – вымерз однолетний прирост нацело, на всю длину или на большую часть побега;

3 – вымерз двулетний прирост нацело или большая его часть;

4 – вымерз прирост последних трех лет и захвачены значительными повреждениями многолетние части кроны;

5 – отмерз ствол и ветви до уровня снегового покрова (при отсутствии снегового покрова часть ствола и ветви отмерзли до штамба);

6 – растение отмерзло до корневой шейки, но дает поросль;

7 – растение погибло от морозов полностью.

Сезонный ритм развития изучали по наступлению фаз развития растений [1, 2, 5, 11]. При проведении фенологических наблюдений учитывали следующие основные фазы вегетативного развития древесных растений: набухание, распускание почек, облиствение, листопад. Начало фенофазы устанавливали по визуально-наблюдаемым морфологическим изменениям, которые проявились хотя бы на отдельных ветках или побегах модельных деревьев. Фенофазу считали массовой, если в нее вступило не менее половины вегетативных органов всех модельных экземпляров. Конец фенофазы устанавливали по дате, когда морфологические признаки фазы проявлялись полностью на всех модельных деревьях. Так, фазу набухания почек отмечали по увеличению объема почек или раздвиганию почечных чешуй. В последнем случае заметны узенькие полоски в местах раздвигания чешуй. Фазу распускания почек отмечали, когда покровные чешуи разошлись одна от другой. Если почки с одной чешуей, по ее верхушке – выдвигаются кончики зеленых листочков. Скрытые почки выдвигаются наружу, у них видны зачатки листьев. Фазу облиствения делили на три подфазы: *появление листьев* – листья обособились из почки, но их пластинки плоские; *распускание листьев* – листья приняли присущую им форму, но не достигли нормального размера; полное *облиствение* – листья достигли нормального размера. Фаза листопада у листопадных древесных растений, внетропических зон земного шара начинается с проявления осеннего расцвечивания листьев, поэтому часто эту фазу делят на две подфазы осенней окраски и листопада. Подфазу *осенней окраски*, а именно ее начало отмечали, уже при появлении первых изменений в окраске листьев. У растений, листья которых остаются зелеными до заморозков, начало этой подфазы отмечали с момента пожелтения их от действия заморозков. Массовое проявление этой подфазы отмечали, когда большая половина листьев принимала характерную осеннюю окраску. Подфазу *листопада* отмечали, как массовую, когда почти все листья приняли осеннюю окраску, наблюдается заметное осыпание листьев, даже при наличии небольшого ветра, конец – листья осыпались, остались одиночные, которые тоже опадают.

Разные виды растений неодинаково требовательны к количеству света. По этому признаку различают три экологических типа: *светолюбивые* – нуждаются в большом количестве света и не выносят затенения; *теневыносливые* – лучше всего развиваются при достаточном освещении, но могут без большого ущерба выносить ту или иную степень затенения; *тенелюбивые* растения – всегда довольствуются небольшим количеством света и не выносят слишком сильного освещения.

Результаты и обсуждение

При изучении окружающей среды с помощью биологических систем и их реакций, одним из основополагающих аспектов является выяснение видового состава древесно-кустарниковых растений в городских насаждениях. За последние годы красиво озеленены новые парки, скверы и центральные улицы. Благодаря чему, почти на треть обновился ассортимент растений используемых в городских насаждениях, и в основном декоративными видами. Несколько иная картина с озеленением улиц и приусадебных участков, здесь

озеленение часто проводят беспланово, используя случайный ассортимент пород, в результате чего встречаются деревья разного возраста и состава, иногда можно встретить плодовые культуры. Это сильно снижает архитектурно-декоративное значение зеленых насаждений. В представленной работе изучен видовой состав древесных растений и проанализированы их биологические особенности в модельных пунктах, указанных выше. Наблюдения проводили в 2020–2021 гг., всего отметили 50 видов деревьев. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Видовой состав древесных растений в городских насаждениях города Макеевки

Вид	Требования к почве	Засухоустойчивость	Отношение к свету	Зимостойкость
1	2	3	4	5
Семейство Fabaceae Lindl. – Бобовые				
1. *Robinia pseudoacacia* L. – робиния лжеакация	нтр.	+	свл.	1; 2; 3
2. *Gleditsia triacanthos* L. – гледичия обыкновенная	нтр.	+	свл.	0; 1
Семейство Rosaceae Juss. – Розовые				
1. *Armeniaca vulgaris* Lam. – абрикос обыкновенный	нтр.	+	свл.	0
2. *Cydonia oblonga* Mill. (*C. vulgaris* Pers.) – айва обыкновенная	нтр.	+	свл.	3; 4
3. *Pyrus communis* L. – груша обыкновенная	нтр.	+	тв.	0; 1
4. *Sorbus aucuparia* L. – рябина обыкновенная	нтр.	+	тв.	0
5. *Prunus divaricata* Ledeb. – слива растопыренная, алыча	тр.	+	свл.	0
6. *Padus virginiana* (L.) Roem. – черемуха виргинская	нтр.	+	тв.	0; 1
7. *Padus serotina* (Ehrh.) Ag. – черемуха поздняя	нтр.	±	свл.	0
8. *Padus avium* Mill. – черемуха обыкновенная	нтр.	+	тв.	0; 1
9. *Malus sylvestris* Mill. – яблоня лесная	тр.	+	тв.	0; 1
10. *Malus baccata* (L.) Borkh. – яблоня ягодная	нтр.	±	тв.	0; 3
11. *Malus niedzwetzkyana* Dieck ex Koehne – яблоня Недзвецкого	тр.	+	свл.	0
Семейство Simaroubaceae DC. – Симарубовые				
1. *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle – айлант высочайший	нтр.	+	свл.	1; 6
Семейство Fagaceae Dumort. – Буковые				
1. *Quercus robur* L. – дуб черешчатый	тр.	±	свл.	1
Семейство Salicaceae Mirb. – Ивовые				
1. *Salix alba* L. – ива белая	тр.	±	свл.	0
2. *Salix pentandra* L. – ива пятитычинковая	нтр.	+	свл.	0; 1
3. *Salix matsudana* Koidz. – ива Матсуды	нтр.	+	свл.	1
4. *Populus balsamifera* L. – тополь бальзамический	тр.	+	свл.	0; 1
5. *Populus bolleana* Lauche – тополь Болле	тр.	–	свл.	0; 1
6. *Populus × canadensis* Moench – тополь канадский	тр.	+	свл.	0
7. *Populus simonii* Carriere – тополь Симона (=тополь китайский)	тр.	–	свл.	0; 2
8. *Populus pyramidalis* Roz. – тополь пирамидальный	тр.	+	свл.	0
9. *Populus nigra* L. – тополь черный	нтр.	+	свл.	1

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5
Семейство Bignoniaceae – Бигнониевые				
1. *Catalpa bignonioides* Walt. – катальпа бигнониевидная	тр.	+	свл.	1; 2
Семейство Aceraceae Juss. (Sapindaceae Juss. s.l.) – Кленовые				
1. *Acer platanoides* L. – клен остролистный	тр.	–	тв.	1; 2
2. *Acer campestre* L. – к. полевой	нтр.	–	тл.	0
3. *Acer saccharinum* L. – к. серебристый (=к. сахарный)	тр.	+	тв.	0
4. *Acer pseudoplatanus* L. – к. ложноплатановый, явор	тр.	+	тв.	0; 1
5. *Acer negundo* L. – к. ясенелистный	ср. тр.	–	свл.	0; 1
Семейство Hippocastanaceae A. Rich. (Sapindaceae Juss. s.l.) – Конскокаштановые				
1. *Aesculus hippocastanum* L. – конский каштан обыкновенный	тр.	–	тл.	0; 1; 2
Семейство Tiliaceae Juss. (Malvaceae Juss. s.l.) – Липовые				
1. *Tilia cordata* Mill. – липа сердцевидная	тр.	–	тл.	1; 2
2. *Tilia platyphyllos* Scop. – липа широколистная	тр.	–	тл.	0
Семейство Juglandaceae DC. ex Perleb – Ореховые				
1. *Juglans regia* L. – орех грецкий	тр.	–	свл.	2; 3
Семейство Betulaceae Gray – Берёзовые				
1. *Betula pendula* Roth – береза повислая	нтр.	+	свл.	0
2. *Betula pubescens* Ehrh. – б. пушистая	нтр.	–	свл.	1
Семейство Ulmaceae Mirb. – Вязовые				
1. *Ulmus glabra* Huds. – вяз голый	ср. тр.	+	тв.	2; 3
2. *Ulmus laevis* Pall. – вяз гладкий	нтр.	+	свл.	0
3. *Ulmus pumila* L. – вяз перистоветвистый	нтр.	+	свл.	3
Семейство Moraceae Link. – Тутовые				
1. *Morus alba* L. – шелковица белая	нтр.	±	свл.	1; 2; 5
Семейство Oleaceae Hoffmanns & Link – Маслиновые				
1. *Fraxinus viridis* Michx. – ясень зеленый	тр.	+	свл.	2; 3
2. *Fraxinus excelsior* L. – ясень обыкновенный	тр.	+	свл.	0; 1
Семейство Pinaceae Spreng. ex F. Rudolphi – Сосновые				
1. *Pinus pallasiana* D.Don – сосна Палласа, или сосна крымская	нтр.	++	свл.	0; 1
2. *Pinus sylvestris* L. – с. обыкновенная	нтр.	+	свл.	0
3. *Picea pungens* Engelm. – ель колючая	ср. тр.	+	тл.	0
4. *Picea abies* (L.) Karst.– ель обыкновенная (=ель европейская)	ср. тр.	–	свл.	0
Семейство Cupressaceae Gray – Кипарисовые				
1. *Thuja occidentalis* L. – туя западная	тр.	–	тл.	1; 2
2. *Platycladus orientalis* (L.) Franco – плосковеточник восточный	ср. тр.	+	свл.	4; 5
3. *Juniperus virginiana* L. – можжевельник виргинский	нтр.	+	тл.	3
4. *Juniperus sabina* L. – м. казацкий	нтр.	+	тв.	1; 2

Примечание: ++ – высокозасухоустойчивое, + – засухоустойчивое, ± – среднезасухоустойчивое, – – незасухоустойчивое; нтр. – нетребовательное, тр. – требовательное, ср. тр. – среднетребовательное; свл. – светолюбивое, тв. – теневыносливое, тл. – тенелюбивое.

Отмеченные виды деревьев позволили установить разнообразие их происхождения, так помимо местных видов растений, выделены виды североамериканского, среднеазиатского и японо-китайского происхождения. Для определения видового разнообразия древесных пород использованных в насаждениях модельных точек, проведен таксономический анализ, результаты которого представлены в табл. 2.

Таблица 2

Таксономический анализ древесных растений в городских насаждениях города Макеевки

Семейство	Количество видов	Процент от общего количества
1. Fabaceae Lindl. – Бобовые	2	4
2. Rosaceae Juss. – Розовые	13	26
3. Simaroubaceae DC. – Симарубовые	1	2
4. Fagaceae Dumort. – Буковые	1	2
5. Salicaceae Mirb. – Ивовые	9	18
6. Bignoniaceae – Бигнониевые	1	2
7. Aceraceae Juss. (Sapindaceae Juss. s.l.) – Кленовые	5	10
8. Hippocastanaceae A. Rich. (Sapindaceae Juss. s.l.) – Конскокаштановые	1	2
9. Tiliaceae Juss. (Malvaceae Juss. s.l.) – Липовые	2	4
10. Juglandaceae DC. ex Perleb – Ореховые	1	2
11. Betulaceae Gray – Берёзовые	2	4
12. Ulmaceae Mirb. – Вязовые	3	6
13. Moraceae Link. – Тутовые	1	2
14. Oleaceae Hoffmanns & Link – Маслиновые	2	4
15. Pinaceae Spreng. ex F. Rudolphi – Сосновые	4	8
16. Cupressaceae Gray – Кипарисовые	4	8

В результате установили, что наибольшим количеством видов представлено семейство Розовых (26 %), несколько меньшим – семейство Ивовых (18 %). Единичными экземплярами представлены семейства Симарубовые, Буковые, Бигнониевые, Конскокаштановые, Ореховые и Тутовые.

В Макеевке, как и в других районах Донбасса в зимний период наблюдаются повреждения, а нередко и гибель ряда деревьев в городских насаждениях. Основная причина этих явлений слабая зимостойкость многих древесных пород. Согласно теоретическим представлениям морозоустойчивость растения, как целого организма, в значительной степени зависит от устойчивости на клеточном уровне. Общеизвестно, что снижение температуры влияет на ферментативные системы и вызывает распад белков на более простые, но стойкие формы. Кроме того, крахмал переходит в сахар, который вместе с другими веществами, типа липоидов, препятствует коагуляции белков протоплазмы. На организменном уровне подобные трансформации имеют ярко выраженный сезонный ритм и приурочены к осеннему периоду.

В осенний период, когда длина дня сокращается, а температура воздуха и почвы падает, начинается спонтанный процесс приспособления растений к перезимовке. В этом процессе выделяют два этапа. Первый этап растения проходят при температуре несколько выше 0 °С, второй – при устойчивых отрицательных температурах –2 °С … –5 °С. У древесных растений процесс закаливания продолжается в течение всей зимы и морозостойкость в самые холодные месяцы (декабрь – февраль) непрерывно возрастает [3, 6]. Это объясняется тем, что у покоящихся растений понижена интенсивность физиолого-биохимических процессов, идет усиленное накопление углеводов и накапливается избыточная энергия. С окончанием глубокого покоя, когда растения переходят в состояние

внутреннего покоя, морозоустойчивость начинает падать и полностью теряется при наступлении фазы весенней вегетации. Степень морозоустойчивости разных растений в период покоя неодинакова. Она зависит от эволюционно сложившейся способности растений переносить морозы в закаленном состоянии или в состоянии глубокого покоя [8]. На территории Донбасса большинство древесных растений проходят органический и глубокий периоды покоя в октябре – начале февраля, а вынужденный – со второй половины февраля – до конца марта. В результате проведенных исследований (табл. 1) установили, что наибольший процент составляют виды, которые совершенно не подмерзают, либо подмерзают только отдельные кончики побегов или концы однолетних побегов. Зимостойкость растений этой группы оценивается в 0 либо 1 балл, причем большую часть этой группы составляют местные виды *Quercus robur* L., *Acer campestre* L., *Tilia cordata* Mill., *Salix alba* L., *Populus nigra* L. Также в эту группу отнесены виды, имеющие североамериканское, средиземноморское и среднеазиатское происхождение, – *Populus bolleana* Lauche, *Fraxinus viridis* Michx. У видов имеющих японо-китайское происхождение наблюдается двоякая противоположная ситуация – либо подмерзание концов однолетних побегов (1 балл), либо отмерзает ствол и ветви до уровня снегового покрова (5 баллов), например, *Morus alba* L., *Platycladus orientalis* (L.) Franco или растение отмерзает до корневой шейки, но дает поросль (6 баллов) – *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle.

В результате установили, что наибольший процент составляют древесные породы либо не требовательные к почве (48 %), например, *Robinia pseudoacacia* L., *Armeniaca vulgaris* Lam. и др., либо – требовательные (42 %), например, *Acer saccharinum* L., *Populus pyramidalis* Roz. и др. Только 10 % составляют древесные породы среднетребовательные к почве – это в основном хвойные растения.

В условиях жаркого и засушливого климата Донбасса многие деревья, в первую очередь интродуцированные, например, *Populus balsamifera* L., *Aesculus hippocastanum* L. и др. подвергаются губительному действию засухи в весенне-летний период. В результате проведенной работы нами выделен только один высокозасухоустойчивый вид – *Pinus pallasiana* D. Don. Засухоустойчивые виды составляют наибольший процент – 64 % (32 вида). К недостаточно засухоустойчивым отнесены – *Morus alba* L., *Salix alba* L., *Quercus robur* L., *Malus baccata* (L.) Borkh. и *Padus serotina* (Ehrh.) Ag. К незасухоустойчивым отнесены 12 видов (24 %), у которых в засуху повреждаются не только листья, но и части кроны (засыхают побеги).

По отношению к уровню освещенности наибольший процент составляют светолюбивые виды (64 %), например, *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle, *Pinus pallasiana* D. Don. и др. Значительно меньше видов со средней требовательностью к свету (22 %), например, *Ulmus glabra* Huds., *Padus avium* Mill., *Malus sylvestris* Mill. и *Malus baccata* (L.) Borkh. и др. Наименьший процент (14 %) составляют теневыносливые породы, например, *Picea pungens* Engelm., *Acer campestre* L. и др. Также установили, что по быстроте роста в городских насаждениях используются в основном быстрорастущие породы (52 %) и несколько меньше – умеренно растущие породы (32 %). Наименьший процент составляют медленно растущие породы (10 %).

Одна из основных линий приспособления растений к условиям сезонного климата – соответствующий ритмический ход жизненных процессов. Наиболее наглядным и общим выражением сезонной ритмики служит смена отдельных фенологических фаз [1, 9]. Сроки начала и продолжительности фенологической фазы у растений не являются строго постоянными календарно, а определяются их биологическими особенностями и погодными условиями, складывающимися в период прохождения фенологических фаз [2]. Нами изучена ритмика развития 21 вида древесных растений (табл. 3), среди которых имеются местные и интродуцированные виды. Местные виды – это деревья (*Acer campestre* L., *Acer platanoides* L., *Quercus robur* L., *Padus avium* Mill.) наиболее приспособленные к местным условиям, так как ареалы этих видов территориально охватывают город Макеевку и их биологические ритмы развития наиболее полно соответствуют экологическим условиям.

Таблица 3

Сроки наступления основных фенологических фаз вегетативного периода развития древесных растений, в зеленых насаждениях города Макеевка

Название растения	Год наблюдения	Начало набухания почек	Раскрывание почек		Появление листьев		Осеннее изменение листьев		Листопад	
			цветочных	листовых	начало	полное	начало	конец	начало	конец
1. *Acer platanoides* L.	2020 2021	24.03 25.03	15.04 19.04	22.04 25.04	25.04 29.04	5.05 10.05	5.08 1.08	30.09 10.09	10.08 3.08	13.10 20.09
2. *Acer campestre* L.	2020 2021	25.03 29.03	15.04 25.04	24.04 20.04	29.04 25.04	15.05 15.05	11.07 21.07	21.09 1.10	15.08 1.09	21.10 20.10
3. *Acer saccharinum* L.	2020 2021	20.03 23.03	8.04 12.04	18.04 27.04	27.04 1.05	18.05 10.05	20.08 15.08	10.10 7.10	30.07 25.07	30.10 25.10
4. *Acer pseudoplatanus* L.	2020 2021	15.04 19.04	10.05 13.05	29.04 3.05	5.05 9.05	12.05 17.05	15.08 20.08	– –	15.08 23.08	27.10 20.10
5. *Acer negundo* L.	2020 2021	24.03 25.03	4.04 7.04	4.04 7.04	22.04 16.04	7.05 4.05	5.06 15.06	30.07 23.07	10.06 15.06	3.08 2.08
6. *Aesculus hippocastanum* L.	2020 2021	30.03 12.04	1.05 7.05	13.04 17.04	25.04 24.04	13.05 10.05	16.05 25.06	29.09 15.09	11.08 10.08	11.10 30.09
7. *Fraxinus excelsior* L.	2020 2021	25.03 25.03	10.04 22.04	17.04 6.05	25.05 9.05	10.05 18.05	13.08 25.08	3.10 29.09	25.09 20.09	30.10 1.10
8. *Juglans regia* L.	2020 2021	28.10 10.04	25.04 6.05	20.04 27.04	25.04 30.04	11.05 15.05	30.08 25.08	12.09 15.09	3.08 1.09	11.09 25.09
9. *Morus alba* L.	2020 2021	10.04 18.04	21.04 4.05	20.04 5.05	27.04 11.05	13.05 19.05	12.08 15.07	20.09 18.09	20.08 20.08	20.10 2.10
10. *Populus* × *canadensis* Moench	2020 2021	20.03 25.03	1.04 5.04	5.04 7.04	19.04 19.04	7.05 10.05	30.08 21.08	– 20.09	3.09 25.08	2.11 20.10
11. *Populus bolleana* Lauche	2020 2021	23.03 23.03	4.04 8.04	13.04 17.04	19.04 20.04	5.05 5.05	1.10 1.10	17.10 17.10	25.09 25.09	10.11 25.10
12. *Populus pyramidalis* Roz.	2020 2021	23.03 23.03	– 8.04	10.04 8.04	22.04 20.04	9.05 5.05	6.10 4.09	– –	10.10 10.09	2.11 25.10
13. *Pyrus communis* L.	2020 2021	10.04 27.04	19.04 4.05	18.04 3.05	24.04 8.05	10.05 17.05	2.08 10.08	15.09 –	20.08 5.09	29.10 25.10
14. *Prunus divaricata* Ledeb.	2020 2021	30.03 10.04	17.04 3.05	10.04 25.04	22.04 1.05	8.05 10.05	– 25.10	– 25.10	15.10 29.09	1.11 25.10
15. *Robinia pseudoacacia* L.	2020 2021	15.04 23.04	10.05 6.05	21.04 1.05	3.05 5.05	15.05 18.05	10.07 10.07	– –	10.07 15.07	10.11 25.10
16. *Salix alba* L.	2020 2021	22.03 25.03	5.04 15.04	2.04 15.05	6.04 20.04	29.04 5.05	– 30.07	– 25.10	30.08 25.09	15.11 25.10
17. *Tilia cordata* Mill.	2020 2021	1.04 13.04	19.05 23.05	24.04 25.04	1.05 1.05	12.05 15.05	20.07 5.09	30.08 17.09	4.08 7.09	1.10 27.09
18. *Gleditsia triacanthos* L.	2020 2021	5.04 21.04	20.04 20.05	5.05 9.05	7.05 16.05	15.05 19.05	5.09 11.08	– –	25.07 29.07	25.10 7.10
19. *Populus nigra* L.	2020 2021	27.03 27.03	7.04 7.04	9.04 9.04	12.04 11.04	24.04 25.04	19.08 20.08	25.09 25.09	25.08 25.08	1.11 25.10
20. *Ulmus laevis* Pall.	2020 2021	3.04 7.04	10.04 10.04	16.04 20.04	24.04 27.04	9.05 10.05	3.08 19.08	10.09 25.09	1.08 29.08	20.10 1.10
21. *Quercus robur* L.	2020 2021	15.04 23.04	28.04 5.05	28.04 5.05	4.05 10.05	12.05 18.05	15.08 20.09	– –	26.07 1.08	12.11 25.10

Основные климатические показатели вегетационных периодов 2020–2021 гг. имели следующие особенности. Устойчивый переход среднесуточной температуры через 0 °С наступил в 2020 году 27 марта, тогда как в 2021 году – 9 апреля, а эффективных температур (выше +5 °С) в 2020 году – 30 марта, 2021 году – 11 апреля. За вегетационный период 2020 года сумма эффективных температур (выше +5 °С) составила 2478,2–2588,1 °С, сумма

активных температур (выше 0 °С) в 2020 году – 3690,7 °С, в 2021 году – 3150,2 °С, эффективных – 2124,1 °С.

Наиболее обеспечены осадками были вегетационные периоды 2020 года, когда с апреля по сентябрь выпало 142,3 мм, а в 2021 году – 282,7 мм.

Фаза набухания почек у местных пород наблюдалась в III декаде марта, когда среднесуточная температура воздуха перешла через 0 °С. Исключение составил *Quercus robur* L., у которого набухание почек началось в 2021 году 23 апреля. У интродуцированных видов (*Aesculus hippocastanum* L.) отклонений в прохождении этой фазы развития не наблюдали. Период между фазой набухания и появления листьев у аборигенных видов составил в среднем 15–19 дней.

Фаза распускания листьев наступила у большинства видов во II–III декаде апреля, когда среднесуточная температура воздуха превысила +15 °С, а фаза облиствения завершилась в III декаде апреля – II декаде мая. Самое раннее завершение фазы облиствения в 2020 году наблюдалось у *Salix alba* L. (29 апреля), у *Populus nigra* L. (24 апреля), а также у *Acer platanoides* L. и *Populus bolleana* Lauche (5 мая), отставшие в развитии виды в фазах набухания почек, появления и распускания листьев, относительно ускорили развитие и завершили фазу облиствения в 2020 году 7–14 мая, кроме *Acer saccharinum* L. (18 мая). Биологические ритмы развития растений интродуцированных из Северной Америки более соответствуют ритмам развития аборигенных растений, чем японо-китайские виды. Так, у *Acer negundo* L. фазы развития календарно близки к местным видам. У *Robinia pseudoacacia* L., *Gleditsia triacanthos* L., набухание и распускание почек запаздывает по сравнению с видами аборигенной флоры на 13–17 дней. В то же время, фазы распускания листьев и завершения облиствения они проходят, примерно в те же сроки, что и местные виды. Названные особенности, указывают на относительную устойчивость растений североамериканских видов в условиях города Макеевки.

Аналогичная картина наблюдается в развитии среднеазиатских видов *Populus bolleana* Lauche и других. Фаза цветения у этих растений опережает облиствение и даже фазу распускания почек. Эта «аномалия» объясняется тем, что зачатки генеративных побегов у ряда растений семейств Rosaceae Juss., Salicaceae Mirb., Betulaceae Gray, Ulmaceae Mirb. и других формируются на облиственных побегах предыдущего года [1].

Для исследованных нами растений, в основном характерен установившийся ритм развития, который следует за изменениями климатического ритма. Такое соответствие особенно четко проявляется в фазе роста побегов, цветения и плодоношения. Показательным в этом отношении является сдвиг фаз развития почти у всех растений в вегетационный период 2021 года, когда активные и эффективные температуры начали нарастать на 10–12 дней позднее, чем в 2020 году. Соответствие ритмов развития климатическим изменениям у североамериканских и среднеазиатских видов говорит об определенной адаптации этих растений к местным экологическим условиям.

Выводы

Наиболее стойкими в специфических экологических условиях Донбасса оказались, помимо местных растений, виды североамериканского и среднеазиатского происхождения, например, клен остролистный, робиния ложноакация, клен серебристый, ель колючая и др., эти виды составляют основу озеленения. Однако необходимо увеличить ассортимент зеленых насаждений за счет введения некоторых высокодекоративных растений, например – катальпа прекрасная, бундук канадский, софора японская, бархат амурский и др., хорошо зарекомендовавших себя в озеленении других городов Донбасса.

Список литературы

1. *Ворошилов В. Н.* Ритм развития у растений. М.: изд-во Акад. Наук СССР, 1960. 136с.

2. *Григорьев А. И.* Сезонный ритм развития растений черемухи виргинской и черемухи кистевой на юге Западной Сибири // Бюл. Гл. ботан. Сада АН СССР. 1986. Вып. 140. С. 20–25.

3. *Гриценко И. Ф.* Морозоустойчивость, засухоустойчивость и сезонное развитие древесных и кустарниковых пород в Донбассе // Лесн. хоз-во. 1953. № 8. С. 41–48.

4. *Зайцев Г. Н.* Математическая статистика в экспериментальной ботанике. М.: Наука, 1984. 424 с.

5. *Зайцев Г. Н.* Фенология травянистых многолетников. М.: Наука, 1978. 148 с.

6. *Козловский Б. Л., Огородников А. Я., Огородникова Т. К., Куропятников М. В., Федоринова О. И.* Цветковые древесные растения Ботанического сада Ростовского университета (экология, биология, география). Ростов-на-Дону: Изд-во «Старые русские», 2000. 144 с.

7. *Лапин П. И., Сиднева С. В.* Определение перспективности интродукции древесных растений по данным визуальных наблюдений // Опыт интродукции древесных растений. М.: 1973. С. 7–67.

8. *Огородников А. Я.* Методика визуальной оценки биоэкологических свойств древесных растений в населенных пунктах степной зоны // Интродукция растений. Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. ун-та, 1993. С. 50–58.

9. *Соколов С. Я.* Современное состояние теории акклиматизации и интродукции растений // Тр. БИН АН СССР, 1957. Сер. 6. Вып. 5. С. 9–32.

10. *Шостаченко Т. Н., Фалькова Г. В.* Методические рекомендации по оценке засухоустойчивости растений, применяемых для скальных садов в субаридных условиях. Ялта, 1974. 20 с.

11. *Янцер О. В., Терентьева Е. Ю.* Общая фенология и методы фенологических исследований: учебное пособие. Екатеринбург: изд-во УрГПУ, 2013. 218 с.

Поступила в редакцию 19.11.2024

Demyanenko T. V., Djereley D. A. **Species composition of woody plants in urban plantations of the city of Makeyevka**. – The article presents the results of studying the species composition of the dendroflora of the city of Makeyevka. A taxonomic analysis was carried out, winter hardiness, drought resistance, the degree of demands on soil nutrition and on the level of illumination were determined. Taxonomic analysis has shown that the greatest species diversity is represented in the Pink family. As a result of the study of winter hardiness, it was found that the largest percentage are species that do not freeze at all, or only individual tips of shoots or ends of annual shoots freeze, most plants in this group are species of local flora. Drought-resistant and light-loving plants are represented by the largest number of species in the studied plantations. In relation to the nutritional value of the soil, approximately the same amount is made up of non-demanding species (48 %) and demanding (42 %). As a result of studying the offensive the phenological phases, the vegetative period of tree development, have been found to be the most consistent with the timing of the phases of the ecological conditions of the research area in plants of local flora, and plants of North American or Japanese-Chinese origin. Thus, the basis of the assortment of woody plants is highlighted and it is recommended to increase the assortment by introducing highly decorative plants.

Key words: urban plantations, woody plants, frost resistance, drought resistance, seasonal rhythm of development.

Демьяненко Татьяна Викторовна
кандидат биологических наук,
доцент кафедры ботаники и экологии
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: *tvdemianenko@mail.ru*
ORCID: 0009-0002-3798-3947
Author ID: 1083668

Demyanenko Tatyana Viktorovna
Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Botany and Ecology, Donetsk State University, Donetsk, DPR, Russian Federation.

Джерелей Дарья Александровна
кандидат архитектуры, доцент,
зав. кафедрой «Ландшафтная архитектура», ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка, ДНР, РФ.
E-mail: *d.a.djereley@donnasa.ru*
ORCID: 0009-0002-3118-1442
Author ID: 1172191

Jerelei Daria Alexandrovna
Candidate of Architecture, Associate Professor,
Head of the Department of Landscape Architecture, Donbass National Academy of Construction and Architecture, Makeyevka, DPR, Russian Federation.

УДК 58.002:58.03 DOI: 10.5281/zenodo.14543604 EDN: OEBPPM

© **Р. А. Загуменный, А. В. Николаева, М. М. Панченко**

ДИНАМИКА МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛИСТЬЕВ СЕЯНЦЕВ *PSIDIUM GUAJAVA* L. ПРИ РАЗЛИЧНОМ УРОВНЕ ОСВЕЩЕННОСТИ В ОРАНЖЕРЕЙНОМ КОМПЛЕКСЕ ДОНЕЦКОГО БОТАНИЧЕСКОГО САДА

ФГБНУ Донецкий ботанический сад
Россия, 283023, ДНР, Донецк, проспект Ильича, 110

Загуменный Р. А., Николаева А. В., Панченко М. М. **Динамика морфометрических показателей листьев сеянцев *Psidium guajava* L. при различном уровне освещенности в оранжерейном комплексе Донецкого ботанического сада.** – Установлено статистически достоверное воздействие уровня интенсивности освещения на показатели «длина листа», «ширина листа», «площадь листа» первых шести пар листьев у сеянцев *Psidium guajava* L. Доказано наличие тенденции к уменьшению данных показателей при увеличении уровня притенения у всех исследуемых пар листьев. Исследована зависимость роста исследуемых пар листьев от возрастающего уровня естественной интенсивности освещения в условиях оранжерейного комплекса Донецкого ботанического сада. Получено уравнение экспоненциальной регрессии: $y = 6{,}816e^{0{,}0003x} * 0{,}05$, статистически достоверно описывающее данный процесс. Выявлена взаимосвязь исследуемого показателя с воздействием внешнего фактора: у сеянцев *P. guajava* L. повышение уровня естественной интенсивности освещения способствует увеличению длины листьев. Отмечена необходимость учета биологических характеристик и экологических требований при исследовании адаптации растений к условиям освещения.

Ключевые слова: Psidium guajava L., интенсивность освещения, уровень притенения, морфометрические параметры листа, дисперсионный анализ, экспоненциальная регрессия

Введение

Псидиум гуайява (*Psidium guajava* L.) – это ценное вечнозеленое плодовое дерево из семейства миртовых (Myrtaceae). Растет в Центральной и Южной Америке, Вест-Индии, Мексике, Флориде, Луизиане, Аризоне и натурализовалось в некоторых частях Африки, на индийском субконтиненте и на многочисленных океанических островах. Питательная ценность плодов гуавы обусловлена высоким содержанием пищевых волокон, витаминов А, С, В3, В5 и В6, а также микроэлементов, таких как калий, медь и марганец [14]. Следует отметить, что обширные исследования, посвященные *P. guajava*, подчеркивают его потенциал как ценного лекарственного растения [10, 11, 17]. Комплексный анализ фитохимических компонентов этого вида выявляет наличие различных биоактивных соединений, таких как флавоноиды, танины, терпеноиды и фенольные кислоты [12, 21]. Благодаря этому доказано, что листья гуавы обладают рядом полезных свойств: омолаживающими [11] и гепатопротекторными [6, 18], включая антиоксидантное [9] и антибактериальное действие [7, 8, 13]. Исследования показывают, что экстракты из листьев гуавы могут ингибировать активность ключевых ферментов, таких как α-амилаза и α-глюкозидаза, тем самым снижая уровень глюкозы в крови [15, 16, 24].

Необходимо отметить, что растение демонстрирует высокую степень адаптивности, что необходимо для его выращивания в различных типах почв и климатических условиях [15, 19, 23]. Так гуава довольно морозостойка и способна выдерживать температуры до –5 °С в течение коротких периодов времени ночью [22], что может быть полезно для её культивирования в регионах с переменчивым климатом. Растение довольно успешно растет и плодоносит в горшечных культурах в условиях закрытого грунта [20]. При этом анализ содержания полифенолов, таких как кверцетин и кофейная кислота, а также флавонов в растениях, выращенных в контейнерах, показал, что их ценные лечебные свойства сохраняются и не отличаются по количеству от тех, которые содержатся в растениях, выращенных в садах или лесах тропических и субтропических регионов [20]. Это

© **Загуменный Р. А., Николаева А. В., Панченко М. М., 2024**

подчеркивает возможность успешного культивирования гуавы в различных условиях, включая контейнерное выращивание, при этом сохраняя ее полезные характеристики.

P. guajava в коллекции ФГБНУ Донецкий ботанический сад с 1978 г. Первый экземпляр был выращен из семян, поступивших по делектусу из ботанического сада г. Антверпен. Растения в коллекции цветут и плодоносят.

Одной из главных проблем культивирования растений в условиях защищенного грунта является значительное отклонение световых характеристик смоделированной среды от желаемого оптимума и почти полная их зависимость от климатической ситуации данной местности. При этом влияние уровня интенсивности освещения на развитие сеянцев является одним из важнейших направлений исследований в области биологии растений и растениеводства, так как свет контролирует функционирование генной, ферментативной, гормональной, трофической и иных систем эндогенной регуляции, совместное действие которых обеспечивает адекватную реакцию растения на внешние условия [3]. В исследовании Кулаевой О. Н. [2] говорится о том, что влияние уровня освещенности на развитие сеянцев многогранно и зависит от их вида. Здесь же отмечается, что оптимальные условия освещения способствуют здоровому росту сеянцев, в то время как недостаточный его уровень может привести к задержке их роста или гибели. Исходя из этого, понимание воздействия уровня интенсивности освещения на динамику развития сеянцев имеет решающее значение для совершенствования методов растениеводства и управления популяциями растений в природных экосистемах.

Цель работы: анализ влияния уровня интенсивности освещения на морфометрические показатели листьев сеянцев *Psidium guajava* L. в условиях закрытого грунта.

Материал и методы исследования

Анализ влияния уровней интенсивности освещения на особенности развития сеянцев *P. guajava* проводили в оранжереях ФГБНУ «Донецкого ботанического сада». Сеянцы произрастали в субстрате, состоящем из перепревшего перегноя, дерновой земли и крупнозернистого песка в соотношении 1 : 1 : 1. Температура воздуха и почвы в период проведения исследования была в пределах от +26 до +36 °С. При проведении данного исследования производились замеры длины и ширины первых шести пар (со второй по седьмую) полностью сформированных настоящих листьев у сеянцев *P. guajava* с конца марта по начало июня 2024 г. В связи с тем, что листья простые, выраженной элипсовидной формы с цельным краем, площадь листа рассчитывалась по формуле площади элипса, принимая за длину большей полуоси эллипса половинное значение длины листа, а за длину меньшей полуоси эллипса – половинное значение ширины листа. Объем выборки в каждой исследуемой паре листьев составлял 10 растений.

Снижение интенсивности света до необходимого уровня обеспечивалось путем применения экранирующего полотна, не удаляющего избирательно какие-либо участки спектра с определенной длиной волн. Для этого использовали укрывной полимерный материал «Агроспан». Уровень освещенности внутри участков измеряли на протяжении всего периода укоренения в 12:00 ч. Интенсивность освещения была представлена в трех градациях: без притенения (0 %), со слабым уровнем притенения (приблизительно 25 % от полного уровня нормальной освещенности), а также со средним уровнем притенения (приблизительно 50 % от полного уровня нормальной освещенности) (табл.1). Для установления различий средних значений исследуемых параметров, определения степени влияния фактора между группами с различной степенью притенения, был использован двухфакторный дисперсионный анализ. Для детализации результатов дисперсионного анализа и оценки различий между средними значениями в группах использован постериорный анализ с применением теста Тьюки [1]. Получение и визуализация регрессионного уравнения, установление его достоверности и статистической значимости коэффициентов, а также оценка качества аппроксимации им исходных данных и проверка остатков были выполнены в среде электронных таблиц программы Microsoft Excel [4].

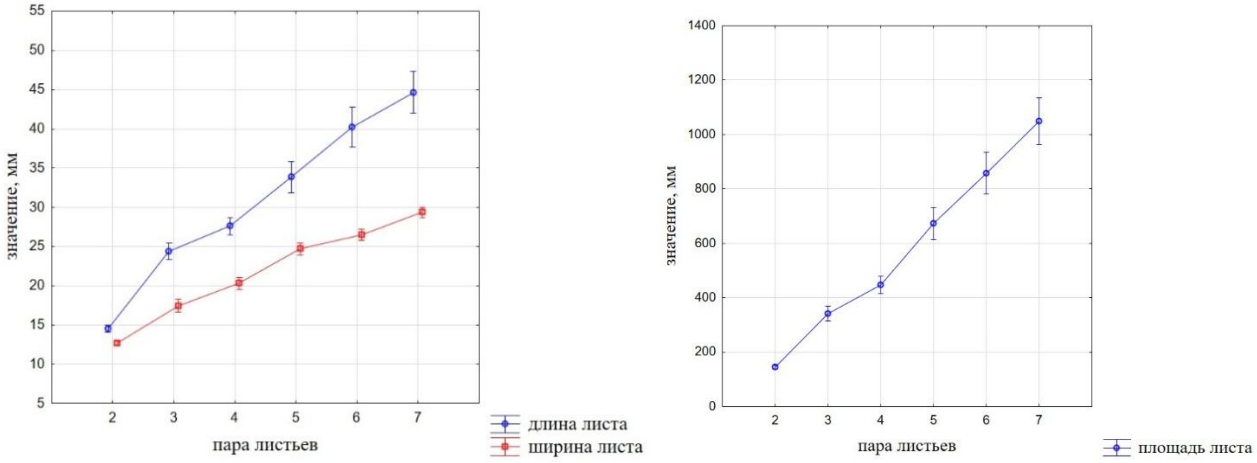
Таблица 1

Показатели интенсивности освещения в период проведения исследования

№ градации пар листьев	Среднее значение интенсивности освещения при разном уровне притенения, лк		
	0 %	25 %	50 %
2	4670,21 ± 142,11	3565,07 ± 157,45	2353,36 ± 38,37
3	5248,07 ± 167,96	3961,35 ± 161,03	2632,00 ± 124,49
4	5670,28 ± 207,25	4239,43 ± 147,26	2841,43 ± 155,78
5	6217,35 ± 225,08	4675,00 ± 131,40	3138,79 ± 151,56
6	6601,28 ± 241,01	4901,93 ± 140,83	3351,29 ± 117,91
7	7202,50 ± 282,53	4955,28 ± 162,85	3638,93 ± 65,64

Результаты и обсуждение

Результаты измерений морфометрических показателей первых шести пар листьев у сеянцев *P. guajava* при разных уровнях освещенности показали, что длина, ширина и площадь каждой последующей пары листьев достоверно увеличивается. Коэффициент вариации показателей исследуемых параметров относится к низкому уровню. Значения данного коэффициента для параметра длины листа варьирует при разных уровнях освещенности от 0,86 до 10,4 %, ширины – от 0,72 до 4,22 % и для площади – от 1,46 до 9,65 % (рис. 1, табл. 2).



А Б

Рис. 1. Показатели линейных параметров листьев (А) и площади листа (Б) в зависимости от номера пары листьев сеянцев *Psidium guajava* L.

Достоверность различий средних значений исследуемых параметров (длины, ширины и площади листьев), а также степень влияния фактора между группами с различными уровнями притенения были установлены на основании результатов двухфакторного дисперсионного анализа.

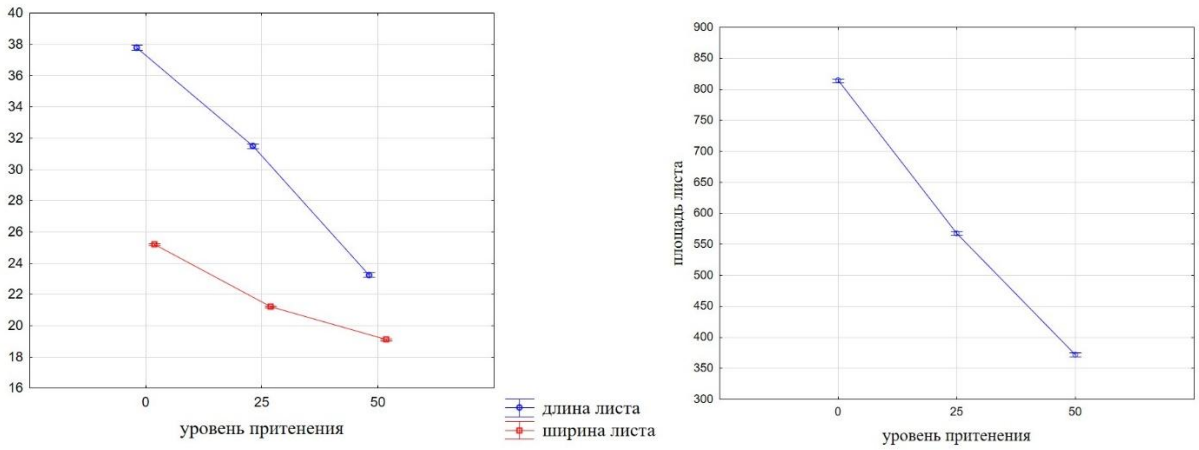
Установлено достоверно значимое уменьшение показателей всех исследуемых параметров при снижении уровня интенсивности освещения у всех шести пар листьев сеянцев *P. guajava* (рис. 2).

Таблица 2

Значения морфометрических показателей шести пар листьев (со второй по седьмую) сеянцев *Psidium guajava* L. в зависимости от разных уровней притенения

Номер пары листьев	Уровень притенения, %	Параметры листьев M±m (мм) /CV (%)		
		длина	ширина	площадь
2	0	16,28 ± 0,37	13,92 ± 0,13	177,65 ± 3,83
		10,06	4,22	9,65
	25	13,15 ± 0,07	12,28 ± 0,04	126,71 ± 0,75
		2,40	1,52	2,65
	50	14,12 ± 0,19	11,85 ± 0,06	131,40 ± 2,02
		5,90	2,11	6,88
3	0	27,50 ± 0,23	21,86 ± 0,04	471,93 ± 4,30
		3,82	0,88	4,07
	25	26,80 ± 0,08	16,32 ± 0,04	343,29 ± 1,55
		1,37	1,14	2,02
	50	18,83 ± 0,23	14,17 ± 0,05	209,32 ± 2,39
		5,43	1,44	5,10
4	0	30,84 ± 0,33	24,19 ± 0,06	585,51 ± 6,52
		4,81	1,18	4,98
	25	30,24 ± 0,17	19,30 ± 0,05	458,04 ± 2,95
		2,52	1,18	2,88
	50	21,70 ± 0,13	17,48 ± 0,04	297,71 ± 2,11
		2,78	1,14	3,17
5	0	42,60 ± 0,21	28,43 ± 0,05	950,48 ± 5,18
		2,20	0,72	2,44
	25	34,78 ± 0,08	24,35 ± 0,04	664,59 ± 2,16
		1,09	0,74	1,46
	50	24,18 ± 0,19	21,35 ± 0,06	405,13 ± 3,07
		3,49	1.20	3,39
6	0	52,42 ± 0,15	30,01 ± 0,10	1234,67 ± 6,60
		1,31	1,55	2,39
	25	40,03 ± 0,10	26,16 ±0,05	821,89 ± 2,68
		1,08	0,93	1,46
	50	28,26 ± 0,17	23,32± 0,06	517,34 ± 3,53
		2,72	1,23	3,05
7	0	57,12 ± 0,11	32,66 ± 0,15	1464,14 ± 7,51
		0,84	1,99	2,29
	25	43,89 ± 0,10	28,81 ± 0,07	992,61 ± 3,27
		1,05	1,03	1,47
	50	32,34 ± 0,19	26,43 ± 0,05	670,78 ± 3,82
		2,54	0,84	2,48

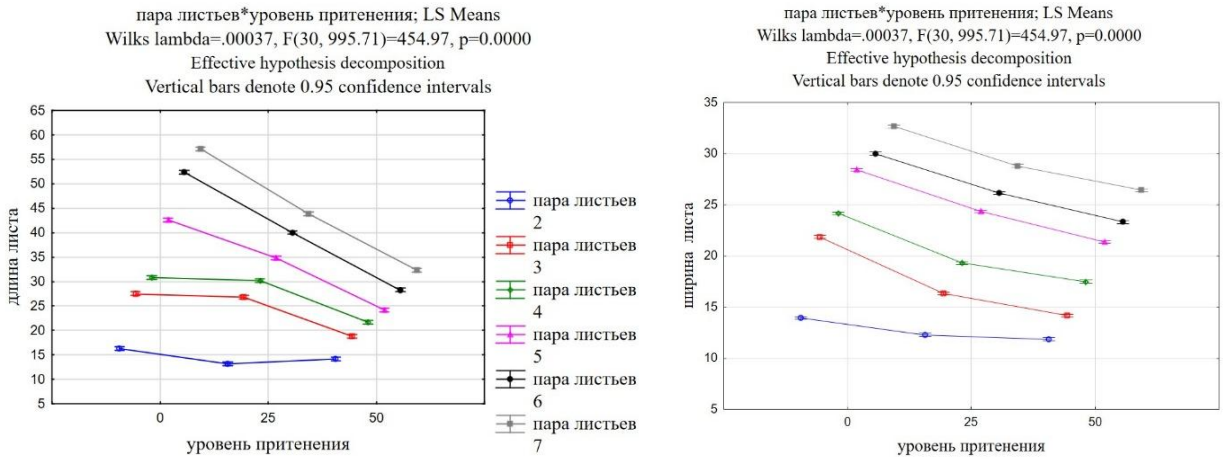
Примечание – M – среднее арифметическое, ± m – ошибка среднего арифметического, CV –коэффициент вариации.



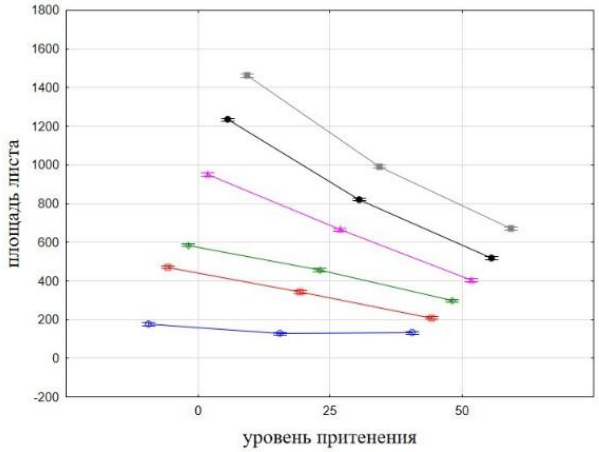
А Б

Рис. 2. Показатели линейных параметров (А) и площади листьев (Б) сеянцев *Psidium guajava* L. в зависимости от уровня притенения

Данные свидетельствуют о том, что значения морфометрических параметров у каждого последующего листа показывают более выраженное снижение при увеличении притенения, начиная с пятой пары листьев (рис. 3).



А Б



В

Рис. 3. Показатели длины (А), ширины (Б) и площади (В) листа со второй по седьмую пару листьев сеянцев *Psidium guajava* L. в зависимости от уровня притенения

Детализация результатов дисперсионного анализа за счет оценки различий между средними значениями параметра ширины листа с использованием теста Тьюки показала наличие статистически значимых различий между всеми исследуемыми парами листьев во

всех уровнях интенсивности освещения на уровне значимости p <0,05000. При аналогичном анализе данных длины листа, результаты показали достоверные различия между всеми парами листьев, кроме 3 и 4 пары, соответственно и анализ площади листа, зависимый от соотношения этих двух параметров, показал отсутствие достоверной разницы между этими парами листьев. Это указывает на то, что длина листа более чувствительна к изменениям уровня освещенности. Сильное уменьшение уровня освещенности приводит к уменьшению длины листа четвертой пары до уровня значений предыдущей пары при более высоком уровне освещения, чему способствует не большая разница в значении средних между этими парами листьев и при полном уровне освещенности.

В связи с достоверно значимым негативным влиянием на показатели морфометрических параметров листьев сеянцев *P. guajava* уменьшения уровня освещенности даже на 25 % было проведен регрессионный анализ зависимости значений длины листьев при повышении естественного уровня освещенности в период формирования шести пар листьев.

Аппроксимация зависимости изменения роста первых шести пар листьев в длину от возрастающего уровня освещенности у сеянцев *P. guajava* была выполнена посредством интерпретации коэффициентов экспоненциальной регрессии вида $y = ae^{bx}*\varepsilon$, которые были вычислены в результате решения системы нормальных уравнений по методу наименьших квадратов. Качество исследуемой модели оценивалось коэффициентом детерминации R^2, значение которого показывает, что полученное уравнение удовлетворительно аппроксимирует эмпирическую линию регрессии теоретической. Также значение данного коэффициента говорит о том, что фактором «интенсивность освещения» можно объяснить 97,6 % вариации суммарной длины пар листьев у сеянцев *P. guajava* (рис. 4). При этом стандартная ошибка исследуемой регрессии составила 0,05 мм.

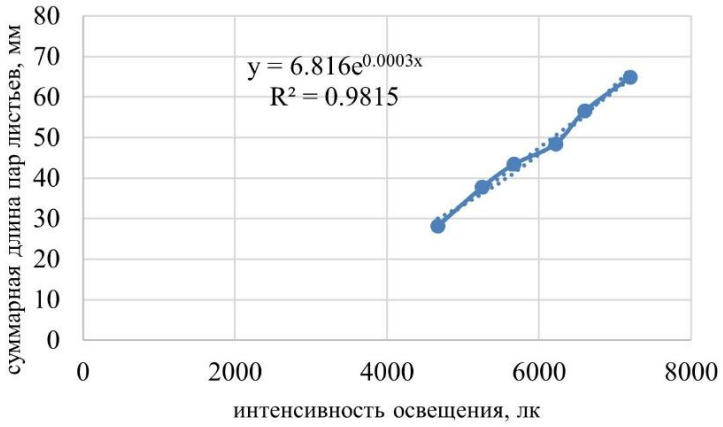


Рис. 4. Динамика прироста длины листьев у молодых экземпляров *P. guajava* L. при нормальном уровне освещенности

Значимость R^2 проверялась путем сравнения табличного и фактического показателей F – критерия Фишера: $F_{факт} > F_{таб(0,05;1;4)} = 7,71$ – следовательно, он является статистически значимым.

В результате регрессионного анализа (рис. 4) было получено уравнение экспоненциальной функции, описывающее зависимость роста первых шести пар листьев в длину от возрастающего уровня освещенности у сеянцев *P. guajava*:

$$y = 6,816e^{0,0003x} * 0,05, \quad (1)$$

где y – длина листа, мм;
x – интенсивность освещения, лк;

e = 2,718 – основание натуральных логарифмов;
6,81 – значение коэффициента регрессии *a*;
0,0003 – значение коэффициента регрессии *b*;
0,05 – стандартная ошибка уравнения, мм.

Данное уравнение аппроксимирует зависимость исследуемого параметра в дискретной области его определения с равными временными интервалами от внешнего фактора, при которой отмечается относительно равномерное увеличение роста исследуемых пар листьев в длину у сеянцев *P. guajava* с возрастанием уровня интенсивности освещения, по своему типу близкого к геометрической прогрессии, то есть повышение уровня естественной интенсивности освещения способствует увеличению длины листьев. По полученному уравнению можно прогнозировать длину первых шести пар листьев у сеянцев *P. guajava* при известных показателях возрастающего уровня интенсивности освещения в условиях закрытого грунта. Практическое использование его результатов позволит поддержать нормальный уровень развития листьев на ранних этапах онтогенеза, являющийся базовой основой для формирования высоких декоративных свойств и полноценных съедобных плодов у экземпляров исследуемого вида при культивировании в искусственно созданных условиях.

Следует подчеркнуть, что полученные результаты являются видоспецифичными, и зависимость прироста листьев от уровня освещенности варьируется между различными видами. Это указывает на то, что адаптация растений к условиям освещения может различаться в зависимости от их биологических характеристик и экологических требований. Так, предыдущие исследования показателей линейных параметров листьев, их массы и площади листовой поверхности у укорененных черенков *Laurus nobilis* L. в зависимости от уровня освещенности в условиях закрытого грунта показали, что при снижении уровня освещенности в среднем до 5 000 лк наблюдаются достоверно более высокие значения показателей линейных параметров листьев и их массы. Было сделано предположение, что так как сеянцы и молодые экземпляры *L. nobilis* в дикой природе произрастают под пологом густой кроны взрослых растений при значительно более низких уровнях освещенности, чем взрослые растения. Поэтому, вероятно, молодым экземплярам этого вида, формирующимся из укорененных черенков, необходим иной световой режим для нормального развития, чем взрослым экземплярам [5].

Выводы

Результаты измерений морфометрических показателей первых шести пар листьев у сеянцев *P. guajava* показали, что длина, ширина и площадь каждой последующей пары листьев достоверно увеличиваются при различных уровнях освещенности. Коэффициент вариации для этих параметров указывает на низкий уровень изменчивости, что свидетельствует о стабильности результатов.

Доказано, что достоверное уменьшение показателей всех исследуемых параметров отмечается при снижении уровня интенсивности освещения. Начиная, с пятой пары листьев уровень освещенности влияет более интенсивно на значение показателей длины листьев.

Проведенный регрессионный анализ показал, что фактор «интенсивность освещения» объясняет 97,6 % вариации суммарной длины пар листьев у сеянцев *P. guajava*. Полученное уравнение экспоненциальной функции позволяет прогнозировать длину листьев в зависимости от уровня освещения, что может быть полезно для оптимизации условий культивирования.

Полученные результаты исследований подчеркивают необходимость учета биологических характеристик и экологических требований при исследовании адаптации растений к условиям освещения. Данные выводы могут служить основой для дальнейших исследований и практического применения в агрономии и садоводстве, особенно в условиях закрытого грунта.

Работа выполнена в рамках государственной темы FREG-2023-0006 «Интродукционное изучение растений мировой флоры и их полифункциональное использование в степной зоне» (Регистрационный номер № 1023020900005-0-1.6.11;1.6.20;1.6.19).

Список литературы

1. *Гашев Н. С., Бетляева Ф. Х., Лупинос М. Ю.* Математические методы в биологии: анализ биологических данных в системе STATISTICA: учебное пособие. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2014. 208 с.

2. *Кулаева О. Н.* Как свет регулирует жизнь растений // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7, № 4. С. 6–12.

3. *Кульчин Ю. Н. Гольцова Д. О., Субботин Е. П.* Регулирующее действие света на растения // Фотоника. 2020. Т. 14, № 2. С.192–210.

4. *Мхитарян В. С., Шишов В. Ф., Козлов А. Ю.* Анализ данных в MS Excel: учебное пособие. М.: КУРС, 2024. 368 с.

5. *Николаева А. В., Загуменный Р. А., Стрельников И. И.* Динамика морфометрических показателей листьев при различном уровне освещенности укорененных черенков *Laurus nobilis* L. // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. 2020. № 3-4. С. 33–39.

6. *Afolabi A., Ashamu E., Oluranti O.* Ameliorative effect of *Psidium guajava* (L.) leaf aqueous extract on aluminium nitrate-induced liver damage in female wistar rats // Clinical Phytoscience. 2020. Vol. 6, No 1. P. 2–4. https://doi.org/10.1186/s40816-020-00198-5.

7. *Bunu S. J., Deghinmotei Alfred-Ugbenbo D. C., Azibanasamesa Owaba, Benita Okelekele*. Determination of phytochemicals and anti-bacterial properties evaluation of the leaves extracts of *Psidium guajava* (L.) Myrtaceae. // European Journal of Pharmaceutical Research. 2023. Vol. 3, No 3. P. 13–16. https://doi.org/10.24018/ejpharma.2023.3.3.67.

8. *Buvaneswari S., Raadha C. K., Krishnaveni N., Jayashree S. In vitro* antimicrobial activity of *Psidium guajava* against clinically important strains // EJLS. 2011. Vol. 1, No 1. P. 14–22.

9. *Chen H. Y., Yen G.-C.* Antioxidant activity and free radical-scavenging capacity of extracts from guava (*Psidium guajava* L.) leaves. // Food Chemistry. 2007. Vol.101, No 2. P. 686–694.

10. *Degla L., Olounladé P., Amoussa A., Azando E., Hounzangbé-Adoté M., Lagnika L.* Pharmacognostical, biochemical activities and zootechnical applications of *Psidium guajava* (Myrtaceae), plant with high medicinal value in tropical and subtropical parts of the world: a review // Journal of Medicinal Plants Studies. 2021. Vol. 9, No 3. P. 14–18. https://doi.org/10.22271/plants.2021.v9.i3a.1275.

11. *Edwin S., Edwin J., Deb L., Goyal S., Gupta S.* Antiulcer and antioxidant activities *of Psidium guajava* Linn // Indian Drugs. 2007. Vol. 44, No 5. P. 395–397.

12. *Gutierrez R. Mitchell S., Solís R. Psidium guajava*: a review of its traditional uses, phytochemistry and pharmacology // Journal of Ethnopharmacology. 2008. Vol. 117, No 1. P. 1–27. https://doi.org/10.1016/j.jep.2008.01.025.

13. *Hussin N. Adzahar N., Lee T., Venugopal J.* Chemical constituents profiles and antibacterial activity of *Psidium guajava*; leaves essential oil // Materials Science Forum. 2021. Vol. 1025. P. 242–246. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1025.242.

14. *Jimenez-Escrig M., Rincon M., Pulido R., Saura F.* Calixto Guava fruit (*Psidium guajava* L.) as a new source of antioxidant dietary fibres // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2001. Vol. 49, No 11. P. 5489–5493.

15. *Joshi D. M., Pathak S. S., Banmare S. et al.* Review of phytochemicals present in *Psidium guajava* plant and its mechanism of action on medicinal activities // Cureus. 2023. Vol. 15, No 10. P. 182–186. e46364. https://doi.org/10.7759/cureus.46364.

16. *Listyani T., Alisi A., Wardani T.* Ethanol extract guava leaves (*Psidium guajava*) give antidiabetic effect on male mice with alloxan induction // Proceeding of International Conference on Science Health and Technology. 2022. P. 443–450. https://doi.org/10.47701/icohetech.v3i1.2190.

17. *Ojewole J., Awe E., Chiwororo W.* Antidiarrhoeal activity of *Psidium guajava* Linn. (Myrtaceae) leaf aqueous extract in rodents // Journal of Smooth Muscle Research. 2008. Vol. 44(6). P. 195–207. https://doi.org/10.1540/jsmr.44.195.

18. *Roy C. K., Kamath J. V., Asad M.* Hepatic protective activity of *Psidium guajava* Linn. leaf extract // Indian J. Exp. Biol. 2006. Vol. 44, No 4. P. 305 – 311.

19. *Singh S. K., Malhotra S. K., Bhargava R. S., Singh R. S., Shukla A. K.* Morphological and Psysiological charcaterization of guava *(Psidium guajava*) under hot-aride zone of Rajasthan // Indian Journal of Agricultural Sciences. 2017. Vol. 87, No 4. P. 491.

20. *Toma M. (Singh), Luchian V.* Morphological and anatomical study of *Psidium guajava* Linn. (guava) – a new fruit tree and medicinal plant researched in Romania // Scientific Papers. Series B, Horticulture. 2019. Vol. LXIII, No 2. P 2285–5653

21. *Wang L., Wu Y., Bei Q., Shi K., Wu Z.* Fingerprint profiles of flavonoid compounds from different *Psidium guajava* leaves and their antioxidant activities // Journal of Separation Science. 2017. Vol. 40, No 19. P. 3817–3829. https://doi.org/10.1002/jssc.201700477.

22. *Wei H. M.* Freezing tolerance and cold acclimation in guava (*Psidium guajava L.*). // Hort Science. 2009. Hort Science Vol. 44, No 5. P. 1258–1266.

23. *Yadava U. L.* Guava (*Psidium guajava L.*): An exotic tree fruit with potential in the south eastern United States // *Hort Science.* 1996. Vol. 31. P. 789.

24. *Zartiana R., Surialaga S., Permana H.* Anti-hyperglycemic effect of *Psidium guajava* leaf infusion // Althea Medical Journal. 2015. Vol. 2, No 4. P. 324–329. https://doi.org/10.15850/amj.v2n4.508.

Поступила в редакцию: 29.11.2024 г.

Zagumenny R. A., Nikolaeva A. V., Panchenko M. M. **Dynamics of morphometric parameters of leaves of seedlings of *Psidium guajava* L. at different levels of illumination in the greenhouse complex of the Donetsk botanical garden. –** A statistically significant effect of the level of illumination intensity on the indicators "leaf length", "leaf width", "leaf area" of the first six pairs of leaves in seedlings of *Psidium guajava* L. was established. It is proved that there is a tendency to decrease these indicators with an increase in the level of shading in all studied pairs of leaves. The dependence of the growth of the studied leaf pairs on the increasing level of natural lighting intensity in the conditions of the greenhouse complex of the Donetsk Botanical Garden is investigated. An exponential regression equation was obtained: $y = 6.816e^{0,0003x} * 0.05$, which statistically reliably describes this process. The relationship of the studied indicator with the influence of an external factor was revealed: in seedlings of *P. guajava* L. increasing the level of natural light intensity helps to increase the length of the leaves. The necessity of taking into account biological characteristics and environmental requirements in the study of plant adaptation to lighting conditions is noted.

Key words: Psidium guajava L., illumination intensity, shading level, morphometric parameters of the leaf, analysis of variance, exponential regression

Загуменный Руслан Анатольевич,
младший научный сотрудник ФГБНУ Донецкий ботанический сад г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: *zoksnic@mail.ru*

Zagumenny Ruslan Anatolyevich
Junior research assistant of Donetsk Botanical Garden, Donetsk, DPR, Russian Federation.

Николаева Александра Викторовна
кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник ФГБНУ Донецкий ботанический сад г. Донецк, ДНР, РФ
E-mail: *nikolaeva19781905@gmail.com*
ORCID: 0000-0001-5337-0070
AuthorID: 1183105

Nikolaeva Alexandra Viktorovna
Candidate of Biological Sciences,
Leading Researcher of Donetsk Botanical Garden, Donetsk, DPR, Russian Federation.

Панченко Марьям Муссовна
инженер-исследователь ФГБНУ Донецкий ботанический сад г. Донецк, ДНР, РФ
E-mail: *panchenko.maryam@mail.ru*

Panchenko Maryam Mussovna
Research engineer of Donetsk Botanical Garden, Donetsk, DPR, Russian Federation.

УДК 581.15: 574.3 (477.60) DOI: 10.5281/zenodo.14543646 EDN: PLLHSK

©**А. В. Калинина**

ИНДИКАЦИОННАЯ ФЕНОТИПИЧЕСКАЯ ПЛАСТИЧНОСТЬ *PLANTAGO MAJOR* L. В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ДОНБАССА

ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
283050, РФ, ДНР, г. Донецк, ул. Щорса, 46

Калинина А. В. **Индикационная фенотипическая пластичность *Plantago major L.* в условиях антропогенной трансформации Донбасса.** Представлены результаты изучения уровня и специфики изменчивости, скоррелированности структур по морфометрическим признакам в ценопопуляциях *P. major* в условиях антропогенно трансформированных экотопов одного из промышленных центров Донбасса – г. Макеевки. Выявлено 3 группы системных признаков индикаторов: таксономические, эколого-биологические, экологические. Признаком, который имеет наибольшее диагностическое значение, является количество генеративных побегов (N_r). Установлена закономерность увеличения изменчивости и силы связи изученных признаков особей ценопопуляций *P. major* при увеличении антропогенной нагрузки.

Ключевые слова: ценопопуляция, изменчивость, морфометрические признаки, корреляция, скоррелированность, антропогенно трансформированные экотопы, *Plantago major* L., г. Макеевка.

Введение

Популяционный фитомониторинг на антропогенно трансформированных территориях является перспективным научным направлением в ботанике и экологии [1–4, 11, 12]. На сегодняшний момент выделяют такие важные задачи ценопопуляционного мониторинга, как поиск методов диагностики и изучения нарушенных экосистем, а также накопление данных о реакциях сообществ, популяций и видов на изменения окружающей среды [4, 9].

Исследования морфометрической изменчивости признаков особей ценопопуляций позволяют оценить степень антропогенных нарушений экосистем, определить современное состояние популяций, механизмы адаптационных процессов видов, тенденции флорогенеза растительных сообществ на нарушенных местообитаниях [2–4, 12, 13].

Экосистемы Донбасса значительно трансформированы под воздействием антропогенных факторов, поэтому для Донецкого региона мониторинг преобразованных экосистем является актуальным научным направлением [5, 10, 11, 13, 14].

Цель исследования – выполнить анализ изменчивости морфометрических признаков особей ценопопуляций *Plantago major* L., произрастающих в различных антропогенно трансформированных экотопах г. Макеевки, определить структуру связей изученных признаков, выявить признаки, имеющие диагностическое значение для фитомониторинга в нарушенных экотопах.

Материал и методы исследования

Объектом исследования был выбран *Plantago major* L. – многолетнее травянистое растение, которое повсеместно распространено на территории России. В Донецко-Макеевской агломерации чаще встречается подвид *Plantago major ssp. major* Pilger.

Выбранный объект исследования оптимально соответствует требованиям для индикационных видов при проведении фитомониторинга: широко распространен на урбанизированных и техногенных территориях Донбасса; отличается преобладанием семенного размножения, обладает высокой антропотолерантностью, высоким адаптивным потенциалом к экстремальным условиям нарушенных экосистем, биология и онтогенез вида хорошо изучены, накоплен большой фактический материал [7].

Изучение морфометрической изменчивости ценополуляций *P. major* на трансформированных территориях Донецкого региона раньше не осуществлялось.

© **Калинина А. В., 2024**

Исследование проводили в августе 2023 г., изучили 4 ценопопуляции (ЦП), которые сформированы в антропогенно трансформированных экотопах г. Макеевки.

ЦП 1 обнаружена на территории парка им. В. Джарты, на газоне вблизи спортивной площадки. Ценопопуляция подвергается рекреационной нагрузке, нерегулярному скашиванию.

ЦП 2 размещена на придорожной территории ул. Ленина. Данная автомобильная дорога характеризуется высокой интенсивностью движения. На популяцию воздействует автотранспорт, рекреационная нагрузка, отмечено периодическое скашивание.

ЦП 3 произрастает на территории гаражного кооператива квартала «Строитель». Данная популяция подвержена рекреационной нагрузке, воздействию со стороны автотранспорта, в том числе и механическому, а также находится под техногенным влиянием, т. к. на расстоянии 1,2 км от экспериментального участка находится Ясиновский коксохимический завод. На участке отмечено единичное скашивание.

ЦП 4 выявлена на территории, прилегающей к шахте Калиновская-Восточная. Экспериментальный участок отличается низкой рекреационной нагрузкой, отмечен небольшой поток прохожих рядом с ЦП 4. Ценопопуляция находится под техногенным воздействием со стороны угольной шахты, а также железной дороги, которая находится на расстоянии 10 м от ценопопуляции. Скашивание отсутствует.

Геоботанические описания растительных сообществ с участием *P. major* осуществляли по общепринятым методикам [2]. Были изучены 8 морфометрических признаков особей ценопопуляций: высота (H), количество листьев (N_L), длина листовой пластинки (L_{fol}), ширина листовой пластинки (W_{fol}), количество жилок (N_{leaf}), количество генеративных побегов (N_r), длина генеративной побега (L_r), длина соцветия (L_{inflo}).

Для анализа изменчивости признаков определяли его среднее арифметическое значение и ошибку ($x \pm S_X$), пределы варьирования признака, коэффициент вариации (CV, %). Для оценки уровня изменчивости использовали шкалу, разработанную С. А. Мамаевым [6].

Для определения связей признаков и их структуры вычисляли матрицу корреляций для признаков каждой ЦП, находили среднюю корреляционную связь признаков ценопопуляций, коэффициент детерминации (R^2) [1, 8]. Также использовали метод анализа корреляционных матриц и связей признаков, разработанный Н. С. Ростовой. Определяли общий коэффициент детерминации (R^2_m) и коэффициент детерминации отдельных признаков (R^2_{ch}) [8, 9]. На основании сопоставления общей (коэффициент вариации) и согласованной изменчивости (коэффициент детерминации) определяли принадлежность признаков к группам системных признаков-индикаторов.

Результаты и обсуждение

Участок, на котором сформирована ЦП 1, характеризуется незначительным затенением, высота травянистого покрова достигает 15 см. Общее проективное покрытие (ОПП) фитоценоза составило 100 %. Видовое богатство составило 17 видов. Преобладающими видами являются *Elytrigia repens* (L.) Nevski (частное проективное покрытие (ЧПП) – 45 %), *P. major* (17 %), *Geum urbanum* L. (15 %). Средняя плотность ценопопуляции *P. major* составила 39,2 особи на 0,25 м^2 (рис. 1).

ЦП 2 расположена на открытом участке с высокой интенсивностью освещения, высота травянистого покрова от 15 до 25 см, ОПП – 97 %. Видовое разнообразие составило 21 вид. Доминируют *E. repens* (40 %), *Taraxacum officinale* F. H. Wigg (28 %), *P. major* (25 %). Плотность ценопопуляции *P. major* – 37,4 особи на 0,25 м^2.

ЦП 3 произрастает на территории с открытым пространством, высота травостоя около 30 см, ОПП равно 90 %. Видовое богатство представлено 16 видами растений. В сообществе преобладают *P. major* (27 %), *E. repens* (8 %), *Ambrosia artemisiifolia* L. (5 %). Средняя плотность ценопопуляции *P. major* – 37,8 особи на 0,25 м^2.

На участке, на котором сформирована ЦП 4, затенение отсутствует, высота травостоя 20–25 см. Общее проективное покрытие составило 95 %, в сообществе отмечено 12 видов

растений. Доминирует *P. major* (37 %), *E. repens* (25 %), *Polygonum aviculare* L. Средняя плотность ценопопуляции *P. major* составила 38,5 особи на 0,25 м^2.

Высота (H) особей изученных ценопопуляций *P. major* на нарушенных участках в среднем составляла 32,2 см, варьирует в пределах от 15 до 60 см; среднее количество листьев особи (N_L) – 9,2 шт., изменяется от 5 до 25 шт.; средняя длина листовой пластинки (L_{fol}) – 8,7 см, варьирует от 4,3 до 17 см; средняя ширина листовой пластинки (W_{fol}) – 6,2 см, амплитуда варьирования от 2,6 до 13,9 см; среднее количество жилок (N_{leaf}) – 6,7 шт., количество жилок изменяется от 5 до 9 шт., среднее значение количества генеративных побегов (N_r) – 8,0 шт., размах изменчивости от 3 до 16 шт.; средняя длина генеративного побега (L_r) – 28,9 см, значение признака варьирует от 10 до 58 см; средняя длина соцветия (L_{inflo}) – 14,5 см, изменяется от 5 до 31 см. Наибольшая амплитуда варьирования отмечена для параметров длина генеративного побега (L_r) и высота (H) особей.

А Б В Г

Рис. 1. Ценопопуляции *Plantago major* L. в условиях антропогенно трансформированных экотопов г. Макеевки:
А – ЦП 1, сформированная на территории парка им. В. Джарты; Б – ЦП 2, размещена на придорожной территории ул. Ленина; В – ЦП 3, произрастает на территории гаражного кооператива квартала «Строитель»; Г – ЦП 4, находится на территории, прилегающей к шахте Калиновская-Восточная

Более мощным развитием характеризуются особи ЦП 3, отмечено увеличение всех изученных параметров (табл. 1). Большее количество признаков с пониженными значениями параметров, зафиксировали для особей ЦП 4, более низкими величинами характеризуются высота особей (H), длина генеративного побега (L_r) и длина соцветия (L_{inflo}).

Таблица 1

Средние значения морфометрических признаков ценопопуляций *Plantago major* L., сформированных на антропогенно трансформированных экотопах г. Макеевки

Морфологические признаков	Исследованные ценопопуляции (ЦП)			
	1	2	3	4
	$x \pm S_X$	$x \pm S_X$	$x \pm S_X$	$x \pm S_X$
Высота H, см	29,75 ± 1,61	29,22 ± 1,16	43,51 ± 4,02	26,13 ± 1,51
Количество листьев N_L, шт.	8,87 ± 0,29	7,51 ± 0,36	11,10 ± 1,26	9,38 ± 0,32
Длина листовой пластинки L_{fol}, см	9,62 ± 0,45	7,35 ± 0,23	9,94 ± 0,70	7,89 ± 0,26
Ширина листовой пластинки W_{fol}, см	6,61 ± 0,42	4,90 ± 0,23	7,57 ± 0,65	5,42 ± 0,24
Количество жилок N_{leaf} , шт.	6,00 ± 0,19	6,65 ± 0,13	7,60 ± 0,37	6,71 ± 0,19
Количество генеративных побегов N_r, шт.	4,71 ± 0,22	4,93 ± 0,46	9,44 ± 1,42	6,63 ± 0,47
Длина генеративной побега Lr, см	25,61 ± 1,44	29,27 ± 1,58	37,41 ± 4,25	23,13 ± 1,44
Длина соцветия L_{inflo}, см	13,08 ± 1,01	14,12 ± 1,00	19,51 ± 2,63	11,28 ± 0,79

Примечание – $x \pm S_X$ – среднее арифметическое значение и его ошибка.

Изученные морфометрические признаки особей ценопопуляций *P. major* обладают высоким варьированием изменчивости, коэффициенты вариации (CV,%) в исследованных популяциях изменяются несогласованно (табл. 2). ЦП 3 отличается наиболее высоким уровнем вариации практически для всех рассматриваемых признаков, пять из восьми признаков обладают высокими значениями коэффициента вариации. ЦП 4 характеризуется повышением коэффициента вариации для признаков генеративной сферы (N_r, L_r, L_{inflo}). Пониженными значениями коэффициента вариации большинства параметров характеризуется ЦП 2.

Таблица 2

Изменчивость и структура связей морфометрических признаков *Plantago major* L.

Морфологические признаков	Исследованные ценопопуляции (ЦП)											
	1			2			3			4		
	CV,%	r	R^2_{ch}	CV,%	r	R^2_{ch}	CV,%	r	R^2_{ch}	CV,%	r	R^2_{ch}
Высота H, см	27,01	0,51	0,30	19,89	0,55	0,41	24,48	0,71	0,53	28,85	0,71	0,57
Количество листьев N_L, шт.	16,43	0,43	0,24	24,27	0,17	0,20	33,82	0,58	0,34	17,05	0,39	0,25
Длина листовой пластинки L_{fol}, см	23,49	0,51	0,33	8,71	0,56	0,34	27,31	0,66	0,47	16,40	0,21	0,16
Ширина листовой пластинки W_{fol}, см	32,02	0,61	0,43	23,52	0,47	0,31	33,45	0,59	0,40	22,50	0,29	0,16
Количество жилок N_{leaf}, шт.	15,78	0,43	0,25	10,09	0,10	0,14	12,77	0,50	0,26	14,25	0,50	0,29
Количество генеративных побегов N_r, шт.	23,60	0,35	0,25	30,47	0,29	0,16	39,66	0,47	0,25	35,11	0,14	0,12
Длина генеративной побега L_r, см	28,15	0,35	0,23	21,04	0,47	0,28	30,04	0,67	0,47	31,18	0,57	0,40
Длина соцветия L_{inflo}, см	38,67	0,39	0,23	27,57	0,45	0,29	35,68	0,62	0,42	35,18	0,57	0,38

Примечание – CV,% – коэффициент вариации, r – коэффициент корреляции, R^2_{ch} – коэффициент детерминации по отдельным признакам.

Анализ коэффициентов вариации показал, что наиболее изменчивыми признаками особей ценопопуляций нарушенных экотопов являются количество генеративных побегов (N_r), длина соцветия (L_{inflo}), которые характеризуются высоким уровнем изменчивости. Средний уровень отмечен для признаков длина листовой пластинки (L_{fol}) и количество жилок (N_{leaf}), остальные морфометрические параметры изученных ЦП характеризуются повышенным уровнем изменчивости (H, N_L, W_{fol}, L_r).

Изученные морфометрические признаки особей имеют разную силу связей в различных ценопопуляциях.

Коэффициенты корреляции (r), рассчитанные для признаков ЦП 1, изменяются в незначительных пределах от 0,35 до 0,61, что указывает на умеренную связь между большинством признаков, её стабильность. Средней скоррелированностью с другими изученными признаками характеризуется ширина листовой пластинки (W_{fol}), длина листовой пластинки (L_{fol}), высота особей (H). Данные признаки являются высоко детерминированными (R^2_{ch}). Сравнивая со значениями вариации отметили, что высота особей (H) имеет высокий уровень изменчивости для параметров ширины листовой пластинки (W_{fol}) и длины листовой пластинки (L_{fol}) вариация соответствует повышенному уровню.

Коэффициенты корреляции морфометрических признаков особей ЦП 2 изменяются в широких пределах от 0,1 до 0,55. Наибольшие значения связи отмечены для длины листовой пластинки (L_{fol}) и высоты растения (H). Изменчивость для длины листовой пластинки имеет низкий уровень, для высоты – средней. Однако коэффициенты детерминации показали

увеличение связи с другими признаками и для параметра ширины листа (W_{fol}), когда как коэффициент вариации данного признака повышенный, а корреляции – умеренный.

Для признаков особей ЦП 3 отмечены более высокие значения коэффициентов корреляции, в сравнении с остальными исследованными ЦП, они варьируют от 0,47 до 0,71. Наибольшей связью с другими признаками характеризуется высота растений (H), средней связью характеризуются длина листовой пластинки (L_{fol}), ширина листовой пластинки (W_{fol}), количество жилок (N_{leaf}), длина генеративного побега (L_r), длина соцветия (L_{inflo}). Для всех перечисленных признаков, кроме количества жилок листа, отмечена сильная детерминированность. Отмечаем следующие показатели вариации перечисленных параметров: высота особей (H) и длина листовой пластинки (L_{fol}) имеют повышенную изменчивость, длина генеративного побега (L_r), длина соцветия (L_{inflo}) высоко изменчивы, количество жилок (N_{leaf}) листа – слабо изменчивый признак.

Признаки особей ЦП 4 характеризуются значительным размахом корреляционных коэффициентов от 0,14 до 0,71. Высоким уровнем связи обладает высота особей (H), незначительно уступают такие признаки, как длина генеративного побега (L_r), длина соцветия (L_{inflo}) – средний уровень связи. Коэффициенты детерминации имеют высокие значения для перечисленных признаков. Показатели изменчивости отличаются от данных корреляции: высота имеет повышенную вариабельность, длина генеративного побега, длина соцветия имеют высокую изменчивость.

Проанализированные параметры особей ЦП 2 характеризуются наименьшей скоррелированностью и изменчивостью, что свидетельствует об относительно благоприятных условиях экотопа и допустимой степени антропогенной нагрузки на ценопопуляцию *P. major*. Это свидетельствует о поливариантности особей, увеличении адаптационных возможностей к условиям экотопа. В случае с ЦП 3 отмечаем увеличение изменчивости признаков и их связи между собой, что является следствием увеличения негативного воздействия.

Повышение детерминированности, значений корреляции высоты растений и отсутствие высокого уровня вариации демонстрируют наиболее сильную скоррелированность высоты со всеми признаками, которая возрастает с увеличением нагрузки.

Высокое варьирование и низкая скоррелированность такого признака, как количество генеративных побегов демонстрирует зависимость признака от условий внешней среды и слабую его связь с другими признаками особи.

Для таких признаков, как высота особей, длина генеративного побега, длина соцветия изменчивость зависит от внешних факторов и влечет за собой согласованные изменения всей структуры связей морфологической системы растения.

Для характеристики закономерности изменчивости признаков их взаимосвязей и структуры, сравнивали общую (коэффициент вариации CV, %) и согласованную изменчивость (коэффициент детерминации R^2_{ch}) изученных признаков особей *P. major* (рис. 2).

В ходе анализа 8 морфометрических признаков ЦП в различных условиях нарушенных экотопов установили, что высокая общая изменчивость и согласованность соответствует количеству генеративных побегов (N_r), длине генеративного побега (L_r,), длине соцветия (L_{inflo}), ширина листовой пластинки (W_{fol} ,), высота растений (H), количество листов (N_L).

В структуре морфологической изменчивости особей *P. major* и структуре связей между ними выявлено три группы системных признаков-индикаторов: таксономические индикаторы, эколого-биологические, экологические системные индикаторы. Таксономические индикаторы являются слабо изменчивыми и слабо детерминированными, они являются автономными и слабо реагируют внешние факторы – количество листьев (N_L), количество жилок (N_{leaf}). К экологическим признакам-индикаторам относим количество генеративных побегов (N_r), для которых характерна сильная изменчивость и слабая детерминированность, такие признаки зависят от влияния внешних факторов. Эколого-биологические системные индикаторы сильно изменчивы и детерминированы, к ним

относятся все, кроме вышеуказанных, эти признаки (H, L_{fol}, W_{fol}, N_r, L_r, L_{inflo}), отражают согласованную изменчивость особей в неоднородной среде.

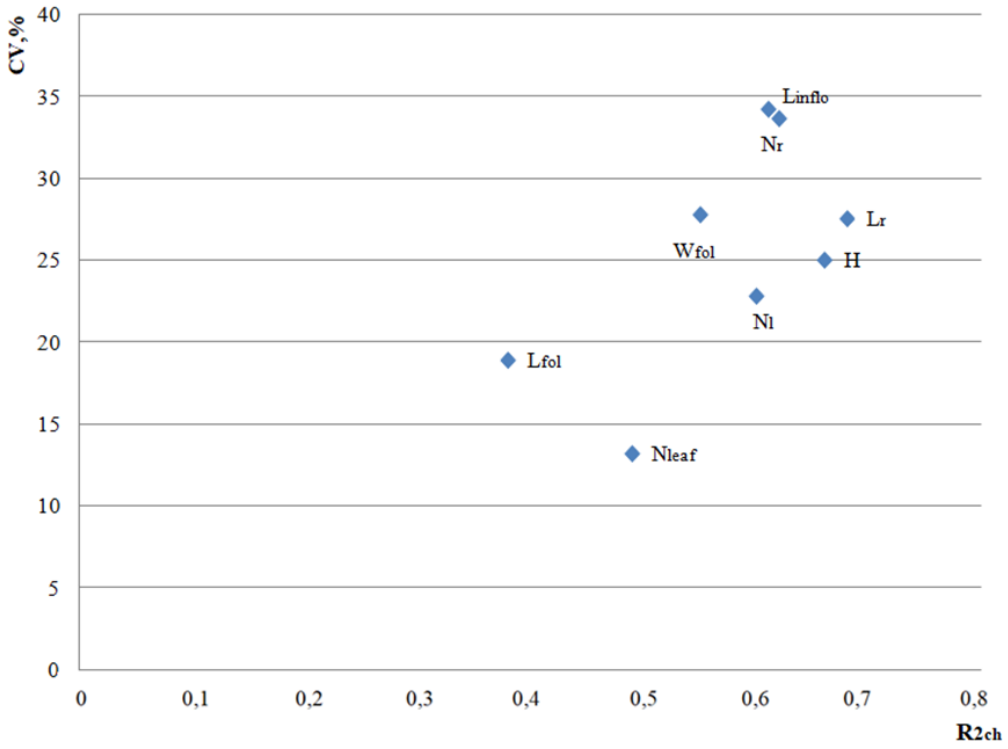


Рис. 2. Общая и согласованная изменчивость морфометрических признаков *Plantago major* L.: По оси X – согласованная изменчивость (R^2_{ch}), по оси Y – общая изменчивость (CV,%). H – высота растений, N_L – количество листьев, L_{fol} – длина листовой пластинки, W_{fol} – ширина листовой пластинки, N_{leaf} – количество жилок, N_r – количество генеративных побегов, L_r – длина генеративной побега, L_{inflo} – длина соцветия

Анализируя среднюю корреляционную связь изученных морфометрических признаков, выявили, что наибольшим значением коэффициента характеризуется ЦП 3 (r = 0,61 p = 0,05), далее ценопопуляции распределили в порядке убывания значения связи – ЦП 1 (r = 0,46 p = 0,05), ЦП 4 (r = 0,43 p = 0,05), ЦП3 (r = 0,38 p = 0,05).

Коэффициент детерминации – более автономный и прямой способ выражения зависимости связи между признаками, демонстрирует другое распределение ценопопуляцияй *P. major* в зависимости от силы связи ЦП 3 (R^2_m = 0,39), ЦП 4 (R^2_m = 0,29), ЦП 1 (R^2_m = 0,28), ЦП 1 (R^2_m = 0,27).

Сопоставив полученные результаты изменчивости признаков особей *P. major*, их связи и структуру, обнаружили закономерность увеличения рассмотренных характеристик определенных для ценопопуляций с увеличением антропогенного влияния на экотопы.

Выводы

В ходе исследования установили определенную закономерность относительно реакций морфометрических параметров особей ценопопуляций *P. major* на антропогенную нагрузку в трансформированных экотопах г. Макеевки: при увеличении рекреационной нагрузки на ценопопуляцию выявили рост изменчивости и скоррелированности параметров листовой пластинки (длина листовой пластинки (L_{fol}), ширина листовой пластинки (W_{fol}), а при возникновении техногенной нагрузки увеличивается изменчивость и скоррелированность признаков генеративной сферы (количество генеративных побегов (N_r), длина генеративной побега (L_r), длина соцветия (L_{inflo})).

Анализ совокупности полученных данных позволил дать обобщенную оценку состоянию ценопопуляций и распределить изученные ценопопуляции *P. major* в порядке увеличения антропогенной нагрузки:

ЦП 2 < ЦП 1 < ЦП 4 < ЦП 3.

Исследование изменчивости признаков особей *P. major* и структуры связей между ними позволили выделить 3 группы системных индикаторных признаков для ценопопуляций нарушенных экотопов:

- таксономические признаки – количество листьев (N_L), количество жилок (N_{leaf}), которые обладают высокой устойчивостью к внешним факторам среды;
- эколого-биологические признаки – высота растений (H), длина листовой пластинки (L_{fol}), ширина листовой пластинки (W_{fol}), количество генеративных побегов (N_r), длина генеративной побега (L_r), длина соцветия (L_{inflo})), которые отражают согласованную изменчивость особей в результате изменений в окружающей среде;
- экологические признаки – количество генеративных побегов (Nr), данный признак чувствительно реагирует на влияние внешних факторов и слабо скоррелирован с другими признаками особей.

Морфометрическим признаком *P. major,* имеющим наибольшее диагностическое значение для фитомониторинга на нарушенных экотопах г. Макеевки, определено количество генеративных побегов (N_r). Такие признаки, как высота растений (H), длина листовой пластинки (L_{fol}), ширина листовой пластинки (W_{fol}), количество генеративных побегов (N_r), длина генеративного побега (L_r), длина соцветия (L_{inflo}) также имеют диагностическое значение и могут использоваться для целей фитомониторинга на антропогенно трансформированных экотопах.

Подтвердили, что использование коэффициента детерминации для осуществления анализа изменчивости морфометрических признаков особей ценопопуляций, сформированных на нарушенных экотопах, является более информативным в сравнении с коэффициентом корреляции.

Для подтверждения полученных результатов о закономерностях изменчивости и скоррелированности признаков *P. major* на нарушенных территориях, а также верификации обозначенных диагностических признаков-индикаторов в зависимости от изменения погодных условий необходимо проведение дальнейших исследований по данному научному направлению.

Исследование выполнено в рамках молодежной лаборатории «Диагностика и механизмы адаптации природных и антропогенно-трансформированных экосистем Донбасса» (№ НИОКТР 124051400023-4).

Список литературы:

1. *Асташенков А. Ю., Годин В. Н., Черемушкина В. А., Таловская Е. В.* Анализ функциональных признаков и структура из связей в ценопопуляциях *Panzerina lanata* (Lamiaceae) // Ботанический журнал. 2022. Т. 107, № 6. С. 544–560. DOI: 10.31857/S0006813622060047.

2. *Злобин Ю. А.* Популяционная экология растений: современное состояние, точки роста. Сумы: Унив. книга, 2009. 263 с.

3. *Калинина А. В.* Изменчивость морфометрических параметров *Oenothera depressa* Greene в ценопопуляциях трансформированных экотопов г. Макеевки // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. 2022. № 3–4. С. 16–20.

4. *Калинина А. В.* Состояние ценопопуляций видов рода Oenothera L. в трансформированных экотопах Донбасса // Лесохозяйственная информация. 2022. № 3. С. 135–144. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2022.3.12.

5. *Корниенко В. О., Яицкий А. С.* Онтогенетические изменения механической устойчивости основных видов древесных растений в экосистемах города Донецка // Самарский научный вестник. 2024. Т. 13, № 1. С. 30–38. DOI 10.55355/snv2024131104.

6. *Мамаев С. А.* Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере сем. Pinaceae на Урале). М.: Наука, 1973. 284 с.

7. *Османова Г.О.* Состояние ценопопуляций *Plantago major* L. и *Plantago media* L. в лесных фитоценозах Республики Марий Эл // Вестник Московского государственного университета леса, Лесной вестник. 2007. № 5. С. 75–79.

8. *Ростова Н. С.* Изменчивость системы корреляций морфологических признаков. 1. Естественные популяции *Leucanthemum vulgare* (Asteraceae) // Ботанический журнал. № 11. 1999. С.50–66.

9. *Ростова Н. С.* Корреляции: структура и изменчивость. СПб. 2002. 308 с.

10. *Сафонов А. И., Гермонова Е. А.* Экологический мониторинг в Донбассе: ГИС-технологии фитоквантификации // География, экология, туризм: новые горизонты исследований: Материалы Всеросс. научно-практ. конф. с международ. участием, посвященной 90-летию создания факультета географии, геоэкологии и туризма ВГУ. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2024. С. 203–205.

11. *Сафонов А. И., Глухов А. З.* Ведущие семейства для фитомониторинга в условиях техногенной среды Донбасса // Теоретические и прикладные аспекты организации, проведения и использования мониторинговых наблюдений: Материалы международ. науч. конф., посвященной 95-летию со дня рождения члена-корреспондента НАН Беларуси Е. А. Сидоровича. – Минск: ИВЦ Минфина, 2023. С. 96–97.

12. *Удод Я. А.* Изменчивость морфологических признаков и виталитетная структура *Tragopogon major L.* в условиях урбосистемы Донецко-Макеевской агломерации // Вестник студенческого научного общества ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет». 2021. Т. 1, № 13. С. 172–175.

13. *Nespirnyi V., Safonov A.* The importance of principal component analysis for environmental biodiagnostics of Donbass // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 555. P. 01007. DOI 10.1051/e3sconf/202455501007.

14. *Safonov A.* Ecological scales of indicator plants in an industrial region // BIO Web Conf. 2022. Vol. 43. 03002. 8 p. https://doi.org/10.1051/bioconf/20224303002.

Поступила в редакцию 15.11.2024 г.

Kalinina A. V. **Indicative phenotypic plasticity of *Plantago major* L. in conditions of anthropogenic transformation of Donbass.** – The article presents the results of studying the level and specificity of variability, correlation of structures by morphometric features in *Plantago major* L. cenopopulations in conditions of anthropogenically transformed ecotopes of one of the industrial centers of Donbass – Makeyevka. Three groups of systemic features of indicators were revealed: taxonomic, ecological-biological, ecological. The feature that has the greatest diagnostic value is the number of generative shoots (Nr). A pattern of increasing variability and strength of connection of the studied features of *P. major* cenopopulation individuals with increasing anthropogenic load was established.

Key words: cenopopulation, variability, morphometric features, correlation, correlation, anthropogenically transformed ecotopes, *Plantago major* L., Makeyevka.

Калинина Анжела Викторовна,
младший научный сотрудник НИЧ,
зав. лабораторией кафедры ботаники и экологии
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: *kalinina.angela91@mail.ru*
ORCID: 0009-0007-0789-5512
AuthorID: 1040324

Kalinina Anzhela Viktorovna,
Junior researcher of the Research Department of
Donetsk State University, Assistant at the Department of
Botany and Ecology of Donetsk State University,
Donetsk, DPR, Russian Federation.

УДК 712.422 DOI: 10.5281/zenodo.14543657 EDN: JPRCLG

© **Ю. С. Калинина**

АНАЛИЗ АССОРТИМЕНТА ЦВЕТОЧНОГО ОФОРМЛЕНИЯ «СКВЕРА СЛАВЫ» ЦЕНТРАЛЬНОГО-ГОРОДСКОГО РАЙОНА Г. МАКЕЕВКИ

ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
Россия, 283050, г. Донецк, ул. Щорса, 46

Калинина Ю. С. Анализ ассортимента цветочного оформления «Сквера Славы» Центрально-Городского района г. Макеевки. – В работе представлена оценка современного состояния цветочного оформления «Сквера Славы» г. Макеевки. На территории сквера преобладают цветники в регулярном стиле – клумбы. Цветочно-декоративное оформление представлено 12 видами травянистых растений. Все они достаточно устойчивы в регионе произрастания. Состояние 70 % цветников оценено как отличное. Наибольшая декоративность приходится на летний период. Научная актуальность проблемы состоит в необходимости изучения цветочного ассортимента, используемого в оформлении городских территорий, с целью дальнейшего формирования качественного видового состава цветников, основанного на современных тенденциях городского озеленения.

Ключевые слова: сквер, цветники, оценка состояния, город, цветочно-декоративное оформление.

Введение

Современный город – динамичная, сложная, открытая искусственно-естественная урбоэкосистема, специфической особенностью которой является доминирование антропогенного фактора и его ощутимое воздействие на формирование и функционирование всех живых и костных компонентов [2, 15].

Экологическая ситуация, складывающаяся в крупных, промышленных городах, является предметом особого внимания. Все более острой становится проблема охраны окружающей среды, создания благоприятных условий для жизни и деятельности человека. В последние годы увеличилось отрицательное влияние человека на окружающую среду и, в частности, на зеленые насаждения [5]. Проблема уязвимости и поддержания в надлежащем состоянии цветочно-декоративных насаждений – одна из важнейших экологических задач в городе [4].

К основным объектам озеленения и благоустройства городов относятся: городские сады, парки, скверы, бульвары, набережные.

Сквер – это небольшой озелененный участок в городской застройке, предназначенный для прогулок, встреч, передвижения пешеходов, декоративного оформления улиц, набережных, городских площадей, территорий у общественных зданий и пространств вокруг монументов. Площадь сквера составляет от 0,2 до 2 га.

Проектирование скверов включает ряд вопросов, охватывающих проблемы зеленого строительства, организации движения транспорта и пешеходов, защиту от шума и пыли, а также экологические задачи [7].

Основными функциями скверов в городском пространстве являются: рекреационная, эстетическая, экологическая и распределительная, связанная уравниванием и распределением пешеходных и транспортных потоков.

Важнейшей функцией скверов считается эстетическая, поскольку первоначально эксплуатация скверов предполагала украшение городской среды и улучшение художественного облика общей территории. Экологическая функция связана с индустриализацией и улучшением микроклимата города. Рекреационная функция отвечает за привлечение жителей и гостей города на прогулки и отдых. Функция распределения сформирована в связи с появлением и развитием транспорта и в настоящее время отвечает за распределение пешеходных потоков [6, 8–10].

© **Калинина Ю. С., 2024**

Цветники широко применяются в общественных местах: городских парках и скверах, в архитектурно-исторических комплексах. Они должны сохранять свою декоративность максимально продолжительное время, быть практичными, экономичными, интересными композиционно и колористически [12]. Для расширения ассортимента декоративных травянистых растений зачастую используют рекомендации ботанических садов и других организаций, создающих на своих территориях коллекции и экспозиции растений, представляющие флоры различных континентов. Наиболее устойчивые и декоративные в местных условиях виды и сорта растений предлагаются для озеленения городов. Поэтому, изучение и комплексная оценка современного цветочного оформления урбанизированных территорий является актуальной темой [13].

Цель работы – анализ актуального состояния цветников в «Сквере Славы» г. Макеевки, установление их таксономического разнообразия, экологических характеристик видов и периода декоративности.

Материал и методы исследования

Анализ состояния цветочно-декоративных насаждений «Сквера Славы» (далее – сквер) выполнялся в весенне-летний период 2024 г. Сквер расположен в Центрально-Городском районе г. Макеевки, по просп. Ленина, между 10 и 13 линиями. Площадь сквера составляет 2,4 га (рис. 1).

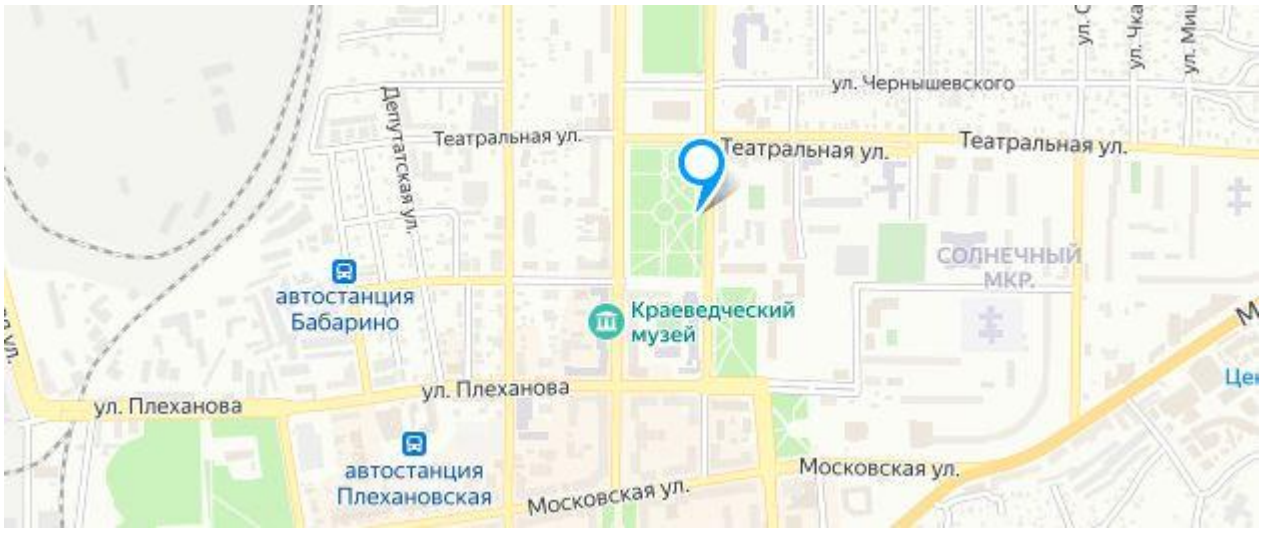


Рис. 1. Местоположение «Сквера Славы»

Исследование цветников проводилось по принципу маршрутного метода, что позволило определить все имеющиеся виды травянистых растений. Видовой состав растений цветочного оформления определяли при помощи справочной литературы [1].

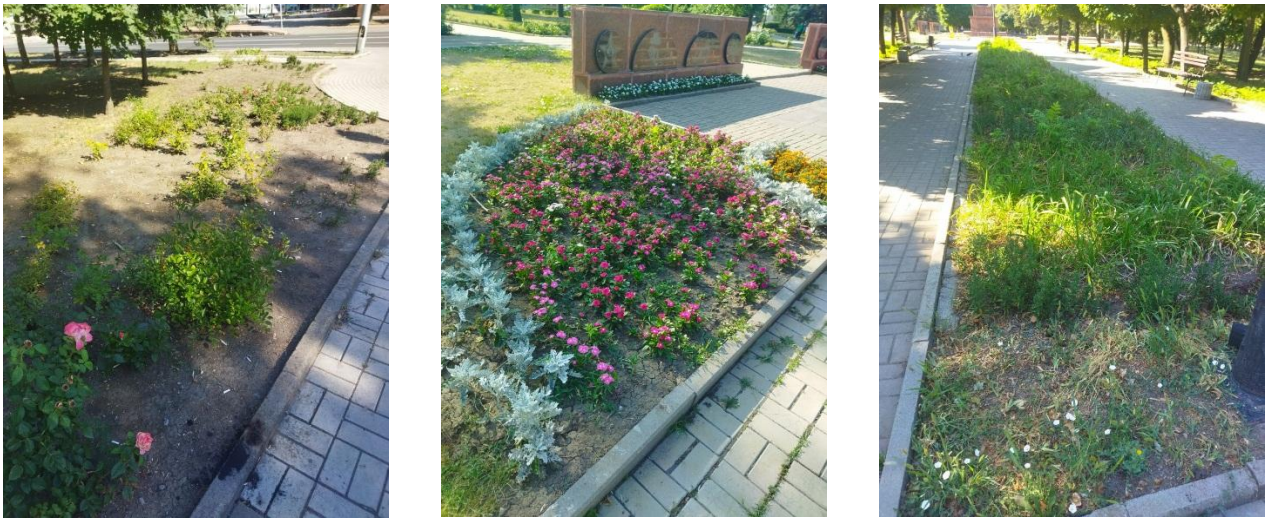
Исследуемые травянистые растения охарактеризованы по экологическим группам по отношению к свету, температуре и влаге [14].

Для анализа сезонной декоративности составлен календарь цветения для 12 видов красивоцветущих однолетних и многолетних растений с указанием периода цветения по месяцам и декадам [11].

При оценке состояния цветников их качественное состояние определялось по следующим показателям: а) отличное – растения хорошо развиты, равные по качеству, удачно подобраны по колеру, времени цветения, высоте, нет сорняков и отпада; нет открытой почвы; б) удовлетворительное – растения нормально развиты, но их состав однообразен, отпад незначительный, сорняки единичны (не более 10 % площади); имеется много открытой почвы; в) неудовлетворительное – растения слабо развиты, отпад значительный, сорняков много (более 10 % площади), почва подвергается эрозии [3].

Результаты и обсуждение

Ландшафтная структура сквера имеет прямоугольную форму. На территории сквера преобладают цветники в регулярном стиле – клумбы. Клумбы имеют треугольную, прямоугольную формы, либо несимметричную форму. Цветники представлены монокультурами, либо 2–3 видами растений (рис. 2).



А **Б** **В**

Рис. 2. А, Б, В – Элементы цветочного оформления «Сквера Славы»

На исследуемом объекте цветочного оформления было выявлено 12 видов травянистых декоративных растений, которые принадлежат к 9 семействам. Семейства: Астровые (Asteraceae), составляют 36 %, Розовые (Rosaceae), Яснотковые (Lamiaceae), Кутровые (Apocynaceae), Ирисовые (Iridaceae), Канновые (Cannaceae), Пасленовые (Solanaceae), Кипрейные (Onagraceae), Красодневовые (Hemerocallidaceae) составляют по 8 %.

Составлена характеристика видов растений (табл. 1) по принадлежности к экологическим группам:

1) по отношению к температурному фактору 67 % видов термофиты, то есть теплолюбивые растения;

2) 100 % видов приспособлены к жизни на открытых, хорошо освещенных участках;

3) 83 % видов приспособлены к более или менее достаточному, но не избыточному увлажнению почвогрунтов и урбанозёмов.

Таблица 1

Распределение видов растений в «Сквере Славы» по группам основных экологических факторов

№ п/п	Вид	Экологический фактор		
		освещенность	температура	увлажнение
1	2	3	4	5
Однолетние растения				
1	*Petunia hybrida* (Hook.) Vilm.	светолюбивое	эвритоп	мезофит
2	*Tagetes erecta* L.	светолюбивое	эвритоп	мезофит
Многолетние растения				
1	*Cineraria maritime* L.	светолюбивое	термофит	мезофит
2	*Canna indica* L.	светолюбивое	термофит	мезофит
3	*Iris x hybrida* hort.	светолюбивое	эвритоп	мезофит
4	*Stachys lanata* Jacq.	светолюбивое	термофит	ксерофит
5	*Rosa x hybrida* hort.	светолюбивое	термофит	мезофит
6	*Catharanthus roseus* (L.) G.Don.	светолюбивое	термофит	мезофит

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5
7	*Aster amellus* L.	светолюбивое	термофит	ксерофит
8	*Oenothera macrocarpa* Nutt.	светолюбивое	эвритоп	мезофит
9	*Coreopsis lanceolata* L.	светолюбивое	термофит	мезофит
10	*Hemerocallis x hybrida* hort.	светолюбивое	термофит	мезофит

Отмеченные закономерности отвечают характерным особенностям видов культурфитоценозов Донбасса: требуют обязательной агротехники и обеспечения дополнительным поливом в засушливый период.

Цветочно-декоративное оформление является важнейшей составляющей эстетической привлекательности городских скверов. Одной из основных задач озеленения урбанизированных территорий является формирование эстетически полноценной визуальной среды для человека. Экспериментально установлено, что правильно подобранное цветочное оформление способствует повышению комфортности визуальной среды, улучшает настроение жителей города, создает положительный психологический климат. Все насаждения скверов должны быть подчинены композиционному замыслу и вписываться в общий архитектурный ансамбль.

Проанализировав сезонную декоративность исследуемых растений, стоит отметить, что сквер не имеет цветочно-декоративной привлекательности в ранневесенний период. Основной период цветения растений приходится на летние месяцы (табл. 2).

Таблица 2

Календарь цветения исследуемых травянистых растений

№ п/п	Вид	Календарь цветения																	
		май			июнь			июль			август			сентябрь			октябрь		
		Декады																	
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	*Petunia hybrida* (Hook.) Vilm.																		
2	*Tagetes erecta* L.																		
3	*Cineraria maritime* L.																		
4	*Canna indica* L.																		
5	*Iris x hybrida* hort.																		
6	*Stachys lanata* Jacq.																		
7	*Rosa x hybrida* hort.																		
8	*Catharanthus roseus* (L.) G.Don.																		
9	*Aster amellus* L.																		
10	*Oenothera macrocarpa* Nutt.																		
11	*Coreopsis lanceolata* L.																		
12	*Hemerocallis x hybrida* hort.																		

В период исследования было зафиксировано небольшое количество сорных растений и многочисленную самосевную поросль *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle на клумбах, где рядом произрастает указанное дерево. Нарушена плотность посадки цветочных культур на некоторых клумбах.

Таким образом, на исследуемых территориях состояние 70 % цветников оценено как отличное, 10 % цветников – удовлетворительное и 20 % находятся в неудовлетворительном состоянии.

Выводы

В условиях антропогенных трансформаций и урбанизации территории возникает необходимость постоянного мониторинга состояния объектов общего пользования.

По результатам оценки состояния цветочно-декоративных насаждений установлено, что используемые в озеленении виды травянистых растений устойчивы к экологическим условиям региона. Состояние 70 % цветников отмечается как отличное, что свидетельствует о квалифицированной агротехнике на исследуемой территории.

С целью усиления декоративного эффекта и эстетической привлекательности объекта необходимо использовать в озеленении сквера луковичные растения для большего эстетического эффекта в ранневесенний период. Также стоит разнообразить ассортимент однолетних и многолетних растений устойчивых к городским условиям. В связи с присутствием сорных растений необходимо усилить агротехнику возделывания цветочных культур и их содержание в летний период.

Работа выполнена в рамках молодежной лаборатории «Диагностика и механизмы адаптации природных и антропогенно-трансформированных экосистем Донбасса» (№ госрегистрации НИОКТР 124051400023-4), а также в рамках инициативной научной темы кафедры ботаники и экологии Донецкого государственного университета «Ботаника антропотехногенеза: индикация и оптимизация» (№ 0122D000085).

Список литературы

1. *Бочкова И. Ю.* Создаем красивый цветник. Принципы подбора растений. Основы проектирования. М.: Фитон+, 2007. 128 с.

2. *Гудзенко Е. О., Горбов Е. О.* Оценка дендрологической составляющей сквера «Семицветик» селитебной зоны Ростова-на-Дону // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. 2024. № 2. С. 6–13. DOI: 10.5281/zenodo.13949242. EDN: BJZJVG.

3. *Збруева И. И., Давлятчина М. И.* Анализ цветочного оформления объектов общего пользования Мотовилихинского района г. Перми // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2012. № 33. С. 122–125. EDN: TAUSWF.

4. *Калинина Ю. С.* Малые архитектурные формы на примере видового разнообразия клумб Макеевки // Донецкие чтения 2024: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: материалы IX Международ. науч. конф. (Донецк, 15–17 октября 2024 г.). Донецк: Донецкий национальный университет, 2024. С. 72–74. EDN: UTBEMQ.

5. *Крамарева Т. Н., Тырченкова И. В., Дмитриева А. А.* Санитарно-гигиеническая оценка парка «Южный» г. Воронеж // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований: Материалы XXIV международ. научно-практ. конф. (North Charleston, 26–27 октября 2020 г.). Morrisville: LuluPress, Inc., 2020. С. 36–39. EDN: DRYQWL.

6. *Кузьмина Н. М., Ардашева О. А., Федоров А. В.* Особенности цветочного оформления города Ижевска // Экосистемы. 2019. № 19(49). С. 116–122. EDN: IZRAYM.

7. *Лепехова М. С.* Сквер как часть системы городского озеленения // Евразийский союз ученых. 2014. № 8-8. С. 158–159. EDN: XGWXTL.

8. *Марченко А. В.* Анализ ассортимента цветочного оформления сквера Школьный Северо-Восточного административного округа г. Москвы // Вестник ландшафтной архитектуры. 2024. № 38. С. 57–60. EDN: QEBXMS.

9. *Морозова Г. Ю.* Развитие парковых пространств как элемента планирования устойчивого города // Региональные проблемы. 2023. Т. 26, № 2. С. 54–59. DOI: 10.31433/2618-9593-2022-26-2-54-59. EDN: MTVQOO.

10. *Салык С. А.* Скверы как неотъемлемая часть системы озеленения городской среды // Международ. научно-тех. конф. молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова (Белгород, 01–20 мая 2017 г.). Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2017. С. 3588–3591. EDN: XQQDCH.

11. *Соколова Т. А., Бочкова И. Ю.* Декоративное растениеводство. Цветоводство: учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальности «Садово-парковое и ландшафт. стр-во» направления подгот. дипломир. специалистов «Лес. хоз-во и ландшафт. стр-во». М.: Academia, 2004. 427 с. ISBN 5-7695-1412-4. EDN: QKVYHV.

12. *Тыранова Ю. И., Гордиенкова С. Ф., Аладинская И. В.* Особенности цветочного оформления территории Бежицкого района г. Брянска и рекомендации по его совершенствованию // Актуальные вопросы техники, науки, технологии: Сборник научных трудов нац. конф. (Брянск, 08–12 февраля 2022 г.). Брянск: Брянский государственный инженерно-технологический университет, 2022. С. 54–59. EDN: XCACPF.

13. *Федоров А. В., Кузьмина Н. М., Ардашева О. А.* Улучшение визуальной городской среды посредством декоративно-цветочного оформления // Астраханский вестник экологического образования. 2018. № 3(45). С. 155–163. EDN: XQVUXR.

14. *Шаповалова А. А.* Экология растений: Учеб.-метод. пособие. Саратов: Изд-во «Саратовский источник», 2015. 80 с.

15. *Шубенков М. В., Шубенкова М. Ю.* Современный город как антропогенно-природная система // Архитектура и современные информационные технологии. 2020. № 4(53). С. 182–190. DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15311. EDN: HGUIUC.

Поступила в редакцию 12.11.2024 г.

Kalinina Yu. S. **Analysis of the assortment of floral decoration of the Glory Square of the Central Urban district of Makeyevka.** – The paper presents an assessment of the current state of the floral decoration of the Glory Square in Makeyevka. The park is dominated by flower beds in a regular style – flowerbeds. Floral and decorative decoration is represented by 12 species of herbaceous plants. All of them are quite stable in the growing region. The condition of 70 % of the flower beds is rated as excellent. The greatest decorative effect falls on the summer period. The scientific relevance of the problem lies in the need to study the floral assortment used in the design of urban areas in order to further form a qualitative species composition of flower beds based on modern trends in urban landscaping.

Keywords: square, flower beds, assessment of the condition, city, floral and decorative design.

Калинина Юлия Станиславовна
младший научный сотрудник НИЧ ДонГУ,
ассистент кафедры ботаники и экологии
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail : *yu.kalinina91@mail.ru*
ORCID : 0009-0002-2442-0926
AuthorID : 1243335

Kalinina Yulia Stanislavovna
Junior researcher at the Donetsk State University Research Institute, Assistant at the Department of Botany and Ecology of Donetsk State University, Donetsk, DPR, Russian Federation.

УДК 504.064, 504.064.02 DOI: 10.5281/zenodo.14543670 END: GXYDFR

© **Т. А. Ковалева, Н. И. Зазнобина**

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ЗЕЛЕНЫМИ НАСАЖДЕНИЯМИ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫБРОСОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, д. 23

Ковалева Т. А., Зазнобина Н. И. **Оценка эффективности очистки атмосферного воздуха зелеными насаждениями с целью снижения негативного воздействия выбросов производственных объектов. –** В данной статье рассматривается влияние древесно-кустарниковой растительности на качество атмосферного воздуха на примере озелененной территории промплощадки – Приокское ЛПУМГ, филиала ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород». В ходе исследования оценены средообразующие экосистемные услуги, предоставляемые зелеными насаждениями промплощадки: запас и секвестрация углерода, степень очищения атмосферного воздуха. Представлен проект реконструкции озелененной территории промплощадки Приокского ЛПУМГ с целью снижения негативного воздействия выбросов производственного объекта. Проведена сравнительная оценка экосистемных услуг, предоставляемых древесно-кустарниковой растительностью озелененных участков промплощадки и проекта реконструкции озелененной территории. В результате поглотительная и секвестрирующая способность растительности возрастает в 8 и 3 раза, соответственно. Степень очищения атмосферного воздуха от CO в 286 раз, от NO_2 в 5 раз, от SO_2 в 2,3 раза.

Ключевые слова: экосистемные услуги, зеленые насаждения, древесно-кустарниковая растительность, секвестрация углерода, приоритетные загрязняющие вещества, промплощадка.

Введение

Концепция экосистемных услуг в настоящее время является одним из ключевых понятий, описывающих отношения между природными экосистемами и человечеством в рамках устойчивого развития [1]. Особое место в рамках экологически устойчивого развития занимает сохранение качества воздуха. Правительство Российской Федерации реализует комплекс мер по совершенствованию государственного регулирования выбросов парниковых газов. Одними из основополагающих общеэкономических законодательных актов в области снижения антропогенных выбросов парниковых газов и предотвращения изменения климата являются: Указ Президента Российской Федерации «О сокращении выбросов парниковых газов» (2013 г.) и план мероприятий по его реализации (2014 г.), концепция формирования системы мониторинга, отчетности и проверки объема выбросов парниковых газов в Российской Федерации (утверждена в 2015 г., актуализирована в 2018 г.).

ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» является дочерним предприятием ПАО «Газпром», который принял концепцию устойчивого развития. Основная цель Общества – минимизация воздействия на окружающую среду и сохранение благоприятной окружающей среды для настоящего и будущих поколений.

Средообразующие экосистемные услуги (такие как запас и секвестрация углерода, очищение атмосферного воздуха от приоритетных загрязнителей) формируются на разнообразных озелененных участках [3]. Зеленые насаждения на промышленных территориях играют важную роль в улучшении экологической обстановки и создании благоприятных условий для работников. Реконструкция и благоустройство озелененных территорий является важным мероприятием по снижению негативного воздействия на окружающую среду. Комплексный подход к реконструкции зеленых зон включает в себя: подбор пород деревьев и кустарников, устойчивых к загрязнению атмосферного воздуха и обладающих большой поглотительной способностью; создание многоярусных посадок;

© **Ковалева Т. А., Зазнобина Н. И., 2024**

внедрение современных технологий ухода таких как, использование капельного полива, автоматических систем орошения и применение высокоэффективных органических удобрений.

Цель работы – оценить средообразующие экосистемные услуги, предоставляемые зелеными насаждениями промплощадки Приокского ЛПУМГ, предоставить проект реконструкции озелененной территории объекта исследования с целью снижения негативного воздействия выбросов загрязняющих веществ.

Материалы и методы исследования

Объект исследования – промплощадка Приокское ЛПУМГ (Линейное производственное управление магистральных газопроводов) – производственное подразделение ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород». Деятельность филиала в системе ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» направлена на организацию надежной и бесперебойной транспортировки по магистральным трубопроводам природного газа в зоне ответственности филиала и обеспечение потребителей газом. Местоположение объекта исследования: Российская Федерация, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Ларина, д. 11. Площадь объекта исследования – 4 га (41 890м^2). Приокское ЛПУМГ – это типичная промплощадка, характеризующаяся наличием различных зон, таких как производственные, складские, административные, наличием производственных мощностей и хорошо развитой транспортной инфраструктурой. Полученные в результате исследования данные могут быть экстраполированы на подобные объекты Общества.

На начальном этапе исследования идентифицированы следующие средообразующие экосистемные услуги: запас и секвестрация углерода, а также степень очищения атмосферного воздуха от приоритетных загрязняющих веществ зелеными насаждениями. Для оценки средообразующих экосистемных услуг древесно-кустарниковой растительности использовались полевой и расчетные методы.

Полевые методы включали обследование озелененной территории промплощадки Приокского ЛПУМГ. Полная инвентаризация насаждений проводилась в соответствии с полевым руководством «Understanding i-Tree: Summary of Programs and Methods». При инвентаризации в первую очередь учитывается принадлежность объекта к категории «дерево» или «кустарник». Согласно методике i-Tree к категории «дерево» относят любое древесное растение с диаметром на уровне груди (DBH = 1,37 м) большим или равным 2,54 см. Кустарник определяется как любое древесное растение с DBH менее 2,54 см. Однако при инвентаризации кроме установленных параметров при отнесении растения к категории «кустарник» учитывается его вид.

В ходе полевых исследований для каждого дерева оцениваются обязательные параметры, представленные в табл. 1 [5]:

Таблица 1

Основные параметры древесной растительности при инвентаризации

Параметр		Описание
Вид		Систематическое положение (род и вид)
Диаметр (DBH)		Диаметр ствола дерева на высоте 1,37 м
Общая высота дерева		Высота от земли до верхушки (живой или мертвой) дерева
Размер кроны	Высота кроны	Высота от основания до верхушки кроны
	Высота ствола до основания кроны	Высота от земли до основания живой кроны
	Ширина кроны	Ширина кроны в двух направлениях: север-юг и восток-запад
	Процент объема кроны, не занятый	Процент объема кроны, не занятый ветвями и листьями
Процент объема кроны, состоящего из мертвых ветвей		Оценка процента объема кроны, состоящего из мертвых ветвей
Освещенность кроны		Количество сторон дерева, получающих солнечный свет сверху (максимум 5)

На основе измеренных показателей рассчитываются параметры растительности (надземная биомасса, биомасса листьев, площадь листьев, индекс листовой поверхности), которые используются для оценки экосистемных услуг.

В основе расчета запаса углерода лежат аллометрические уравнения для оценки надземной биомассы на основе диаметра ствола. Чтобы получить оптимальное уравнение на основе таксономического положения и информации о климатических зонах в исследовании используется пакет R allodb [2], который объединяет 570 аллометрических уравнений для видов деревьев умеренного пояса.

Секвестрация углерода рассчитывается на основе оценок годового прироста DBH. Все виды деревьев разделены на три категории: быстро-, средне- и медленнорастущие с базовой скоростью роста 0,43; 0,33 и 0,23 см за 153 дня вегетационного периода соответственно. Поправки к базовой скорости роста делаются с учетом длительности вегетационного периода (для Нижегородской области длительность принята за 125 дней).

Количество ежегодно поглощаемого углерода растет с увеличением размера дерева и улучшением его состояния. Монетарная оценка запаса и секвестрации углерода рассчитывается на основе ставки $133 США за тонну углерода по формуле:

$$C_{\text{стоимость}} = \text{C}_{\text{биомасса}} \times \$133 \text{ США},$$

где $\text{C}_{\text{стоимость}}$ – стоимостная оценка ежегодного поглощения диоксида углерода, руб.;

$\text{C}_{\text{биомасса}}$ – запас углерода в пуле биомассы, тонны С $га^{-1}$.

Далее полученное значение стоимости пересчитывается в национальную валюту по соответствующему курсу [8].

Индекс листовой поверхности (Leaf Area Index, LAI) – отношение суммарной площади листьев к площади поверхности земли, рассчитывается по формуле:

$$LAI = \frac{LA}{S},$$

где LA – площадь листьев ($м^2$);

S – площадь земельного участка ($м^2$) определяется по формуле:

$$S=\pi \cdot a \cdot b,$$

где a – длина кроны (м);

b – ширина кроны (м);

π –принимается на уровне 3,14 [8].

Сухое осаждение загрязнителей воздуха на деревья (т. е. удаление загрязнений во время периодов без осадков), и связанное с этим процентное улучшение качества воздуха оценивается с помощью методики «i–Tree Eco Dry Deposition Model Descriptions» [7] и в соответствии с моделью UFORE [7–9]. При этом оцениваются следующие приоритетные загрязнители воздуха: монооксид углерода (CO), диоксид азота (NO_2), диоксид серы (SO_2).

Поток загрязняющих веществ (F) рассчитывается как произведение скорости осаждения (V_d) и содержания концентрации загрязняющих веществ в воздухе (C):

$$F=V_d \cdot C \cdot 3600 \cdot LAI,$$

где F – поток загрязняющих веществ ($г/м^2$);

V_d – скорость осаждения (м/с);

C – концентрация загрязняющих веществ в воздухе ($г/м^3$);

LAI – индекс листовой поверхности [2].

Скорость осаждения (V_d) для CO, NO_2, SO_2 рассчитывается как обратная сумма аэродинамического сопротивления (R_a), сопротивления ламинарного пограничного слоя (R_b) и сопротивление навеса (R_c) вычисляется по формуле:

$$V_d = \frac{1}{(R_a+R_b+R_c)},$$

где V_d – скорость осаждения (м/с);

R_a – аэродинамическое сопротивление (с/м);

R_b – сопротивление ламинарного пограничного слоя (с/м); R_c – сопротивление навеса (с/м) [2].

Общая масса загрязнителя воздуха на единицу древесного покрова, M_{total} (г/м^2) рассчитывается по формуле:

$$M_{total}=H \cdot C,$$

где H – городская высота перемешивания (принимается на уровне 200, м);

C – концентрация загрязнителя воздуха (г/м^3).

В итоге рассчитывается индекс улучшения качества воздуха древесным покровом, I_{total} (%):

$$I_{total} = \frac{F}{M_{total}} \cdot 100\%,$$

где F – поток загрязняющих веществ (г/м^2);

M_{total} – общая масса загрязнителя воздуха на единицу древесного покрова.

Помимо полного удаления загрязняющих веществ рассчитываются также изменения концентрации загрязнителей (ΔC) в воздухе с учетом высоты пограничного слоя:

$$\Delta C = \frac{F}{H},$$

где H – городская высота перемешивания (принимается на уровне 200, м);

F – поток загрязняющих веществ (г/м^2).

Результаты и обсуждение

В ходе исследования проведена полная инвентаризация древесно-кустарниковой растительности промплощадки Приокского ЛПУМГ в соответствии с полевым руководством «Understanding i-Tree: Summary of Programs and Methods». В результате обследовано 62 экземпляра дерева, из которых 84 % относится к лиственным породам, 16 % –хвойные породы (рис. 1).

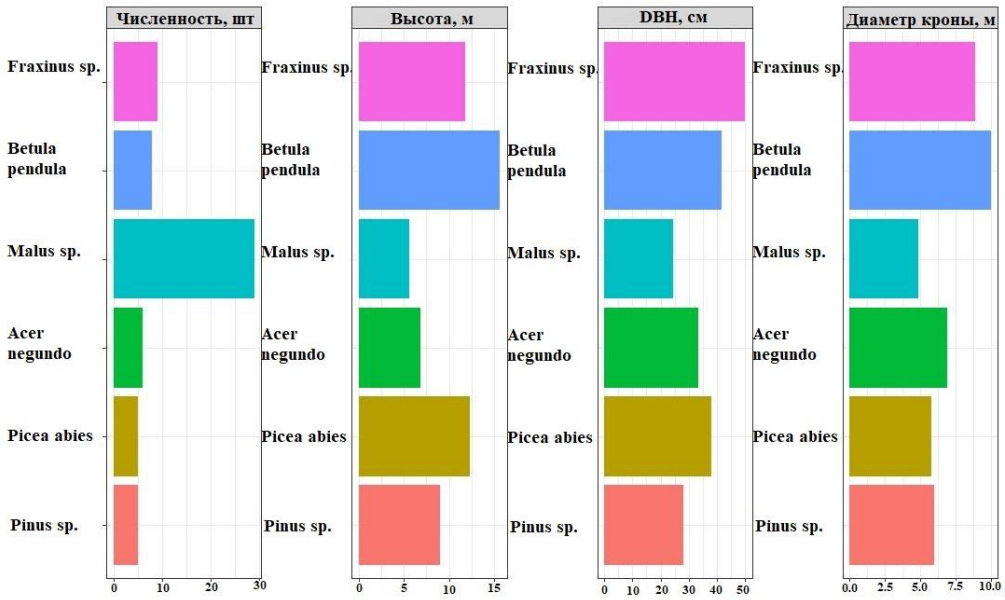


Рис. 1. Структурные характеристики древесной растительности

Разнообразие древесно-кустарниковой растительности представлено 6 видами: *Fraxinus excelsior* (Linnaeus, 1753), *Betula pendula* (Roth, 1788), *Malus domestica* (Borkh, 1803), *Acer negundo* (Linnaeus, 1753), *Picea abies* (Linnaeus, 1881), *Pinus sylvestris* (Linnaeus, 1753). По численности преобладает – *M. domestica*.

Оценка запаса и секвестрации углерода

Согласно расчетам в деревьях озелененной территории промплощадки Приокского ЛПУМГ запасено 26 343,9 кг С. Наибольшее количество приходится на биомассу *F.excelsior* и на *B.pendula*. Секвестрация углерода деревьями составляет 245,05 кг С · год$^{-1}$.

Наибольшим секвестрационным потенциалом на территории промплощадки обладают *F. excelsior* и *M. domestica*. За счет высокой плотности древесины и большой листовой поверхности, деревья обладают более развитой фотосинтетической активностью, что повышает их способность к поглощению углерода (рис. 2.).

Монетарная оценка запасов углерода в деревьях промплощадки составляет 78,8 тыс. руб., секвестрации углерода – 2,9 тыс. руб.

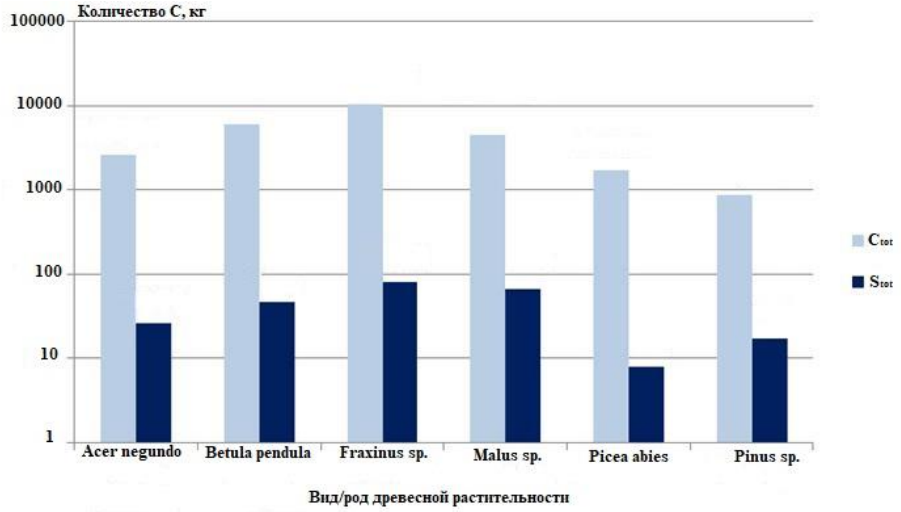


Рис. 2. Результаты оценки запаса и секвестрации углерода по видам/родам древесной растительности

Оценка повышения качества атмосферного воздуха

В результате оценки повышения качества атмосферного воздуха древесным покровом выявлено, что лучше всего осаждается диоксид серы SO_2, в наименьшей степени происходит осаждение монооксида углерода CO (рис. 3).

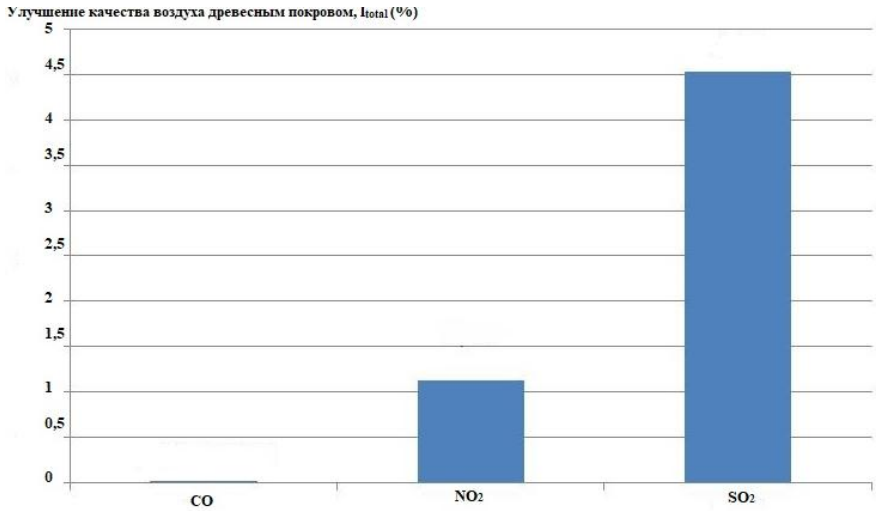


Рис. 3. Улучшение качества воздуха древесным покровом, I_{total} (%) по «i-Tree Eco Dry Deposition Model Descriptions, 2022»

Проект реконструкции озелененной территории промышленной площадки Приокское ЛПУМГ

Использование общепринятой методики I-Tree Eco [7–8] к исследуемой территории Нижнего Новгорода с учетом его климато-географических условий и характерных пород древесно-кустарниковой растительности, позволило создать собственный проект реконструкции озелененной территории промплощадки Приокского ЛПУМГ для оценки средообразующих экосистемных услуг.

Нижегородская область относится к Европейской части лесостепной природно-климатической зоны. Согласно документу «Нормы посадки деревьев и кустарников городских зеленых насаждений» (утверждены распоряжением 11.12.1987 Минжилкомхоз РСФСР, с изменениями на 01.01.2021) [10], одним из факторов, определяющих густоту посадки деревьев и кустарников в городских насаждениях, является функциональное назначение объекта озеленения. Согласно Постановлению Городской думы города Нижнего Новгорода от 17.03.2010 №22 «О генеральном плане города Нижнего Новгорода» озелененная территория промплощадки Приокского ЛПУМГ относится к территории ограниченного пользования. Густота посадки на территории промпредприятий и промплощадок колеблется от 120 до 300 деревьев, варьируя по зонам [10]. Соотношение деревьев и кустарников на территории промышленной площадки должно составлять 1 : 5 – на один экземпляр дерева приходится пять экземпляров кустарников. Процентное соотношение различных групп посадочного материала в основных видах зеленых насаждений: 70 % – деревья средних размеров; 20 % – маломерные деревья; 10 % – крупномерные экземпляры деревьев.

Согласно полученным результатам, монооксид углерода в минимальных количествах поглощается растительностью. Для более эффективного удаления данного поллютанта, руководствуясь исследованиями [8], были отобраны породы древесно-кустарниковой растительности, произрастающие в климатических условиях Нижегородской области и обладающие максимальной способностью поглощения оксидов углерода (рис. 4).

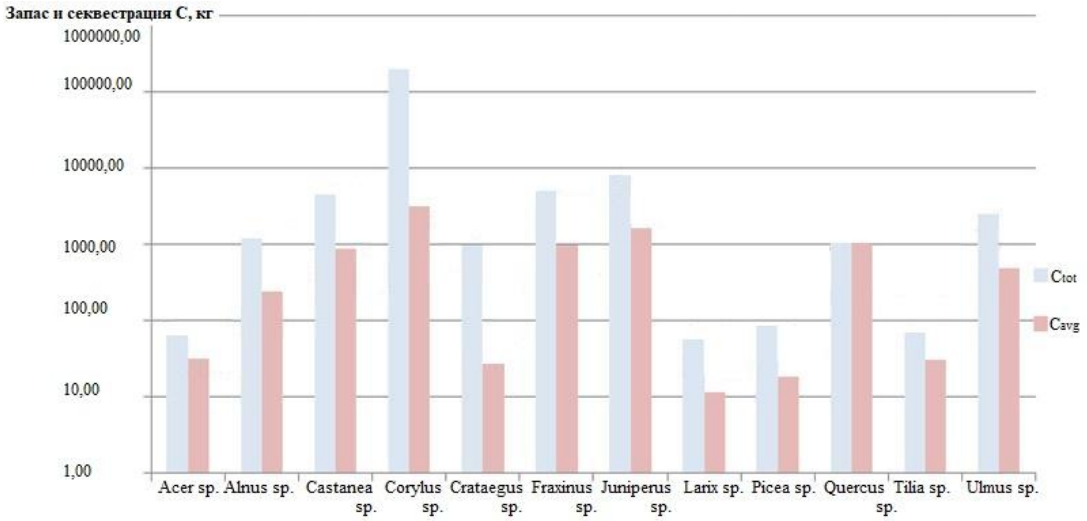


Рис. 4. Результаты оценки запаса и секвестрации углерода по видам древесной растительности согласно проекту реконструкции озелененной территории промплощадки

Согласно «Нормам посадки…» проект реконструкции зеленых насаждений промплощадки Приокского ЛПУМГ включает 148 экз. древесно-кустарниковой растительности – 37 дерева, 111 кустарников (рис. 5).

Рис. 5. Проект реконструкции озелененной территории промплощадки Приокского ЛПУМГ

В результате реализации проекта реконструкции озелененной территории промплощадки Приокского ЛПУМГ количество запасенного деревьями углерода составит 220 284,8 кг, секвестрация углерода древесно-кустарниковой растительностью – 690,9 кг (рис. 5). Монетарная оценка запасов углерода в деревьях промплощадки составит 650,6 тыс. руб., секвестрации углерода – 8,5 тыс. руб. При реализации проекта реконструкции промплощадки Приокского ЛПУМГ экономическая выгода от экосистемных услуг, оказываемых растительностью, увеличится в 8 и 3 раза соответственно.

При реализации предложенного проекта качество атмосферного воздуха повысится: осаждение диоксида серы (SO_2) в 2,3 раза, монооксида углерода (CO) в 286 раз, диоксида азота (NO_2) в 5 раз (рис. 6.)

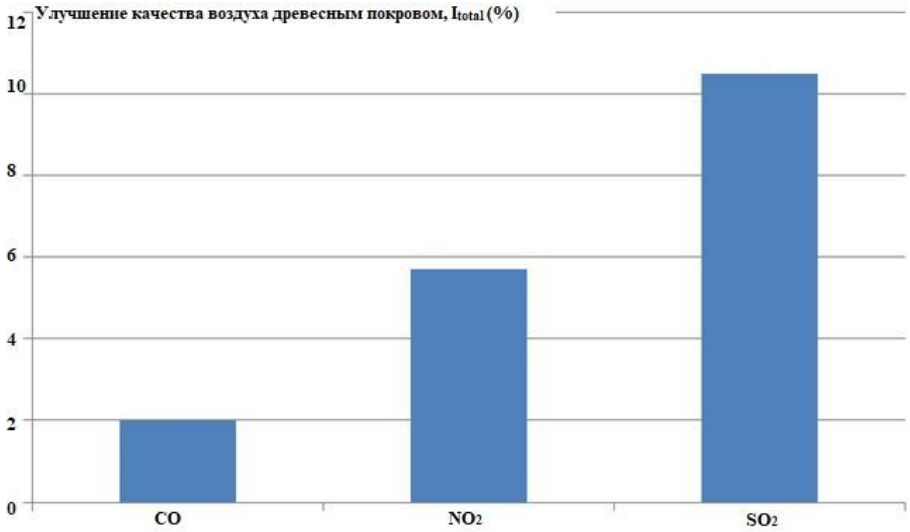


Рис.6. Улучшение качества воздуха древесным покровом, I_{total} (%) по «i-Tree Eco Dry Deposition Model Descriptions, 2022»

Результаты проекта реконструкции озелененной территории промплощадки Приокского ЛПУМГ сопоставимы с результатами, полученными на международном уровне [6] и могут быть экстраполированы на филиалы Общества.

Выводы

В работе оценены средообразующие экосистемные услуги: запас и секвестрация углерода древесно-кустарниковой растительности, а также степень очищения атмосферного воздуха от приоритетных загрязняющих веществ на озелененной территории промплощадки Приокского ЛПУМГ. Проанализировано как внедрение проекта реконструкции зеленых насаждений на промышленной территории влияет на качество и объем предоставляемых средообразующих экосистемных услуг. Результаты исследования показали, что поглотительная и секвестрирующая способность растительности увеличивается в 8 и 3 раза, соответственно. Степень очищения атмосферного воздуха от CO возрастает в 286 раз, от NO_2 в 5 раз, от SO_2 в 2,3 раза.

Проект реконструкции озелененной территории промплощадки Приокского ЛПУМГ был выдвинут как мероприятие по снижению негативного воздействия на окружающую среду в Конкурсе инновационных проектов ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» 2024 года.

Таким образом, внедрение проекта реконструкции озелененных территорий промплощадки может принести значительные социальные, экономические и экологические выгоды, улучшая качество жизни сотрудников за счет снижения уровня загрязнения атмосферного воздуха, повышая привлекательность территории и создавая более устойчивую и здоровую окружающую среду.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FSWR-2023-0032).

Список литературы:

1. *Gomez-Baggethun E., Gren A., Barton D. N., Langemeyer J., McPherson T., O'Farrell P., Andersson E., Hamsted Z., Kremer P.* // Urban ecosystem services. In: Elmqvist, T.T., Fragkias, J., Goodness, B., Guneralp, P.J., Marcotullio, R.I., McDonald, S. (Eds.). Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities. A Global Assessment. Springer, Dordrecht. 2013. P. 175–251.

2. *Gonzalez-Akre E., Piponiot C., Lepore M., Herrmann V., Lutz J. A., Baltzer J. L., Dick C. W., Gilbert G. S., He F., Heym M., Huerta A. I., Jansen P. A., Johnson D. J., Knapp N., Kral K., Lin D., Malhi Y., McMahon S. M., Myers J. A., Anderson-Teixeira K. J.* allodb: An R package for biomass estimation at globally distributed extratropical forest plots // Methods in Ecology and Evolution. 2021. Vol. 13. P. 330–338.

3. *Forman R.* Urban Ecology Science of Cities // University Press, Cambridge. 2014. 462 p.

4. *Hirabayashi S., Kroll C. N., Nowak D. J.* i-Tree Eco dry deposition model descriptions // Washington, DC: U. S. Department of Agriculture, Forest Service. 2015. 46 p.

5. I-Tree. 2016. i-Tree Ecosystem Analysis Grand Rapids. Urban Forest Effects and Values May 2016. http://www.itreetools.org/ (дата обращения: 20.10.2024).

6. *Liang C.* Exploring the "Green" Transformation Planning of Industrial Parks in the Era of Low Carbon Economy . In: World Journal of Engineering and Technology – 2021, Vol. 9. P. 747–754.

7. *Nowak D. J.* UFORE methods // Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, – 2005. – 19 p.

8. *Nowak D. J.* Understanding i-Tree: 2021 summary of programs and methods. General Technical Report // Madison, WI: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. 2021. 100 p.

9. *Nowak D.J.*, Bodine A.R., Hoehn R.E., Edgar C.B., Hartel D.R. Austin's urban forest // Resource Bulletin NRS-100. – Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station.2014. 55 p.

10. *Нормативно-правовой документ:* Об утверждении норм посадки деревьев и кустарников городских зеленых насаждений (с изменениями на 1 января 2021 года): распоряжение Министерства жилищно-коммунального хозяйства РСФСР от 11 декабря 1987 г.

Поступила в редакцию 17.11.2024

***Kovaleva T. A., Zaznobina N. I.* Assessment of the effectiveness of atmospheric air purification by green spaces in order to reduce the negative impact of emissions from production facilities.** – This article examines the influence of woody and shrubby vegetation on the quality of atmospheric air on the example of the landscaped territory of the industrial site – Priokskoye LCMGP, a branch of Gazprom Transgaz Nizhny Novgorod LLC. The study assessed the environmental ecosystem services provided by the green spaces of the industrial site: carbon storage and sequestration, the degree of purification of atmospheric air. A project for the reconstruction of the landscaped territory of the industrial site of the Prioksky LCMGP in order to reduce the negative impact of emissions from the production facility is presented. A comparative assessment of the ecosystem services provided by the woody and shrubby vegetation of the green areas of the industrial site and the project for the reconstruction of the green area was carried out. As a result, the absorption and sequestration capacity of vegetation increases by 8 and 3 times, respectively. The degree of purification of atmospheric air from CO by 286 times, from NO_2 by 5 times from SO_2 by 2.3 times.

Keywords: ecosystem services, green spaces, tree and shrub vegetation, carbon sequestration, priority pollutants, industrial site.

Ковалева Таисия Александровна,
аспирант 2-го года обучения Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, РФ.
E-mail: *kovalevataisia79@gmail.com*
ORCID: 0000-0002-7683-7494
Author ID: 1160175

Kovaleva Taisia Aleksandrovna,
graduate student of the 2nd year of study National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod Oblast, Russian Federation.

Зазнобина Наталья Ивановна,
кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород РФ.
E-mail: *nzaznobina@mail.ru*
ORCID: 0000-0001-8176-0981
Author ID: 797080

Zaznobina Natalya Ivanovna,
Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Ecology of the National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod Oblast, Russian Federation.

УДК: 581.9 + 57.042 DOI: 10.5281/zenodo.14543691 EDN: HDWVZO

© **И. И. Стрельников**

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОЙ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ПРИРОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВИДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛОВ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ВАЛЕНТНОСТИ ИНТРОДУЦЕНТОВ ПО ОТНОШЕНИЮ К ОСНОВНЫМ КЛИМАТИЧЕСКИМ ФАКТОРАМ

ФГБНУ Донецкий ботанический сад
Россия, 283023, ДНР, Донецк, проспект Ильича, 110

Стрельников И. И. **Разработка программной основы построения моделей природного распространения видов для оценки пределов экологической валентности интродуцентов по отношению к основным климатическим факторам**. – Приведены результаты этапов разработки и тестирования схемы моделирования распространения видов (SDM) с использованием пакетов Biomod 2 и Targets на языке программирования R. В качестве объектов исследования были выбраны три вида рода *Aloe* L. коллекции Донецкого ботанического сада, произрастающие в Южной Африке, для анализа данных которых использовалась база Global Biodiversity Information Facility (GBIF). Моделирование включало применение ансамбля различных алгоритмов машинного обучения, таких как обобщенная бустинговая модель (GBM), множественные адаптивные регрессионные сплайны (MARS) и искусственная нейронная сеть (ANN). Это позволило достичь высоких показателей качества моделей, с KAPPA в диапазоне от 0,657 до 0,917 и TSS от 0,74 до 0,943. Разработанная модель продемонстрировала высокую точность и надежность, что делает ее подходящей для дальнейшего масштабирования и использования в крупномасштабных анализах.

Ключевые слова: моделирование распространения видов, экологическая валентность, *Aloe L.*, машинное обучение, климатические факторы, угрозы исчезновения.

Введение

Модели распространения видов (species distribution models, SDM) – это численные инструменты, объединяющие наблюдения за встречаемостью или численностью видов с оценками состояния окружающей среды. Они используются для получения экологических и эволюционных знаний и для прогнозирования распределения видов в пределах ландшафтов. Иногда эти методы подразумевают экстраполяцию в пространстве и времени. SDM сегодня широко используются для моделирования ареалов видов наземных, пресноводных и морских экосистем. Различия в методах между дисциплинами отражают как различия в подвижности видов, так и «устоявшееся использование». На реалистичность и надежность модели влияет выбор соответствующих предикторов и метода моделирования, учет масштаба, то, как обрабатывается взаимодействие между экологическими и географическими факторами, и степень экстраполяции [9].

Ключевые шаги в надлежащей практике моделирования включают следующее: сбор соответствующих данных; оценка их адекватности (точность и полнота видовых данных; актуальность и полнота предикторов); принятие решения о том, как работать с коррелированными переменными-предикторами; выбор соответствующего алгоритма моделирования; подгонка модели к обучающим данным; оценка модели, включая реалистичность подогнанных функций отклика, соответствие модели данным, характеристики остатков и эффективность прогнозирования на тестовых данных; отображение прогнозов в географическом пространстве; выбор порога, если непрерывные прогнозы необходимо свести к бинарной карте; и итерации процесса для улучшения модели в свете знаний, полученных в ходе процесса [2].

Применение методов моделей распространения видов позволит в долгосрочной перспективе получить данные об экологической валентности таксонов из коллекции тропических и субтропических растений Донецкого ботанического сада (ДБС). Это, в свою очередь, будет способствовать обновлению информации о природных ареалах таксонов, что

© **Стрельников И. И., 2024**

необходимо для теоретического обоснования интродукционных исследований. Также это позволит оптимизировать схемы выращивания растений в защищенном грунте, основываясь на уточненных климатических предпочтениях, и опережающе выявлять виды, которые могут оказаться под угрозой исчезновения в ближайшем будущем из-за изменения климата и уменьшения подходящих местообитаний в результате антропогенной деятельности.

В связи с этим актуальным будет разработка программной основы построения моделей природного распространения видов для оценки пределов экологической валентности интродуцентов по отношению к основным климатическим факторам.

Материалы и методы исследования

Подбор картографических материалов для разработки программной основы построения моделей распространения видов проводился по литературным источникам. Первичная обработка материалов выполнена с применением программного комплекса QGIS 3.28 [4]. Основной средой разработки моделей выбран язык программирования R 4.1 [5].

Результаты и обсуждение

Подбор исходных данных для моделирования

Одним из ключевых этапов исследования является выбор источников картографических данных. Основными предикторами, определяющими границы распространения видов, служат климатические переменные. На практике используются климатические данные высокого разрешения (1–5 км), доступные в открытых наборах, таких как WorldClim, GHCN, NCEP, CHELSA. Согласно исследованию [3], набор данных CHELSA (климатология высокого разрешения для участков земной поверхности) демонстрирует наилучшие показатели точности и качества интерполяции. Поэтому в данной работе в качестве основного источника климатических данных выбран CHELSA, включающий текущие климатические нормы (1981–2010 гг.) и долгосрочные прогнозы до 2100 г. на основе сценариев SSP (Shared Socioeconomic Pathways) – SSP1, SSP3, SSP5 [7].

CHELSA представляет собой глобальный набор климатических данных с разрешением 30 угловых секунд (~1 км), размещенный в Швейцарском федеральном институте исследований леса, снега и ландшафта (WSL). Он основан на механистическом статистическом снижении масштаба данных глобального реанализа и предоставляется в свободном доступе.

Основываясь на этом, мы выбрали материалы, предоставляемые CHELSA, как основной источник для оценки влияния климата на распространение видов. В данной работе применяются следующие показатели:

BIO1 – среднегодовая температура,

BIO2 – средний суточный ход (среднее значение месячных температур (максимальная температура – минимальная температура)),

BIO3 – изотермичность (BIO2/BIO7) (×100),

BIO4 – сезонность температуры (стандартное отклонение ×100),

BIO5 – максимальная температура самого теплого месяца,

BIO6 – минимальная температура самого холодного месяца,

BIO7 – годовой диапазон температуры (BIO5-BIO6),

BIO8 – средняя температура самого влажного квартала,

BIO9 – средняя температура самого сухого квартала,

BIO10 – средняя температура самого теплого квартала,

BIO11 – средняя температура самого холодного квартала,

BIO12 – годовое количество осадков,

BIO13 – осадки самого влажного месяца,

BIO14 – осадки самого сухого месяца,

BIO15 – сезонность осадков (коэффициент вариации),

BIO16 – осадки самого влажного квартала,

BIO17 – осадки самого сухого квартала,
BIO18 – осадки самого теплого квартала,
BIO19 – осадки самого холодного квартала,
GDD0 – сумма эффективных температур выше 0оС.

Общее количество климатических карт, используемых для анализа, составляет 260 : 20 переменных для текущего климата и 20 переменных × 4 временных периода × 3 сценария SSP. Общий объем данных составляет ~215 ГБ.

В качестве дополнительного предиктора распространения видов использованы данные об орографических факторах среды. В качестве источника информации, выбрали цифровую модель рельефа (DEM) Copernicus, представляющую собой компиляцию данных из нескольких источников, включая WorldDEM™, ASTER, SRTM и другие [6]. В данной работе применяется набор данных GLO-90 с разрешением 90 м, масштабированный до 1 км.

Антропогенное воздействие является неотъемлемым фактором, предопределяющим современное и будущее распространение видов. Поэтому мы включили в набор исходных данных материалы проекта GCAM-Demeter, предоставляющие прогнозы глобального почвенно-растительного покрова (включая прогнозы урбанизации территории) до 2100 г. с разрешением 0,05° и временным шагом 5 лет по 15 сценариям SSP-RCP [1].

Программное обеспечение моделирования

Процесс моделирования распространения видов включает обработку больших объемов данных (сотни гигабайт) и требует автоматизации для минимизации ошибок и повышения воспроизводимости. Проведя детальный анализ существующих программных решений, мы сделали выбор в пользу пакета Biomod2 для языка R. Данный пакет отличается проработанной документацией, открытым кодом и активным сообществом разработчиков. Функционал пакета позволяет проводить предподготовку данных, включая выделение коллинеарных предикторов, кроссвалидацию, обучение отдельных моделей, оптимизацию макропараметров алгоритмов, ансамблирование результатов моделей, а также содержит обширную базу метрик оценки качества, что делает его универсальным инструментом для моделирования распространения видов [8].

Для дальнейшей автоматизации процесса применили библиотеку targets, которая обеспечивает конвейеризацию вычислений, отслеживая зависимости между данными и кодом. Это позволяет избежать повторного выполнения неизменившихся шагов и повышает эффективность работы.

Тестирование предложенной программно-информационной основы на реальных данных

Для тестирования предложенной программно-информационной основы на реальных данных были выбраны три вида *Aloe* L., произрастающие в Южной Африке (*Aloe africana* Mill., *A. ferox* Mill. и *A. karasbergensis* Giess ex Pillans). В коллекции тропических и субтропических растений ДБС данный род представлен 63 таксонами из них 46 видов и 17 культиваров.

Для работы извлекли из базы данных Global Biodiversity Information Facility (GBIF) соответствующие данные по выбранным нами видам, включая их географические координаты. Затем для каждого вида были отброшены наблюдения, расположенные за пределами их соответствующих родных ареалов, согласно электронным флорам. Примеры пространственного расположения точек – мест наблюдения трех видов рода *Aloe* представлены на рис. 1.

Рис. 1. Пространственное расположения мест наблюдения особей трех видов рода *Aloe* L. – пример данных используемых для построения моделей

Прежде чем приступать к моделированию, стандартизировали все экологические переменные. Были вычислены значения современных климатических переменных в местах обитания видов, затем рассчитаны средние значения и стандартные отклонения. Эти статистические данные впоследствии использовались для преобразования текущих климатических показателей путем вычитания средних значений и деления их на стандартные отклонения.

Для решения проблем, связанных с потенциальной смещенностью выборки, данные о присутствии были подвергнуты пространственному прореживанию с помощью пакета spThin. Для построения моделей использовался ансамбль различных алгоритмов машинного обучения, что позволило снизить неопределенность отдельных моделей и уменьшить риск излишнего обучения.

Применение стратегии трехкратного разделения данных позволило создать тестовый набор, содержащий 30 % записей, а остальные оставить для обучения модели. На некоторых этапах, таких как кросс-валидация, обучающий набор данных дополнительно разбивался случайным образом на отдельные обучающие и проверочные наборы в соотношении 80 : 20. Кросс-валидационные оценки проводились на валидационных наборах, в то время как общая оценка производительности проводилась на отдельном 30-процентном тестовом наборе. Таким образом, стало возможным последовательное сравнение качества прогнозов различных алгоритмов.

Первоначально были обучены девять алгоритмов машинного обучения, предлагаемых Biomod 2: Обобщенная линейная модель (GLM), обобщенная бустинговая модель (GBM), обобщенная аддитивная модель (GAM), искусственная нейронная сеть (ANN), поверхностный диапазон (BIOCLIM), гибкий дискриминантный анализ (FDA), множественные адаптивные регрессионные сплайны (MARS), случайный лес (RF) и максимальная энтропия (MAXENT.Phillips). Отсутствующие точки вводились искусственно, в соответствии с количеством точек присутствия для каждого вида, умноженным на пять. Для каждого вида модели строились на трех итерациях кросс-валидации с использованием 80 % набора данных. Для оценки эффективности использовались ансамбли, включающие результаты всех трех кросс-валидаций, с применением каппы Коэна (KAPPA) и статистики истинного мастерства (TSS) в качестве ключевых показателей.

По результатам оценок качества были отобраны несколько лучших алгоритмов с показателями TSS и KAPPA выше 0,7 – в частности, RF, GBM, MARS и ANN. Последующая оптимизация была направлена на выбор идеальных макропараметров для выбранных алгоритмов с помощью методов поиска по сетке, приоритет отдавался критерию TSS. Десять

раундов перекрестной валидации и распределение данных 80/20 поддерживали оценку каждой комбинации параметров. Значимость переменных для прогнозов оценивалась с помощью процессов рандомизации в Biomod2. Окончательное значение определялось в результате усреднения десяти повторных процедур.

После завершения настройки макропараметров окончательные модели для выдающихся алгоритмов были построены с использованием полных (исходных) обучающих наборов данных без разделения на тестовый и обучающие группы. Прогнозирование распределения включало объединения результатов этих оптимизированных моделей с помощью метода усреднения прогнозов. Индивидуальный вклад пропорционально соответствовал баллу TSS каждой модели. Прогнозы распределения видов привели к всемирному охвату вероятностей присутствия видов в диапазоне от 0 до 1 000. Графическое отображение таких моделей для исследуемых представителей рода *Aloe* представлено на рис. 2.

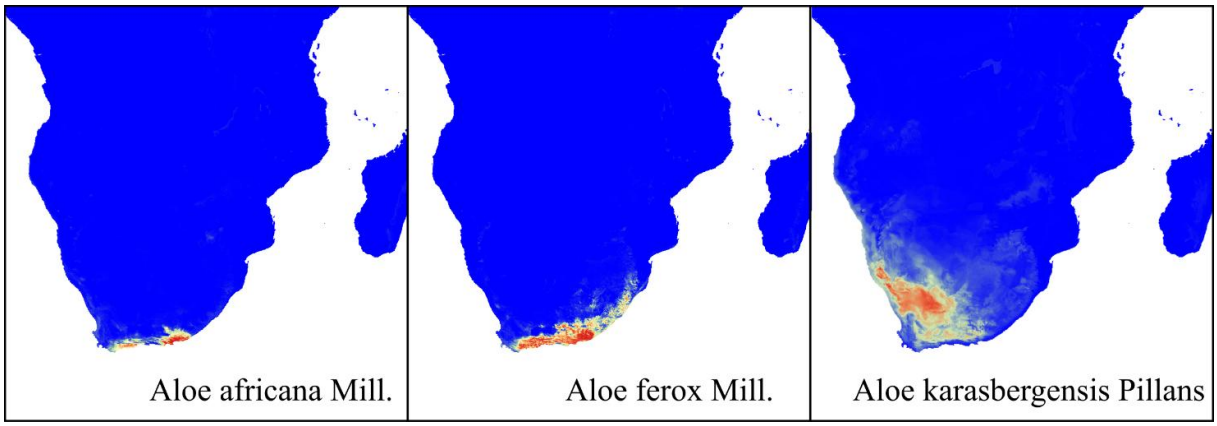


Рис. 2. Графическое отображение финальных усредненных моделей распространения видов. Красный цвет – наиболее подходящие местообитания, синий – местообитания непригодные для произрастания видов

Полученные модели при визуальном инспектировании не вызывают нареканий. Кроме того, удалось достичь высоких показателей KAPPA (от 0,657 до 0,917) и TSS (от 0,74 до 0,943).

Следовательно, выбранная схема моделирования, библиотеки анализа данных и отобранные алгоритмы машинного обучения подходят для дальнейшего масштабирования и использования для крупномасштабного анализа с целью уточнения ареалов видов и определения их экологической валентности к климатическим факторам.

Выводы

С целью получения данных об экологической валентности таксонов из коллекции ДБС на основе методов моделей распространения видов подобрана и протестирована схема моделирования распространения видов на основе пакетов Biomod 2 и Targets языка программирования R. Определены алгоритмы машинного обучения, демонстрирующие наилучшие результаты моделирования, а именно: обобщенная бустинговая модель (GBM), множественные адаптивные регрессионные сплайны (MARS), искусственная нейронная сеть (ANN). Также протестирована схема ансамблирования моделей, построенных на разных итерациях кросс-валидации. Полученные модели показывают высокие показатели целевых метрик качества, что делает их подходящими для дальнейшего масштабирования и использования в крупномасштабных анализах. Это позволит уточнить ареалы видов и определить их экологическую валентность в отношении климатических факторов.

Работа выполнена в рамках государственной темы FREG-2023-0006 «Интродукционное изучение растений мировой флоры и их полифункциональное использование в степной зоне» (Регистрационный номер № 1023020900005-0-1.6.11;1.6.20;1.6.19).

Список литературы:

1. *Chen M., Vernon C.R., Graham N.T., Hejazi M., Huang M., Cheng Y., Calvin K.* Global land use for 2015–2100 at 0.05° resolution under diverse socioeconomic and climate scenarios // Scientific Data. – 2020. – Vol. 7 (1). – P. 320. DOI: 10.1038/s41597-020-00669-x.

2. *Elith J., Leathwick J. R.* Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time // Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics. 2009. Vol. 40, No 1. P. 677–697.

3. *Karger D.N., Conrad O., Böhner J., Kawohl T., Kreft H., Soria-Auza R. W., Zimmermann N. E., Linder H. P., Kessler M.* Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas // Scientific Data. 2017. Vol. 4, No 1. DOI: 10.1038/sdata.2017.122

4. QGIS Development Team, QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation. 2009. – URL: http://qgis.org (дата обращения: 01.11.2024).

5. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. 2017.

6. *Santillan J. R., Makinano-Santillan M.* Vertical accuracy assessment of 30-m resolution alos, aster, and srtm global dems over northeastern Mindanao, Philippines // ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. Vol. XLI-B4, No July. P. 149–156.

7. The Shared Socioeconomic Pathways and their 2 Energy, Land Use, and Greenhouse Gas 3 Emissions Implications: An Overview // AR6 Synthesis Report: Climate Change. 2023. – URL: https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/(дата обращения: 01.11.2024).

8. *Thuiller W., Lafourcade B., Engler R., Araújo B*. BIOMOD – a platform for ensemble forecasting of species distributions // Ecography. 2009. Vol. 32. P. 369–373. DOI: 10.1111/j.1600-0587.2008.05742.x.

9. *Zhang Z., Mammola S., Xian W., Zhang H.* Modelling the potential impacts of climate change on the distribution of ichthyoplankton in the Yangtze Estuary, China // Diversity and Distributions. 2020. Vol. 26. P. 126–137. DOI: 10.1111/ddi.13002.

Поступила в редакцию: 28.11.2024 г.

Strelnikov I. I. **Development of a software framework for constructing species distribution models to assess the limits of the ecological valence of introduced species in relation to the main climatic factors.** – The results of the stages of development and testing of the species distribution modeling scheme (SDM) using the Biomod 2 and Targets packages in the R programming language are presented. Three species of the genus *Aloe* L. were selected as objects of research from the collections of the Donetsk Botanical Garden growing in South Africa, for the analysis of which the Global Biodiversity Information Facility (GBIF) database was used. The simulation included the use of an ensemble of various machine learning algorithms, such as the generalized boosting model (GBM), multiple adaptive regression splines (MARS) and artificial neural network (ANN). This allowed us to achieve high quality indicators of the models, with KAPPA in the range from 0.657 to 0.917 and TSS from 0.74 to 0.943. The developed model has demonstrated high accuracy and reliability, which makes it suitable for further scaling and use in large-scale analyses.

Keywords: species distribution modeling, ecological valence, *Aloe* L., machine learning, climatic factors, threats of extinction.

Стрельников Иван Игоревич,
кандидат биологических наук, заведующий лаборатории экологической информатики и моделирования, старший научный сотрудник лаборатории тропических и субтропических растений ФГБНУ Донецкий ботанический сад
г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: *ivanstrel87@gmail.com*
ORCID: 0000-0002-5580-0641
AuthorID: 56151772700

Strelnikov Ivan Igorevich,
Candidate of Biological Sciences
Head of the Laboratory of Environmental Informatics and Modeling, Senior Researcher at the Laboratory of Tropical and Subtropical Plants of Donetsk Botanical Garden, Donetsk, DPR, Russian Federation.

ФАУНА, ЭКОЛОГИЯ И ОХРАНА ЖИВОТНОГО МИРА
FAUNA, ECOLOGY AND PROTECTION OF THE ANIMAL KINGDOM

УДК 579.842.14 DOI: 10.5281/zenodo.14543728 EDN: FQWILF

© **Л. С. Головко, В. Н. Шевченко, Т. А. Мальцева**

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ САЛЬМОНЕЛЛ В ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ КАК ЭЛЕМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»
Россия, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1

Головко Л. С., Шевченко В. Н., Мальцева Т. А. **Обзор современных подходов к определению сальмонелл в водных экосистемах как элемент обеспечения экологической безопасности.** – Современные методы идентификации сальмонелл в объектах окружающей среды и продуктах питания позволяют корректно оценить степень патогенной нагрузки и, соответственно, своевременно видоизменять текущие меры контроля возникновения и распространения сальмонеллеза. В настоящей работе раскрыты основные характеристики бактерий рода *Salmonella,* приводится обзор современных методов определения сальмонелл в продуктах питания и в водных экосистемах.

Ключевые слова: сальмонеллез, *Salmonella*, определение возбудителя, безопасность пищевых продуктов, аквакультура, экологическая безопасность.

Введение

В настоящее время мировым научным сообществом отмечается значимость антропогенного воздействия на биоценоз. Деятельность человека оказывает влияние не только на макрообъекты окружающей среды, но в том числе и на различные микроорганизмы. Суть изменений заключается в повышение жизнеспособности и устойчивости микробных сообществ к агрессивным факторам окружающей среды, в частности, к дезинфицирующим и противомикробным средствам. Кроме того, наблюдается увеличение доли патогенных штаммов, провоцирующих инфекционные заболевания как среди людей, так и у различных видов животных [26]. Однако, если рассматривать именно зоонозные микроорганизмы, то особое значение для человека приобретают патогены, заражение которыми связано с продуктами питания и фекально-оральным механизмом передачи возбудителя. В исследованиях пищевых заболеваний человека, в особенности вызванных бактериями *Salmonella sp.*, *Campylobacter sp.* и *Escherichia coli*, установление источника возбудителя имеет важное значение для лучшего понимания динамики передачи и разработки эффективных стратегий контроля [60]. Доказано, что контаминация продуктов питания бактериями рода *Salmonella* является одной из наиболее распространенных причин пищевых инфекционных заболеваний в мире [15].

Возбудители сальмонеллеза являются грамотрицательными палочковидными бактериями, характеризующиеся мезофильностью [41]. Род включает два вида: *Salmonella bongori и Salmonella enterica*. В свою очередь *S. enterica* подразделяется еще на несколько подвидов и множество сероваров [15, 74].

Вспышки сальмонеллеза часто ассоциированы с сельскохозяйственными и дикими животными [78], являющимися резервуарами патогена. Кроме того, многие пищевые продукты также связаны со случаями сальмонеллеза [16, 45, 63], вероятно, из-за загрязнения окружающей среды или перекрестного заражения продуктов питания во время их обработки. Сальмонелла является этиологическим агентом брюшного тифа, гастроэнтерита, бактериемии, которые фиксируются у многих видов животных и человека [30]. У сельскохозяйственных животных, включая домашнюю птицу, бессимптомная и

© **Головко Л. С., Шевченко В. Н., Мальцева Т. А., 2024**

персистирующая инфекция в пищеварительном тракте приводит к состоянию бактерионосительства, что еще больше облегчает передачу патогена человеку [70].

Устойчивое присутствие сальмонелл обнаружено в поверхностных водных объектах: реках, озерах, прудах и др. [51]. Необходимость постоянного контроля за этим патогеном подтверждается статистикой заболеваний: ежегодно во всем мире регистрируется около 94 млн. эпизодов гастроэнтерита со 155 тыс. летальных случаев [56]. При орошении сельскохозяйственных культур происходит их контаминация возбудителями сальмонеллеза, тем самым осуществляя передачу патогена к человеку через продукты питания, употребляемых в свежем виде (без термической обработки) [39]. Источником сальмонеллы в поверхностных водах служат недостаточно очищенные сточные воды, в которых концентрация бактерий может достигать $2{,}7\times10^2$ КОЕ/100 мл [37]. Кроме того, многие выделяемые изоляты характеризуются полирезистентностью, демонстрируя устойчивость ко многим антибактериальным лекарственным средствам, среди которых: ампициллин, хлорамфеникол, стрептомицин, сульфаметоксазол, тетрациклин, цефалотин, амоксициллин-клавулановая кислота, цефтриаксон [48, 55]. Отечественными исследователями еще в 1983 г. было установлено, что 95 % штаммов сальмонелл, выделенных из открытых водоемов и сточных вод, обладали резистентностью к антибиотикам, причем более 90 % штаммов характеризовались множественной лекарственной устойчивостью [9].

Изучение микробиологического пейзажа водных объектов является важной составляющей социально-гигиенического мониторинга среды обитания, который позволяет разрабатывать актуальные мероприятия, направленные на профилактику инфекционных болезней, ассоциированных с водной средой [8]. Знание основных современных методик идентификации возбудителя актуально и важно для корректного и своевременного установления диагноза, что, в свою очередь, обеспечивает возможность подбора адекватной терапии для качественного оказания медицинской помощи населению.

Целью настоящего исследования являлся сбор, анализ и систематизация разработанных и апробированных методических подходов к идентификации возбудителей сальмонеллеза в водных экосистемах и пищевых продуктах.

Материал и методы исследования

Обзор литературы выполнен с использованием опубликованных материалов по рассматриваемой тематике в общедоступных электронных библиографических базах данных: Российская государственная библиотека, E-library, КиберЛенинка, PubMed, Science Direct, Scopus, Web of Science и др. Литературный поиск ограничивался ключевыми словами: «аквакультура», «aquaculture», «сальмонеллез», «salmonellosis», «сальмонелла», «*Salmonella*», «определение возбудителя», «pathogen determination», «безопасность пищевых продуктов», «food safety», «экологическая безопасность», «environmental safety», которые использовались как одиночно, так и в различных комбинациях. Период поиска включал в себя диапазон 1970–2024 гг.

Результаты и обсуждение

Основные понятия о сальмонеллезе и бактериях рода *Salmonella*. Сальмонеллезы – это инфекционные заболевания, вызванные бактериями рода *Salmonella*. Эта группа болезней является одной из наиболее распространенных пищевых инфекций, которые по степени тяжести подразделяются на легкие и тяжелые. Легкий сальмонеллез, вызванный нетифозными штаммами *сальмонелл*, характеризуется самокупирующейся диареей, редко приводящей к бактериемии или менингиту [63]. Тяжелые формы сальмонеллеза представлены брюшным тифом, клиническая картина которого включает лихорадку, головную боль, проявление астенического синдрома и иногда кашель [44].

Кратковременная диарея, как правило, не требует специфического лечения, не является жизнеугрожающим состоянием и проходит самостоятельно в течение 1–2 дней. Однако сохранение жидкого стула более 48 ч. или сочетание его с другой симптоматикой, как

лихорадка, боли в животе, наличие патологических примесей в кале, рвота и т. д. являются поводом для начала диагностического поиска, установления диагноза и подбора специфической терапии. Заболевания, сопровождающиеся острым диарейным синдромом, требуют особого внимания со стороны специалистов здравоохранения, т. к. инфекционная диарея находится на втором месте по частоте заболеваемости и смертности по данным мировой статистики. В соответствие со статистикой, представленной Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ), ежегодно около 2 млрд. человек страдают от проявлений диарейного синдрома, а у 2 млн. человек заболевания, сопровождающиеся диареей, приводят к летальному исходу [63]. Причем не менее 30% всех случаев заражения связано с продуктами питания [14].

Большая часть симптоматики, характерной для сальмонеллеза, наблюдается со стороны гастроинтестинальной системы, в частности, может отмечаться боль в животе схваткообразного характера, водянистая диарея, тошнота и рвота, также отмечается лихорадка, головная боль, общая интоксикация и дегидратация организма. Однако могут наблюдаться и генерализованные формы заболевания, протекающие по типу септицемии, септикопиемии и требующие дифференциальной диагностики с другими видами сепсиса [10]. Нетифозные *Salmonella* spp. занимают первое место (28 %) среди основных возбудителей пищевых токсикоинфекций, приводящих к госпитализации и смерти [52, 68]. К другим патогенным штаммам, по литературным данным, при заражении которыми повышается риск летального исхода, относятся *Toxoplasma gondii* (24 %), *Listeria monocytogenes* (19 %) и норовирус из семейства Calviviridae (11 %) [68].

Предварительный диагноз и подозрение на сальмонеллез может устанавливаться на основании клинико-эпидемиологических данных, однако для выставления окончательного диагноза, проведения дифференциальной диагностики с другими группами кишечных заболеваний, требуется выполнение лабораторной диагностики с выделением бактерий рода *Salmonella* spp. из биологических проб (фекалии, кровь, рвотные массы, промывные воды желудка). Дополнительно можно также анализировать желчь, дуоденальное содержимое, ликвор и секционный материал [10]. В очагах с групповой заболеваемостью сальмонеллезом, например, при массовых пищевых отравлениях, с единым источником инфицирования, диагноз может быть выставлен на основании клинико-эпидемиологических сведений в сочетании с данными серологических и молекулярно-генетических методов исследований для раннего установления этиологии заболевания и подбора соответствующей этиотропной терапии [10].

Salmonella – грамотрицательная факультативная анаэробная бактерия, обитающая в кишечнике человека и животных [38]. Резервуарами могут быть различные виды животных [29]. Сальмонеллу также можно обнаружить в воде, окружающей среде и загрязненных пищевых продуктах [38]. Род *Salmonella* делится на два вида: *S. enterica* и *S. bongori*.

S. enterica имеет шесть подвидов: *enterica* (I), *salamae* (II), *arizonae* (IIIa), *diarizonae* (IIIb), *houtenae* (IV) и *indica* (VI) [19]. Известно более 2600 сероваров *S. enterica* (рис. 1) [38]. Серовары не имеют официального таксономического статуса. На рис. 1 для *S. enterica* subsp. *enterica* показаны четыре репрезентативных серовара. Представлены только наиболее распространенные тифозные серовары и репрезентативные нетифозные изоляты [23]. Наиболее распространенные болезнетворные серовары принадлежат к подвиду *S. enterica* subsp. *enterica*.

Сальмонелла может расти в растворе 0,4–4 % хлорида натрия (NaCl) и при температуре от 5 до 47 °C (оптимальный диапазон 32–35 °C) и может функционировать при pH от 4 до 9 (оптимальный диапазон 6,5–7,5 pH). Рост *Salmonella* spp. ингибируется при pH<3,8, температуре <7 °C и активности воды ниже 0,94 [38].

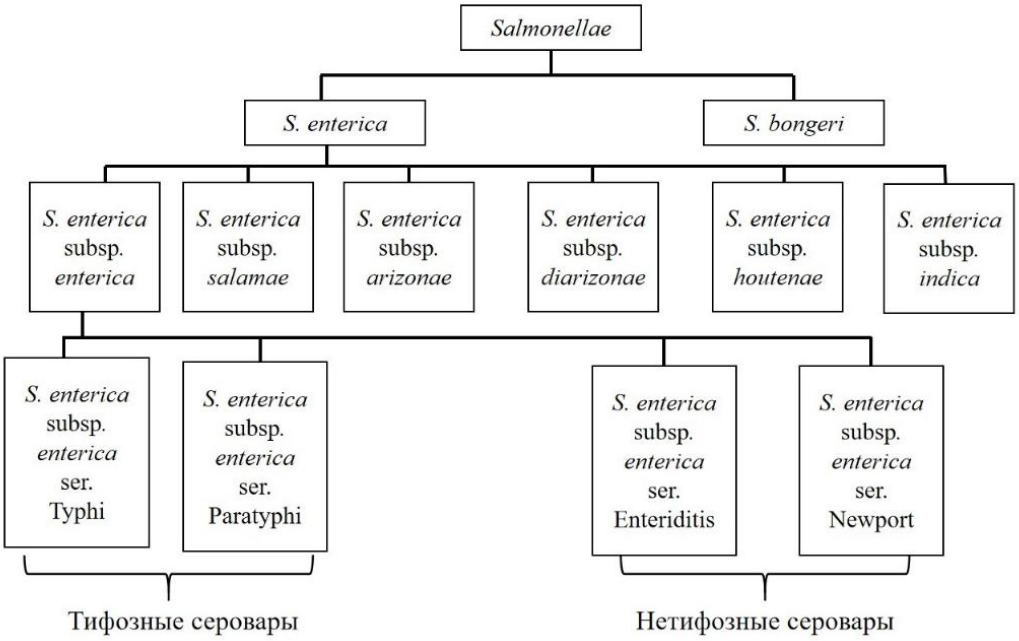


Рис. 1. Классификация бактерий рода *Salmonella* spp. [23]

Клинические проявления, возникающие при инфицировании *сальмонеллой,* обычно протекают по двум совершенно разным направлениям в зависимости от того, является ли заражающий штамм тифозным или нетифозным сероваром. Инфекция нетифозными сероварами обычно проявляется диареей, связанной с лихорадкой и спазмами в животе через 12–72 ч. после заражения [23]. В большинстве случаев у здоровых людей эта инфекция проходит самопроизвольно в течение 4–7 дней, но у пациентов с более высокой восприимчивостью некоторые нетифозные штаммы *сальмонеллы* могут индуцировать возникновение генерализованных форм заболевания. Хотя это чаще встречается у людей с ослабленной иммунной системой или сопутствующими заболеваниями (например, серповидноклеточной анемией), системное распространение нетифозных штаммов *сальмонеллы* может наблюдаться и у здоровых людей [23].

В отличие от заражения нетифозными *сальмонеллами*, заражение тифозными штаммами (а именно серотипами *Typhi* и *Paratyphi*) отличается по клиническим проявлениям, патогенетическим этапам развития заболевания и тяжести инфекционного процесса. Тиф или паратиф представляют собой более серьезную патологию и для постановки правильного диагноза, подбора оптимального метода терапии требуется своевременное проведение лабораторной диагностики. Тяжесть брюшнотифозного сальмонеллеза или паратифа в основном связана с некротическим изъязвлением тонкого кишечника, высоким риском перфорации кишечника и геморрагических осложнений, а также паренхиматозной диффузией возбудителя и возможностью создания вторичных очагов в других органах и тканях [28].

Помимо возможности передачи бактерий рода *Salmonella* от человека к человеку, немаловажным источником распространения болезнетворных микроорганизмов являются дикие и домашние животные, особенно виды сельскохозяйственного назначения. Наиболее эпидемическими значимыми источниками инфекции среди животных можно выделить кур, свиней и крупный рогатый скот [69]. Первоначально у животных может не наблюдаться выраженной симптоматики, однако колонизация сальмонеллами гастроинтестинальной системы, кожи и перьев может приводить к манифестации инфекционного процесса с появлением клинической симптоматики и ведет к значительным экономическим потерям для сельского хозяйства [13].

Ведущим механизмом передачи патогенных штаммов является фекально-оральный путь заражения, особенно при реализации алиментарного (пищевого) пути инфицирования. Среди продуктов питания чаще всего источниками сальмонелл являются яйца, молоко,

молочные продукты, приготовленные из непастеризованного молока, мясо и продукты мясоперерабатывающей отрасли [30]. Кроме того, заражение сальмонеллезом возможно и при употреблении в пищу сырых фруктов и овощей, в случае их перекрестного загрязнения от других инфицированных продуктов питания, загрязнение навозом, отсутствие должной санитарной обработки продовольственных пищевых объектов [59]. Помимо алиментарного пути инфицирования, связанного с поступлением возбудителя сальмонеллеза через продукты питания, контактный путь заражения также является значимым механизмом передачи бактерий [29]. В медицинских организациях госпитальные штаммы сальмонеллы могут передаваться через руки персонала, постельное белье и другие предметы обихода. В сельскохозяйственной отрасли контактный путь передачи возбудителя реализуется через больных животных, а также помещения, где содержали больных особей без последующей обработки и дезинфекции загрязненных поверхностей [29]. Соответственно, один из ведущих путей диссеминации сальмонеллеза – деятельность, связанная с поставкой и реализацией инфицированных животных, а также необработанного сырья животного происхождения. Заражение сырья может происходить в процессе убоя животных на скотобойнях с последующим обсеменением органов и туши животных [81].

Сальмонеллез, в связи с высоким уровнем заболеваемости, легким способом распространения и высокой возможностью возникновения эпидемических вспышек, продолжает оставаться значимой проблемой не только для здравоохранения отдельных стран, но и в целом для системы охраны здоровья населения в мире. Экономические затраты, направленные на профилактику, диагностику, лечение и предупреждение распространения инфекционного процесса являются факторами, которые могут провоцировать дефицит в бюджете, выделенного на здравоохранение [58]. Для определения приоритетов и внедрения корректных целевых мер контроля и профилактики развития сальмонеллеза в пищевой цепочке, крайне важно соотносить случаи развития инфекционных заболеваний у человека с конкретным источником, спровоцировавшим развитие болезни [32].

Распространенность возбудителей сальмонеллеза в водных экосистемах. Возбудители сальмонеллеза присутствуют как в пресноводных, так и морских экосистемах [22]. Частота идентификации сальмонелл в объектах окружающей среды достаточно высока. В неочищенных сточных водах число клеток может достигать 10^3–10^4 КОЕ/л. Более того, бактерии рода *Salmonella* присутствуют в образцах сточных вод, прошедших очистку методами коагуляции, фильтрации и дезинфекции [77]. В водных экосистемах рассматриваемые патогены фиксируются в реках, озерах, прибрежных водах, эстуариях и даже в грунтовых водах [35, 47, 79]. В связи с тем, что поверхностные воды используются для бытовых нужд, сельского хозяйства и рекреации, требуется постоянный контроль за сообществами микроорганизмов, являющихся частью водных экосистем. Сальмонеллы характеризуются способностью сохранять свои свойства в течение длительного периода вегетации водных экосистем, свойственного для южных регионов России [8]. Указывается, что в воде из открытых водоемов эти бактерии могут сохранять физиологическую функциональность до 4–5 месяцев [1, 5].

Санитарно-бактериологическая оценка Нижнего Дона и Цимлянского водохранилища в 2006–2009 гг. показала, что в воде исследованных водоемов присутствовал 31 серовар сальмонелл, что свидетельствует о недостаточной обработке сточных вод, с которыми патогены попадают в водные экосистемы [8]. В 2012–2014 гг. из р. Дон в районах водозаборов, зон рекреации и селитебных зон г. Ростов-на-Дону и г. Азов выделено 230 культур сальмонелл 33 сероваров с доминированием *S. derby, S. typhimurium, S. enteritidis, S. essen, S. reading, S. bredeney, S. heidelberg* и *S. kingston*, при этом анализируемые штаммы были устойчивы к фосфомицину, гентамицину, имипенему, ампициллину, доксициклину, амоксициллину [2].

В течение 2010–2015 гг. в открытых водоемах Ленинградской области идентифицировано 15 серотипов сальмонелл, причем подчеркивалось, что выделенные изоляты способны вызывать вспышки кишечных инфекций [5]. В последующих

исследованиях водоемов этого региона было зарегистрировано уже 164 штамма с доминированием серовара *S. enteritidis* [6].

Исследования участка р. Волга близи г. Астрахань на предмет наличия патогенной флоры позволили зафиксировать 28 штаммов сальмонелл как в летнее время (температура воды 23 °С), так и в зимнее (температура воды 1 °С) [3]. В малых реках, протекающих по сельскохозяйственным территориям Республики Башкортостан, идентифицировано 55 штаммов бактерий рода *Salmonella*. Выделенные изоляты продемонстрировали наибольшую устойчивость к антибиотикам, ингибирующим синтез клеточной стенки: ампициллин, цефолатин, цефостин [1]. В Нижегородской области в течение 1982–2016 гг. было выделено 63 серовара сальмонелл, среди которых доминировал *S. enteritidis* [7].

Таким образом, широкая представленность сальмонелл в различных водных объектах на территориях с отличающимися экологическими условиями и характеризующихся загрязнением хозяйственно-бытовыми сточными водами, свидетельствует о широкой циркуляции этих патогенов. Угроза возникновения вспышек острых кишечных инфекций требует системы постоянного мониторинга, эффективность деятельности которого должна быть основана на использовании лабораторных методов диагностики, чувствительных к возбудителям сальмонеллеза.

«Золотой стандарт» идентификации сальмонеллы. Для реализации эффективных методов профилактики и предупреждения распространения сальмонеллеза требуется использовать высокоэффективные методы лабораторной диагностики, позволяющие быстро и точно верифицировать возбудителя. Своевременная идентификация позволит подобрать корректную терапевтическую и противоэпидемическую стратегии, направленные на всестороннюю борьбу с инфекционным агентом [76]. Несмотря на обширный лабораторный функционал, до сих пор «золотым стандартом» идентификации бактерий рода *Salmonella* является традиционный метод культивирования возбудителя и выделение чистой культуры с последующей верификацией и типированием серовара [76]. Помимо культурального метода также можно выделить еще несколько способов определения возбудителя (рис. 2).

Рис. 2. Современные методы идентификации бактерий рода *Salmonella* spp. [61]

Традиционный, широко распространенный метод, считающийся «золотым стандартом», включает в себя пять последовательных шагов: 1) предварительное обогащение в неселективном бульоне для восстановления поврежденных клеток до стабильного физиологического состояния; 2) селективное обогащение, при котором образец повторно вводится в культуральный бульон, содержащий ингибирующие реагенты, которые стимулируют рост *сальмонеллы*, ограничивая рост многих других бактерий; 3) посев на селективные твердые среды, которые подавляют рост иных бактерий; 4) биохимические тесты для сбора фенотипических данных из изолированных культур; 5) серотипирование для

антигенной характеристики, являющееся финальным этапом в специфической идентификации выделенных культур [71].

Заключительная верификация возбудителя обычно состоит в комбинации фенотипических и серологических подходов. Бактерии рода *Salmonella* spp. типируют согласно классификации Кауфмана-Уайта, основанной на антигенной диагностике и специфической реакции антиген-антитело между антигенами микроорганизма и антителами используемой сыворотки. У сальмонелл выделяют следующие виды антигенов: соматический антиген (О-антиген), жгутиковые антигены Н1 и Н2 и антиген Vi [23]. На группы (A, B, C, D и т.д.) сальмонеллы подразделяются по соматическому антигену, определяющему степень болезнетворности бактерий, а на серовары в пределах одной группы – по Н-антигену. Однако степень встречаемости вышеуказанных антигенов в различных изолятах неодинакова, что и позволяют проводить серологическую идентификацию возбудителя. Так, например, антигены О и Н1 можно выявить почти во всех штаммах сальмонелл, в то время как антигены Н2 обладают большей видоспецифичностью и выявляются только у определенных серотипов микроорганизмов [23]. Антигены типа Vi типируются только у брюшнотифозных штаммов, однако могут также экспрессироваться в *Citrobacter* sp., поэтому не могут использоваться самостоятельно для окончательной идентификации возбудителя и требуют дополнительных методов подтверждения лабораторного заключения [23].

Однако длительное время ожидания стандартного метода является значимым недостатком для немедленного обнаружения сальмонеллы и принятия соответствующих мер по обеспечению пищевой безопасности [46]. Другие недостатки традиционных методов культивирования связаны с их низкой чувствительностью, риском микробного заражения, приводящего к подавлению роста бактерий, которых необходимо идентифицировать, а также наличием жизнеспособных, но некультивируемых бактерий [61].

Альтернативные методы идентификации сальмонеллы. В дополнение к традиционному подходу, для обнаружения сальмонеллы были внедрены несколько альтернативных способов, включая методы, основанные на иммунологии, такие как иммуноферментный анализ (ИФА) и иммунохроматографические анализы с латеральным потоком. Эти методы используют моноклональные или поликлональные антитела, которые специфически связываются с антигенами, присутствующими на клеточной мембране бактерии [72]. Эти антитела могут обнаруживать соматические (О), жгутиковые (Н) или капсульные (Vi) антигены в различных пищевых матрицах [71].

Среди вышеупомянутых анализов ИФА является наиболее широко используемым методом для обнаружения сальмонеллы. При данном способе, когда антигены сальмонеллы присутствуют в образце, они связываются с антителами против сальмонеллы, которые иммобилизованы на твердой матрице. Образование этого комплекса антиген-антитело выявляется с помощью изменения цвета, вызванного ферментативным расщеплением хромогенного субстрата [71]. В 2019 г. коллектив ученых di Febo T. et al. (2019) апробировали тест ИФА, в котором использовались специфические моноклональные антитела, связывающиеся с соматическими или жгутиковыми антигенами для обнаружения *S. enterica* subsp. *enterica* в различных пищевых объектах, достигнув аналогичных результатов по сравнению с общепринятым методом ISO 6579:2002 [24]. Однако из-за проблем с селективностью и чувствительностью для обнаружения сальмонеллы и других патогенов в пищевых продуктах метод ИФА обычно улучшается путем его комбинирования с другими подходами [42]. Улучшения в ИФА включают использование флуоресцентных репортеров [71], ПЦР-амплификацию [73] и электрохемилюминесценцию [62] для усиления верификации сигнала. В частности, использование наночастиц золота в качестве хромогенных репортеров значительно повысило чувствительность ИФА, обеспечивая качественные результаты, на которые указывают изменения цвета в присутствии аналита [71].

Дополнением к этим иммунологическим методам являются молекулярные анализы, которые обнаруживают сальмонеллу посредством гибридизации ДНК- или РНК-зондов или праймеров с определенными микробными последовательностями [40, 50]. Эти способы включают полимеразную цепную реакцию (ПЦР), петлевую изотермическую амплификацию (LAMP, loop-mediated isothermal amplification), амплификацию на основе последовательности нуклеиновых кислот (NASBA, nucleic acid sequence-based amplification) и амплификацию рекомбиназной полимеразы (RPA, recombinase polymerase amplification) [71].

ПЦР является надежным и высокочувствительным методом диагностики, амплифицируя нуклеиновые кислоты для точной идентификации сальмонелл [71]. Такие вариации, как мультиплексная ПЦР [67] и ПЦР в реальном времени (кПЦР) [65], позволяют одновременно обнаруживать несколько патогенов и проводить количественный анализ соответственно. Несмотря на свою эффективность, ПЦР может быть ингибирована определенными пищевыми компонентами, такими как жиры, которые могут мешать процессу амплификации [21].

LAMP – это метод амплификации, который выделяется своей эффективностью и специфичностью в изотермических условиях, используя уникальную ДНК-полимеразу (Bst) и набор из четырех праймеров, которые могут распознавать шесть различных целевых областей на ДНК [53]. Liu N. et al. (2017) разработали мультиплексную LAMP для обнаружения *Salmonella* spp. и *Vibrio parahaemolyticus* со 100% специфичностью [53], а Wu G.P. et al. (2015) предложили систему EMA-RTI-LAMP для обнаружения и количественной оценки *S. enteritidis* [80].

NASBA, еще один метод изотермической амплификации, нацелен на РНК с помощью механизма, основанного на транскрипции [36]. Он обеспечивает высокую селективность и нивелирует некоторые проблемы, связанные с ПЦР. Эффективность и чувствительность этого метода для идентификации сальмонелл подтверждается в том числе и на практике [71].

RPA является передовым методом изотермической амплификации, который быстро амплифицирует всего 1–10 целевых копий ДНК в течение 20 минут [54]. Он использовался для амплификации одноцепочечной ДНК, двухцепочечной ДНК, РНК и микроРНК из самых разных образцов и организмов [20]. RPA эффективно использовался для обнаружения *сальмонелл* в образцах пищевых продуктов [33].

Представленные методы обеспечивают хорошую чувствительность и специфичность при идентификации патогенных бактерий, однако они не лишены ограничений. Например, некоторые иммунологические анализы требуют предварительного обогащения образца для увеличения количества бактерий до обнаруживаемых уровней. Перекрестная реактивность с похожими антигенами из разных сероваров сальмонелл или родственных бактерий, вариации антигенности, эффекты матрицы образца и затраты на автоматизацию анализа также являются проблемой [72], не говоря уже о трудоемких процессах экстракции и очистки [71]. Более того, эффективность сильно зависит от конкретной микробиоты в образце, типа пищевого объекта и любых присутствующих ингибирующих веществ [71].

Иммунохроматографические методы (LFA, lateral flow immunochromatographic assays) обладают рядом преимуществ по сравнению с вышеупомянутыми методами, обеспечивая быстрые результаты, хорошую специфичность, высокую чувствительность и низкие пределы обнаружения. Несмотря на то, что этот метод не позволяет идентифицировать серотипы сальмонелл, эти биосенсоры экономичны в производстве, удобны в использовании и просты в интерпретации результатов, предлагая, как качественные, так и количественные результаты [71, 75]. Иммунохроматографический анализ заключается в реализации взаимодействия антигена с соответствующим ему антителом в биологическом материале. В качестве антител могут использоваться аптамеры, нуклеиновые кислоты, белки, антилиганды или бактериофаги, которые специально нацелены на связывание целевых антигенов. Такая высокоспецифическая реакция позволяет выявить даже минимальные концентрации определяемого вещества. Для проведения иммунохроматографического анализа могут использоваться тест-полоски [4]. Существует два различных формата LFA: сэндвич-формат

(прямой) и конкурентный (непрямой) [71]. Сэндвич-анализ используется для обнаружения молекул с высокой молекулярной массой, таких как крупные белки, которые, как и сальмонелла, содержат несколько антигенных участков. С другой стороны, конкурентный анализ используется для обнаружения молекул с низкой молекулярной массой с одним антигеном для связывания антитела [57]. LFA предлагают несколько преимуществ по сравнению с традиционными методами и становятся все более популярными в обнаружении патогенов, последовательно продвигаясь к решению проблем биологической безопасности. Они являются быстрыми, недорогими, портативными, чувствительными и специфичными анализами, в дополнение к тому, что они удобны для пользователя и просты в интерпретации. Однако чувствительность многих LFA, описанных в литературе, недостаточна для соответствия нормативным пределам, необходимым для обнаружения патогенных штаммов. В большинстве случаев для дополнения LFA при обнаружении *сальмонеллы* используются традиционные методы «золотого стандарта» или ПЦР. Учитывая сложность компонентов в различных пищевых матрицах, аналитическая эффективность LFA снижается при тестировании на реальных образцах [71].

Важность роли бактерий рода *Salmonella* в аквакультуре. В настоящее время все больше увеличивается доля аквакультурной отрасли среди других сельскохозяйственных направлений. Наблюдается интенсификация аквакультуры, что увеличивает концентрацию рыб и других товарных объектов на крупных фермах и рыбоводческих хозяйствах, что повышает риски возникновения бактериальных заболеваний среди выращиваемых особей [12, 18]. Рыбоводческая отрасль является динамично развивающимся направлением сельского хозяйства. С учетом тенденции к интенсификации аквакультуры и более высоким риском развития инфекционных заболеваний у гидробионтов, контроль распространенности *Salmonella* spp. в водных экосистемах и товарах рыбоводческого хозяйства на всех этапах производства продукции, важен как в рамках сохранения здоровья населения, так и для минимизации затрат государства [64]. В литературных источниках достаточно мало описан сальмонеллез у рыб, в связи с маловыраженными или полностью отсутствующими клиническими проявлениями болезни, а также вследствие кратковременного периода носительства штаммов *Salmonella* spp. среди разных видов рыб [27, 31, 49].

В процессе лабораторной диагностики и оценки микробного пейзажа было выявлено, что помимо внутренних органов, штаммы сальмонеллы выделялись также из жабр и кожи рыб. В связи с наличием нескольких патогенных очагов увеличивается вероятность перекрестного инфицирования в процессе производственного цикла. Что в свою очередь обуславливает усиление мер микробиологического и технохимического контроля на предприятиях рыбоводческой отрасли на всех этапах производства, переработки, хранения и распространения продуктов на основе рыбоводного сырья. Высокая степень зараженности гидробионтов и сырья на их основе на предприятиях аквакультурной отрасли может свидетельствовать о недостаточном соблюдение санитарно-гигиенических норм, а также отсутствии должного дезинфицирования применяемого оборудования, поверхностей, тары, контактировавших с зараженной продукцией [11, 25, 34].

Всесторонняя оценка качества воды, в том числе физико-химических и микробиологических показателей, имеет важное значение для модуляции уровней здоровья гидробионтов, что, соответственно, оказывает выраженный эффект на темпы развития аквакультурной отрасли [64]. Вода может являться одним из основных источников инфицирования, так как уровень её санитарно-эпидемиологической безопасности может меняться в связи с антропогенным, сельскохозяйственным и промышленным негативным влиянием [43, 64, 66]. Помимо пищевого пути инфицирования, другим вариантом фекально-орального механизма передачи сальмонеллеза может являться водный путь, где, соответственно, источники питьевой воды и другие объекты поверхностных и морских вод могут выступать как источники распространения штаммов сальмонеллы. В литературе приводятся сведения о связи загрязнения рыбохозяйственного сырья посредством попадания возбудителей сальмонеллеза из морских вод и поверхностных водных объектов [17, 64].

Низкое качество очистки сточных вод или непосредственное их излитие в пресноводные объекты является источником инфицирования бактериями рода *Salmonella* spp. прибрежных вод, включая участки выращивания моллюсков и рыбы [64]. Присутствие штаммов *Salmonella* spp. в водных объектах, даже в низкой концентрации, свидетельствует о фекальном заражении водного источника, а также о неблагополучной эпидемиологической обстановке и повышенном риске вспышек сальмонеллеза как среди сельскохозяйственных видов животных, так и среди населения. Что в свою очередь обуславливает повышенный интерес со стороны органов государственного надзора для обеспечения общественного здоровья и благополучия граждан. Поэтому с помощью современных методов лабораторной диагностики, источники и пути распространения патогенных возбудителей, в том числе *Salmonella* spp., должны отслеживаться и контролироваться для реализации государственных программ в области здравоохранения, а сами способы идентификации патогенов должны непрерывно совершенствоваться [64].

Развитие методов лабораторной верификации возбудителей инфекционных заболеваний, в том числе пищевых токсикоинфекций, а также обнаружение их на всех этапах производственной цепочки, необходимо для обеспечения эпидемиологической безопасности продовольственных продуктов и снижение вероятности развития эпидемических вспышек сальмонеллеза. Своевременное и правильное определение возбудителя патогенного процесса помогает не только подобрать соответствующую этиотропную терапию и определить стратегию снижения риска дальнейшей диссеминации инфекционных агентов, но также уменьшить конечные экономические затраты и ущерб общественному здоровью. Употребление в пищу некачественных продуктов рыбохозяйственной отрасли повышает риск развития патологического процесса и несет в себе угрозу для здоровья населения, что делает оценку и контроль вопросов безопасности продуктов питания глобальной проблемой [64].

Имеющиеся сведения демонстрируют важность объектов аквакультуры как потенциальных резервуаров и источников распространения сальмонелл. Это должно служить маркером необходимости усиления мер контроля по распространению штаммов бактерий рода *Salmonella* в товарных объектах аквакультуры и принятию профилактических мер по снижению риска распространения и перекрестного инфицирования в системах разведения и производства и, следовательно, предотвратить риск возникновения вспышек сальмонеллеза у людей.

Выводы

Таким образом, традиционный микробиологический метод верификации бактерий рода *Salmonella* spp. является «золотым стандартом» как в диагностике сальмонеллеза, так и в обнаружении патогенных возбудителей в пищевых продуктах и водных экосистемах. Тем не менее, длительность выполнения классического метода лабораторной диагностики предопределяет необходимость расширения диагностического арсенала. Применение иммунологических, иммунохроматографических и молекулярно-генетических методов позволяют облегчить процесс идентификации возбудителя, ускорить процесс постановки правильного клинического диагноза, в кратчайшие сроки начать соответствующую этиотропную терапию и определить стратегию эпидемиологического контроля при возникновении риска развития эпидемической вспышки как среди населения, так и среди сельскохозяйственных видов животных. Современные диагностические методы позволяют не только существенно сократить сроки исследования, но и повысить качество проведения лабораторной диагностики, а также обеспечивают надежную идентификацию бактерий рода *Salmonella* spp.

Работа проведена в рамках выполнения проекта «Разработка персонифицированных кормов нового поколения с растительными и пробиотическими добавками для повышения выживаемости и улучшения здоровья рыб» (FZNE-2023-0003).

Список литературы

1. *Абдюкова Э. А.* Исследование распространения в поверхностных водоемах антибиотикоустойчивых штаммов энтеробактерий // Стратегия устойчивого развития регионов России. 2012. No 10. С. 109–111.

2. *Алешня В. В., Панасовец О. П., Журавлёв П. В., Артёмова Т. З., Гипп Е. К., Загайнова А. В.* Изучение влияния отдельных факторов окружающей среды на жизнеспособность сальмонелл в воде для определения её эпидемического потенциала // Гигиена и санитария. 2015. Т. 94, No 7. С. 40–42.

3. *Андросова С. В., Першин Е. Я., Мацуга Т. П., Карбышева С. П., Фридман В. В., Савина Л. Г.* Распространение сальмонелл в открытых водоемах // Гигиена и санитария. 1980. No 9. С. 87–87.

4. *Андрюков Б. Г., Ляпун И. Н., Бынина М. П., Матосова Е. В.* Упрощённые форматы современных биосенсоров: 60 лет использования иммунохроматографических тест-систем в лабораторной диагностике // Клиническая лабораторная диагностика. 2020. Т. 65, No 10. С. 611–618. DOI: 10.18821/0869-2084-2020-65-10-611-618.

5. *Гречанинова А., Григорьева Н. С., Кича Е. В., Черепанова Н. В., Кафтырева Л. А.* Мониторинг сальмонелл, выделенных в открытых водоемах Санкт-Петербурга в 2010–2015 гг. // Инфекция и иммунитет. 2016. Т. 6, No 3. С. 19.

6. *Григорьева Н. С., Крошко О. Н., Кича Е. В., Черепанова Н. В.* Мониторинг сальмонелл, циркулирующих в открытых водоемах Санкт-Петербурга // Проблемы медицинской микологии. Учредители: Северо-Западный государственный медицинский университет им. И. И Мечникова. 2022. Т. 24, No 2. С. 64.

7. *Дерябина О. И., Морцев В. В., Сидорова В. Ф.* Санитарно-бактериологический контроль за циркуляцией сальмонелл в объектах внешней среды в Нижегородской области // Инфекция и иммунитет. 2017. No S. С. 921–921.

8. *Журавлев П. В., Алешня В. В., Головина С. В., Панасовец О. П., Недачин Е. А., Галаева Ю. Г., Артемова Т. З., Гипп Е. К., Загайнова А. В., Буторина Н. Н.* Мониторинг бактериального загрязнения водоемов Ростовской области // Гигиена и санитария. 2010. No 5. С. 35–38.

9. *Яковлева О. Н., Талаева Ю. Г.* Изучение распространения и выживаемости антибиотикорезистентных сальмонелл в воде // Гигиена и санитария. 1983. No 7. С. 77–79.

10. *Andrews J. R., Ryan E. T.* Diagnostics for invasive Salmonella infections: Current challenges and future directions // Vaccine. 2015. Vol. 33, No Suppl 3(0 3). P. C8–C15. DOI: 10.1016/j.vaccine.2015.02.030.

11. *Antunes P., Campos J., Mourão J., Pereira J., Novais C., Peixe L.* Inflow water is a major source of trout farming contamination with Salmonella and multidrug resistant bacteria // Sci. Total Environ. 2018. Vol. 642. P. 1163–1171. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.143.

12. *Arunkumar M., LewisOscar F., Thajuddin N., Pugazhendhi A., Nithya C.* In vitro and in vivo biofilm forming Vibrio spp: A significant threat in aquaculture // Process Biochem. 2020. Vol. 94. P. 213–223. DOI: 10.1016/j.procbio.2020.04.029.

13. *Ayuti S. R., Khairullah A. R., Al-Arif M. A., Lamid M., Warsito S. H., Moses I. B., Hermawan I. P., Silaen O. S. M., Lokapirnasari W. P., Aryaloka S., Ferasyi T. R., Hasib A., Delima M.* Tackling salmonellosis: A comprehensive exploration of risks factors, impacts, and solutions // Open veterinary journal. 2024. Vol. 14, No 6. P. 1313–1329. DOI: 10.5455/OVJ.2024.v14.i6.1.

14. *Besser J. M.* Salmonella epidemiology: A whirlwind of change // Food Microbiol. 2018. Vol. 71. P. 55–9. DOI: 10.1128/10.1016/j.fm.2017.08.018.

15. *Cardim Falcao R., Edwards M. R., Hurst M., Fraser E., Otterstatter M.* A Review on Microbiological Source Attribution Methods of Human Salmonellosis: From Subtyping to Whole-Genome Sequencing // Foodborne Pathog Dis. 2024. Vol. 21, No 3. P. 137–146. DOI: 10.1089/fpd.2023.0075.

16. *Carstens C. K., Salazar J. K., Darkoh C.* Multistate outbreaks of foodborne illness in the United States associated with fresh produce from 2010 to 2017 // Front Microbiol. 2019. Vol. 10. P. 2667. DOI: 10.3389/fmicb.2019.02667.

17. *Casanova L. M., Sobsey M. D.* Antibiotic-Resistant Enteric Bacteria in Environmental Waters // Water. 2016. Vol. 8. P. 561. DOI: 10.3390/w8120561.

18. *Cascarano M. C., Stavrakidis-Zachou O., Mladineo I., Thompson K. D., Papandroulakis N., Katharios P.* Mediterranean Aquaculture in a Changing Climate: Temperature Effects on Pathogens and Diseases of Three Farmed Fish Species // Pathogens. 2021. Vol. 10. P. 1205. DOI: 10.3390/pathogens10091205.

19. *Chattaway M. A., Langridge G. C., Wain J.* Salmonella nomenclature in the genomic era: A time for change // Sci. Rep. 2021. Vol. 11. P. 7494. DOI: 10.1038/s41598-021-86243-w.

20. *Chen J., Liu X., Chen J., Guo Z., Wang Y., Chen G., Chen X., Yan Q., Yang P., Li R., Yang G., Lan Q., Wang J.* Development of a rapid test method for Salmonella enterica detection based on fluorescence probe-based recombinase polymerase amplification // Food Anal. Methods. 2019. Vol. 12. P. 1791–1798. DOI: 10.1007/s12161-019-01526-3.

21. *Cossu A., Levin R. E.* Rapid conventional PCR and real-time-qPCR detection of low numbers of Salmonella enterica from ground beef without enrichment // Food Biotechnol. 2014. Vol. 28. P. 96–105. DOI: 10.1080/08905436.2014.895946.

22. *Crim S. M., Iwamoto M., Huang J. Y., Griffin P. M., Gilliss D., Cronquist A. B., Cartter M., Tobin-D'Angelo M., Blythe D., Smith K., Lathrop S., Zansky S., Cieslak P. R., Dunn J., Holt K. G., Lance S., Tauxe R., Henao O. L.* Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Incidence and trends of infection with pathogens transmitted commonly through food – Foodborne Diseases Active Surveillance Network, 10 US sites, 2006–2013 // MMWR Morb Mortal Wkly Rep. 2014. Vol. 63, No 15. P. 328–32.

23. *Dekker J. P., Frank K. M.* Salmonella, Shigella, and yersinia // Clinics in laboratory medicine. 2015. Vol. 35, No 2. P. 225–246. DOI: 10.1016/j.cll.2015.02.002.

24. *Di Febo T., Schirone M., Visciano P., Portanti O., Armillotta G., Persiani T., Di Giannatale E., Tittarelli M., Luciani M.* Development of a capture ELISA for rapid detection of Salmonella enterica in food samples // Food Anal. Methods. 2019. Vol. 12. P. 322–330. DOI: 10.1007/s12161-018-1363-2.

25. *Dib A.L., Agabou A., Chahed A., Kurekci C., Moreno E., Espigares M., Espigares E.* Isolation, molecular characterization and antimicrobial resistance of enterobacteriaceae isolated from fish and seafood // Food Control. 2018. Vol. 88. P. 54–60. DOI: 10.1016/j.foodcont.2018.01.005.

26. *Dietrich J., Hammerl J. A., Johne A., Kappenstein O., Loeffler C., Nöckler K., Rosner B., Spielmeyer A., Szabo I., Richter M. H.* Impact of climate change on foodborne infections and intoxications // Journal of Health Monitoring. 2023. Vol. 8, No Suppl 3. P. 78. DOI: 10.25646/11403.

27. *dos Santos R. R., Xavier R.G.C., de Oliveira T. F., Leite R. C., Figueiredo H. C. P., Leal C. A. G.* Occurrence, genetic diversity, and control of *Salmonella enterica* in native Brazilian farmed fish // Aquaculture. 2019. Vol. 501. P. 304–312. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2018.11.034.

28. *Dougan G., Baker S.* Salmonella enterica serovar Typhi and the pathogenesis of typhoid fever // Annual review of microbiology. 2014. Vol. 68. P. 317–336. DOI: 10.1146/annurev-micro-091313-103739.

29. *Ehuwa O., Jaiswal A. K., Jaiswal S.* Salmonella, Food Safety and Food Handling Practices // Foods. 2021. Vol. 10. P. 907. DOI : 10.3390/foods10050907.

30. *Eng S. K., Pusparajah P., Ab Mutalib N. S., Ser H. L., Chan K. G., Lee L. H.* Salmonella: a review on pathogenesis, epidemiology and antibiotic resistance // Front. Life Sci. 2015. Vol. 8, No 3. P. 284–293. DOI: 10.1080/21553769.2015.1051243.

31. *Fernandes D. V. G. S., Castro V. S., Neto A. d. C., Figueiredo E. E. d. S. Salmonella* spp. in the fish production chain: A review // Ciência Rural. 2018. Vol. 48. P. e20180141. DOI: 0.1590/0103-8478cr20180141.

32. *Ferrari R. G., Panzenhagen P. H. N., Conte-Junior C. A.* Phenotypic and Genotypic Eligible Methods for *Salmonella* Typhimurium Source Tracking // Frontiers in microbiology. 2017. Vol. 8. P. 2587. DOI: 10.3389/fmicb.2017.02587.

33. *Gao W., Huang H., Zhu P.* Recombinase polymerase amplification combined with lateral flow dipstick for equipment-free detection of Salmonella in shellfish // Bioprocess Biosyst. Eng. 2018. Vol. 41. P. 603–611. DOI: 10.1007/s00449-018-1895-2.

34. *Gazal L. E. de S., de Brito K. C. T., Cavalli L. S., Kobayashi R. K. T., Nakazato G., Otutumi L. K., da Cunha A. C., Pires Neto J. A. S., de Brito B. G.* Salmonella sp. in fish—What is the importance for health in fish farm? // Pesqui. Agropecuária Gaúcha. 2018. Vol. 24. P. 55–64. DOI: 0.36812/pag.2018241/255-64.

35. *Haley B. J., Cole D. J., Lipp E. K.* Distribution, diversity, and seasonality of waterborne salmonellae in a rural watershed // Applied and environmental microbiology. 2009. Vol. 75, No 5. P. 1248-1255. DOI: 10.1128/AEM.01648-08.

36. *Hønsvall B. K., Robertson L. J.* From research lab to standard environmental analysis tool: Will NASBA make the leap? // Water Res. 2017. Vol. 109. P. 389–397. DOI: 10.1016/j.watres.2016.11.052.

37. *Howard I., Espigares E., Lardelli P., Martín J. L., Espigares M.* Evaluation of microbiological and physicochemical indicators for wastewater treatment // Environmental Toxicology: An International Journal. 2004. Vol. 19, No 3. P. 241–249. DOI: 10.1002/tox.20016.

38. *Jajere S. M.* A review of Salmonella enterica with particular focus on the pathogenicity and virulence factors, host specificity and antimicrobial resistance including multidrug resistance // Vet. World. 2019. Vol. 12. P. 504–552. DOI: 10.14202/vetworld.2019.504-521.

39. *Jones L. A., Worobo R. W., Smart C. D.* Plant-pathogenic oomycetes, *Escherichia coli* strains, and *Salmonella* spp. frequently found in surface water used for irrigation of fruit and vegetable crops in New York State // Applied and Environmental Microbiology. 2014. Vol. 80, No 16. P. 4814-4820. DOI: 10.1128/AEM.01012-14.

40. *Kang J., Kim M.-G.* Advancements in DNA-assisted Immunosensors // BioChip J. 2020. Vol. 14. P. 18–31. DOI: 10.1007/s13206-020-4103-9.

41. *Keerthirathne T. P., Ross K., Fallowfield H., Whiley H.* A review of temperature, pH, and other factors that influence the survival of Salmonella in mayonnaise and other raw egg products // Pathogens. 2016. Vol. 5, No 4. P. 63. DOI: 10.3390/pathogens5040063.

42. *Kim S.-O., Kim S.-S.* Bacterial pathogen detection by conventional culture-based and recent alternative (polymerase chain reaction, isothermal amplification, enzyme linked immunosorbent assay, bacteriophage amplification, and gold nanoparticle aggregation) methods in food samples: A review // J. Food Saf. 2021. Vol. 41. P. e12870. DOI: 10.1111/jfs.12870.

43. *Klase G., Lee S., Liang S., Kim J., Zo Y., G. Lee J.* The microbiome and antibiotic resistance in integrated fishfarm water: Implications of environmental public health // Sci. Total Environ. 2019. Vol. 649. P. 1491–1501. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.288.

44. *Kumar P., Kumar R.* Enteric fever // Indian J Pediatr. 2017. Vol. 84. P. 227–30. DOI: 10.1007/s12098-016-2246-4.

45. *Laughlin M., Bottichio L., Weiss J., Higa J., McDonald E., Sowadsky R., Fejes D., Saupe A., Provo G., Seelman S., Concepción-Acevedo J., Gieraltowski L., Outbreak Investigation Team.* Multistate outbreak of *Salmonella* Poona infections associated with imported cucumbers, 2015–2016 // Epidemiol Infect. 2019. Vol. 147. P. e270. DOI: 10.1017/s0950268819001596.

46. *Lee K., Runyon M., Herrman T. J., Phillips R. W., Hsieh J. J.* Review of Salmonella detection and identification methods: Aspects of rapid emergency response and food safety // Food Control. 2015. Vol. 47. P. 264–276. DOI: 10.1016/j.foodcont.2014.07.011.

47. *Levantesi C., La Mantia R., Masciopinto C., Böckelmann U., Ayuso-Gabella M. N., Salgot M., Tandoi V., Van Houtte E., Wintgens T., Grohmann E.* Quantification of pathogenic microorganisms and microbial indicators in three wastewater reclamation and managed aquifer recharge facilities in Europe // Science of the Total Environment. 2010. Vol. 408, No 21. P. 4923–4930. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.07.042.

48. *Li B., Vellidis G., Liu H., Jay-Russell M., Zhao S., Hu Z., Wright A., Elkins C. A.* Diversity and antimicrobial resistance of Salmonella enterica isolates from surface water in southeastern United States // Applied and environmental microbiology. 2014. Vol. 80, No 20. P. 6355–6365. DOI: 10.1128/AEM.02063-14.

49. *Li K., Petersen G., Barco L., Hvidtfeldt K., Liu L., Dalsgaard A.* Salmonella Weltevreden in integrated and non-integrated tilapia aquaculture systems in Guangdong, China // Food Microbiol. 2017. Vol. 65. P. 19–24. DOI: 10.1016/j.fm.2017.01.014.

50. *Lin L., Zheng Q., Lin J., Yuk H.-G., Guo L.* Immuno-and nucleic acid-based current technique for Salmonella detection in food // Eur. Food Res. Technol. 2020. Vol. 246. P. 373–395. DOI: 10.1007/s00217-019-03423-9.

51. *Liu H., Whitehouse C. A., Li B.* Presence and persistence of Salmonella in water: the impact on microbial quality of water and food safety // Frontiers in Public Health. 2018. Vol. 6. P. 159. DOI: 10.3389/fpubh.2018.00159.

52. *Liu J., Jasim I., Shen Z., Zhao L., Dweik M., Zhang S., Almasri M.* A microfluidic based biosensor for rapid detection of Salmonella in food products // PloS one. 2019. Vol. 14, No 5. P. e0216873. DOI: 10.1371/journal.pone.0216873.

53. *Liu N., Zou D., Dong D., Yang Z., Ao D., Liu W., Huang L.* Development of a multiplex loop-mediated isothermal amplification method for the simultaneous detection of *Salmonella* spp. and *Vibrio parahaemolyticus* // Sci. Rep. 2017. Vol. 7. P. 45601. DOI: 10.1038/srep45601.

54. *Lobato I. M., O'Sullivan C. K.* Recombinase polymerase amplification: Basics, applications and recent advances // TrAC–Trends Anal. Chem. 2018. Vol. 98. P. 19–35. DOI: 10.1016/j.trac.2017.10.015.

55. *Luo Z., Gu G., Ginn A., Giurcanu M. C., Adams P., Vellidis G., van Bruggen A. H., Danyluk M. D., Wright A. C.* Distribution and characterization of Salmonella enterica isolates from irrigation ponds in the southeastern United States // Applied and environmental microbiology. 2015. Vol. 81, No 13. P. 4376–4387. DOI: 10.1128/AEM.04086-14.

56. *Majowicz S. E., Musto J., Scallan E., Angulo F. J., Kirk M., O'Brien S. J., Jones T. F., Fazil A., Hoekstra R. M., International Collaboration on Enteric Disease 'Burden of Illness' Studies.* The global burden of nontyphoidal Salmonella gastroenteritis // Clinical infectious diseases. 2010. Vol. 50, No 6. P. 882-889. DOI: 10.1086/650733.

57. *Mak W. C., Beni V., Turner A. P.* Lateral-flow technology: From visual to instrumental // TrAC–Trends Anal. Chem. 2016. Vol. 79. P. 297–305. DOI : 10.1016/j.trac.2015.10.017.

58. *Martin L. B., Khanam F., Qadri F., Khalil I., Sikorski M. J., Baker S.* Vaccine value profile for Salmonella enterica serovar Paratyphi A // Vaccine. 2023. Vol. 41, No Suppl 2. P. S114–S133. DOI: 10.1016/j.vaccine.2023.01.054.

59. *Mkangara M.* Prevention and control of human Salmonella enterica infections: an implication in food safety // Int. J. Food Sci. 2023. Vol. 2023, No 1. P. 8899596. DOI: 10.1155/2023/8899596.

60. *Mughini-Gras L., Kooh P., Fravalo P., Augustin J. C., Guillier L., David J., Thébault A., Carlin F., Leclercq A., Jourdan-Da-Silva N., Pavio N., Villena I., Sanaa M., Watier L.* Critical orientation in the jungle of currently available methods and types of data for source attribution of foodborne diseases // Front Microbiol. 2019. Vol. 10. P. 2578. DOI: 10.3389/fmicb.2019.02578.

61. *Paniel N., Noguer T.* Detection of *Salmonella* in Food Matrices, from Conventional Methods to Recent Aptamer-Sensing Technologies // *Foods*. 2019. Vol. 8, No 9. P. 371. DOI: 10.3390/foods8090371.

62. *Peng H., Huang Z., Wu W., Liu M., Huang K., Yang Y., Deng H., Xia X., Chen W.* Versatile High-Performance Electrochemiluminescence ELISA Platform Based on a Gold Nanocluster Probe // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2019. Vol. 11. P. 24812–24819. DOI: 10.1021/acsami.9b08819.

63. *Popa G. L., Papa M. I. Salmonella* spp. infection – A continuous threat worldwide // Germs. 2021. Vol. 11, No 1. P. 88–96. DOI: 10.18683/germs.2021.1244.

64. *Porto Y. D., Fogaça F. H. D. S., Andrade A. O., da Silva L. K. S., Lima J. P., da Silva J. L., Vieira B. S., Cunha Neto A., Figueiredo E. E. S., Tassinari W. S. Salmonella* spp. in Aquaculture: An Exploratory Analysis (Integrative Review) of Microbiological Diagnoses between 2000 and 2020 // Animals : an open access journal from MDPI. 2022. Vol. 13, No 1. P. 27. DOI: 10.3390/ani13010027.

65. Ruan J., Wang W., Zhang T., Zheng T., Zheng J., Yu S., Yu D., Huang Y. Establishment of a duplex real-time qPCR method for detection of Salmonella spp. and Serratia fonticola in fishmeal // AMB Express. 2020. Vol. 10. P. 207. DOI: 10.1186/s13568-020-01144-x.

66. *Saingam P., Li B., Yan T.* Fecal Indicator Bacteria, Direct Pathogen Detection, and Microbial Community Analysis Provide Different Microbiological Water Quality Assessment of a Tropical Urban Marine Estuary // Water Res. 2020. Vol. 185. P. 116280. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116280.

67. *Salamin O., Kuuranne T., Saugy M., Leuenberger N.* Loop-mediated isothermal amplification (LAMP) as an alternative to PCR: A rapid on-site detection of gene doping // Drug Test. Anal. 2017. Vol. 9. P. 1731–1737. DOI: 10.1002/dta.2324.

68. *Scallan E., Hoekstra R. M., Angulo F. J., Tauxe R. V., Widdowson M. A., Roy S. L., Jones J. L., Griffin P. M.* Foodborne illness acquired in the United States--major pathogens // Emerging infectious diseases. 2011. Vol. 17, No 1. P. 7–15. DOI: 10.3201/eid1701.p11101.

69. *Shaji S., Selvaraj R.K., Shanmugasundaram R.* Salmonella infection in poultry: a review on the pathogen and control strategies // Microorganisms. 2023. Vol. 11, No 11. P. 2814. DOI: 10.3390/microorganisms11112814.

70. *Silva C., Calva E., Maloy S.* One Health and food-borne disease: *Salmonella* transmission between humans, animals, and plants // Microbiol Spectr. 2014. Vol. 2. P. 1–2. DOI: 10.1128/microbiolspec.oh-0020-2013.

71. *Silva G. B. L., Campos F. V., Guimarães M. C. C., Oliveira J. P.* Recent developments in lateral flow assays for *Salmonella* detection in food products: a review // Pathogens (Basel, Switzerland). 2023. Vol. 12, No 12. P. 1441. DOI: 10.3390/pathogens12121441.

72. *Silva N. F. D., Magalhães J. M. C. S., Freire C., Delerue-Matos C.* Electrochemical biosensors for Salmonella: State of the art and challenges in food safety assessment // Biosens. Bioelectron. 2018. Vol. 99. P. 667–682. DOI: 10.1016/j.bios.2017.08.019.

73. *Sue M. J., Yeap S. K., Omar A. R., Tan S. W.* Application of PCR-ELISA in Molecular Diagnosis // BioMed Res. Int. 2014. Vol. 2014. P. 653014. DOI: 10.1155/2014/653014.

74. *Thames H. T., Theradiyil Sukumaran A.* A review of *Salmonella* and *Campylobacter* in broiler meat: Emerging challenges and food safety measures // Foods. 2020. Vol. 9, No 6. P. 776. DOI: 10.3390/foods9060776.

75. *Tian Y. M., Bu T., Zhang M.* Metal-polydopamine framework based lateral flow assay for highly sensitive detection of tetracycline in food samples // Food Chem. 2021. Vol. 339. P. 127854. DOI: 10.1016 /j.foodchem.2020.127854.

76. *Wang M, Zhang Y, Tian F, Liu X, Du S, Ren G.* Overview of Rapid Detection Methods for *Salmonella* in Foods: Progress and Challenges // Foods (Basel, Switzerland). 2021. Vol. 10, No 10. P. 2402. DOI: 10.3390/foods10102402.

77. *Wéry N., Lhoutellier C., Ducray F., Delgenès J. P., Godon J. J.* Behaviour of pathogenic and indicator bacteria during urban wastewater treatment and sludge composting, as revealed by quantitative PCR // Water research. 2008. Vol. 42, No 1–2. P. 53–62. DOI: 10.1016/j.watres.2007.06.048.

78. *Wessels K., Rip D., Gouws P. Salmonella* in chicken meat: Consumption, outbreaks, characteristics, current control methods and the potential of bacteriophage use // Foods. 2021. Vol. 10, No 8. P. 1742. DOI: 10.3390/foods10081742.

79. *Wilkes G., Edge T., Gannon V., Jokinen C., Lyautey E., Medeiros D., Neumann N., Ruecker N., Topp E., Lapen D. R.* Seasonal relationships among indicator bacteria, pathogenic bacteria, Cryptosporidium oocysts, Giardia cysts, and hydrological indices for surface waters within

an agricultural landscape // Water research. 2009. Vol. 43, No 8. P. 2209–2223. DOI: 10.1016/j.watres.2009.01.033.

80. *Wu G. P., Chen S. H., Levin R. E.* Application of ethidium bromide monoazide for quantification of viable and dead cells of Salmonella enterica by real-time loop-mediated isothermal amplification // J. Microbiol. Methods. 2015. Vol. 117. P. 41–48. DOI: 10.1016/j.mimet.2015.07.012.

81. *Zeng H., Rasschaert G., De Zutter L., Mattheus W., De Reu K.* Identification of the source for Salmonella contamination of carcasses in a large pig slaughterhouse // Pathogens. 2021. Vol. 10, No 1. P. 77. DOI: 10.3390/pathogens10010077.

Поступила в редакцию 30.11.2024 г.

Golovko L. S., Shevchenko V. N., Maltseva T. A. **Review of modern approaches to determining *Salmonella* in aquatic ecosystems as an element of environmental safety.** – Modern methods of identifying Salmonella in environmental objects and food products allow us to correctly assess the degree of pathogenic load and, accordingly, promptly modify current measures to control the occurrence and spread of salmonellosis. This paper describes the main characteristics of *Salmonella* bacteria and provides an overview of modern methods for identifying salmonella in food products and aquatic ecosystems.

Keywords: salmonellosis, *Salmonella*, pathogen identification, food safety, aquaculture, environmental safety.

Головко Лилия Сергеевна,
кандидат медицинских наук, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Центр агробиотехнологии», старший преподаватель кафедры «Техника и технологии пищевых производств» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону, РФ.
E-mail: *liliya_s_golovko@mail.ru*
ORCID: 0000-0001-6883-7155
AuthorID: 1257329

Golovko Lilia Sergeevna,
Ph.D. in Medical Science, Junior Researcher of the Research Laboratory ‘Agrobiotechnology Center’, Senior lecturer of the ‘Food Production Equipment and Technologies’ department of Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

Шевченко Виктория Николаевна,
кандидат биологических наук, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Центр агробиотехнологии», доцент кафедры «Технические средства аквакультуры» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону, РФ.
E-mail: *vikakhorosheltseva@gmail.com*
ORCID: 0000-0002-5001-4959
AuthorID: 1031771

Shevchenko Victoria Nikolaevna,
Ph.D. in Biology, Junior Researcher of the Research Laboratory ‘Agrobiotechnology Center’, Assistant professor at the department of ‘Technical means of aquaculture’ of Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

Мальцева Татьяна Александровна,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование переработки продукции агропромышленного комплекса», старший научный сотрудник Центра развития территориального кластера «Долина Дона» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону, РФ.
E-mail: *vif.tatyana@yandex.ru*
ORCID: 0000-0002-3973-6846
AuthorID: 969155

Maltseva Tatyana Alexandrovna,
Ph.D. in Engineering Science, Assistant professor of the ‘Technologies and Equipment for Agricultural Products Processing’ department, Senior Researcher of the Center of Development of the Territorial Cluster ‘Dolina Dona’ of Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

ФИЗИОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ, МИКОЛОГИЯ
PHYSIOLOGY AND ECOLOGY OF THE PLANT, MYCOLOGY

УДК 632.937: 579.22 DOI: 10.5281/zenodo.14543802 EDN: ENTNPF

© **С. И. Демченко**

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ГЛУБИННОГО КУЛЬТИВИРОВАНИЯ ШТАММА *PHLEBIOPSIS GIGANTEA* Р-1-96

ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
Россия, 283050, ДНР, г. Донецк, ул. Щорса, 46

Демченко С. И. Оптимизация условий глубинного культивирования штамма Phlebiopsis gigantea Р-1-96. – В работе изучено влияние состава и кислотности питательной среды, температуры культивирования на рост и оидиогенез штамма *Phlebiopsis gigantea* Р-1-96 в глубинной культуре. Показано, что более интенсивное накопление биомассы мицелия и высокая спорообразовательная активность гриба наблюдались на глюкозо-пептонной среде при температуре 26 ºС. Установлены оптимальные параметры кислотности среды для роста (pH 4,2) и оидиогенеза (pH 3,8) штамма *Ph. gigantea* Р-1-96.

Ключевые слова: гриб-антагонист, патоген, глубинная культура, питательная среда, кислотность среды, температура культивирования, накопление биомассы, оидиогенез.

Введение

Большой ущерб лесному хозяйству Российской Федерации причиняют болезни, вызываемые грибами [16]. Среди грибных патогенов древесных растений одним из наиболее распространенных и опасных является *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. sensu stricto (s. str.) (гетеробазидион многолетний, или корневая губка) [1, 11, 16].

Корневая губка вызывает усыхание многих хвойных и лиственных пород, но наибольший вред наносит сосновым насаждениям, поражая корневую систему и основание стволов сосны [1, 11, 16]. Поэтому проблема борьбы с *H. annosum* s. str. приобретает большую актуальность как в нашей стране, так и за рубежом.

Разработка мер борьбы с патогеном идет как по пути поиска оптимального сочетания методов воздействия на *H. annosum* s. str. для конкретного района поражения, так и совершенствования каждого из этих методов – лесохозяйственного, химического и биологического [9]. В системе биологической защиты насаждений от корневой губки большой интерес представляют микроорганизмы, находящиеся в активных антагонистических отношениях с *H. annosum* s. str., в том числе и дереворазрушающие грибы-сапротрофы [18]. Разработка приемов их использования для локализации пней, как потенциальных источников инфекции *H. annosum* s. str., представляет собой одну из актуальных задач в решении проблемы биологических мер борьбы с корневой губкой.

Наиболее перспективным антагонистом корневой губки, по мнению большинства ученых, работающих в этом направлении, считается гриб *Phlebiopsis gigantea* (Fr.) Jülich. (флебиопсис гигантский) [1, 7, 11, 14, 18]. Ранее нами была изучена антагонистическая активность 10 местных штаммов флебиопсиса гигантского в отношении патогенных изолятов *H. annosum* s. str. и выявлен штамм *Ph. gigantea* Р-1-96, перспективный для биологической борьбы с корневой губкой [6].

При разработке технологии получения жидких форм биопрепаратов для защиты сосновых насаждений от возбудителей корневой гнили большое внимание уделяется глубинному методу культивирования грибов, который является наиболее экономичным процессом, позволяющим с помощью создания контролируемых условий добиться быстрого роста грибного организма [3, 4].

© **Демченко С. И., 2024**

Существует прямая зависимость между интенсивностью роста, биосинтетической и споробразовательной активностью грибов и условиями их культивирования [2]. Поэтому целью проводимого исследования было подобрать благоприятные питательные среды и оптимальные параметры температуры культивирования и кислотности среды для роста и оидиогенеза штамма *Ph. gigantea* Р-1-96 в глубинной культуре.

Материал и методы исследования

Объектом исследования служил местный штамм *Ph. gigantea* Р-1-96 из коллекции базидиальных ксилотрофов кафедры физиологии растений Донецкого государственного университета, для которого ранее была выявлена высокая антагонистическая активность в отношении патогенных изолятов гриба *H. annosum* s. str. [5, 6].

При оптимизации условий глубинного культивирования флебиопсиса гигантского изучали влияние температуры культивирования, состава и pH питательных сред на рост и интенсивность споруляции гриба *Ph. gigantea* Р-1-96.

Исследование ростовых процессов вегетативного мицелия и интенсивности оидиогенеза *Ph. gigantea* проводили на синтетической (среда Чапека-Докса) и комплексных (глюкозо-пептонная и картофельно-глюкозная) питательных средах. Все среды готовили и стерилизовали по общепринятым методикам [15].

Глубинное культивирование гриба осуществляли в колбах Эрленмейера объемом 250 мл с 30 мл питательной среды. В качестве посевного материала использовали 7-суточные культуры *Ph. gigantea*, предварительно выращенные на картофельно-глюкозном агаре [15] в чашках Петри. Мицелиальные диски диаметром 7 мм вырезали стерильным стальным сверлом по краю активно растущей колонии гриба и переносили их в опытные колбы с выше указанными питательными средами. Культуры гриба инкубировали в термостатируемой комнате на орбитальном шейкере (180 об./мин.) в течение 10 суток. По окончании культивирования исследованного штамма *Ph. gigantea* определяли сухую массу мицелия гравиметрически [10] и интенсивность споруляции по стандартной методике [10].

Определение оптимальной температуры и pH для глубинного выращивания штамма *Ph. gigantea* Р-1-96 проводили на жидкой глюкозо-пептонной среде. Исследованный штамм культивировали при температуре +7, +16, +22, +24, +26, +30, +32 и +35 °С, pH от 2,6 до 9,0 с шагом 0,4 pH. Кислотность питательной среды доводили до определенных значений с помощью 1 N раствора HCl или NaOH.

Повторность всех проведенных опытов была трехкратной. Статистическую обработку экспериментальных данных проводили при 5 %-м уровне значимости с помощью дисперсионного анализа и множественного сравнения средних арифметических значений по критерию Дункана [8, 13].

Результаты и обсуждение

В табл. 1 и 2 представлены экспериментальные данные динамики накопления биомассы мицелия и интенсивности споруляции *Ph. gigantea* Р-1-96 в глубинной культуре.

Таблица 1

Динамика накопления биомассы мицелия (г/л) штаммом *Ph. gigantea* Р-1-96 на жидких питательных средах

Продолжительность культивирования, сут.	Лабораторные питательные среды		
	Глюкозо-пептонная	Глюкозо-картофельная	Чапека-Докса
3	2,8 ± 0,3	2,1 ± 0,4	0,8 ± 0,4
5	4,2 ± 0,4	3,4 ± 0,2	2,7 ± 0,5
8	5,1 ± 0,5	4,0 ± 0,4	3,2 ± 0,3
10	5,9 ± 0,2	4,7 ± 0,1	3,8 ± 0,4

Анализ экспериментальных данных, приведенных в табл. 1, показал, что рост штамма *Ph. gigantea* Р-1-96 наблюдался на всех исследованных питательных средах. Рост гриба в глубинной культуре происходил в виде отдельных мицелиальных глобул. Размер глобул варьировал от 0,1 до 0,5 см. Крупные глобулы, от 0,3 см и более, имели внутри полость, причиной чему, очевидно, являлся лизис мицелия в анаэробных условиях. На протяжении всего периода культивирования достоверно наибольшее накопление биомассы мицелия грибом *Ph. gigantea* Р-1-96 наблюдалось на глюкозо-пептонной среде. Менее пригодной для роста исследованного штамма оказалась среда Чапека-Докса. На минеральной и комбинированных питательных средах максимальные значения биомассы мицелия выявлены на 10-е сутки роста гриба.

Таблица 2

Динамика интенсивности споруляции (млн оидий в 1 мл культуральной жидкости (КЖ)) штамма *Ph. gigantea* Р-1-96 на жидких питательных средах

Продолжительность культивирования, сут.	Лабораторные питательные среды		
	Глюкозо-пептонная	Глюкозо-картофельная	Чапека-Докса
3	0,22 ± 0,04	0,14 ± 0,06	0,05 ± 0,01
5	0,63 ± 0,05	0,36 ± 0,08	0,28 ± 0,06
8	0,74 ± 0,07	0,67 ± 0,03	0,45 ± 0,09
10	1,28 ± 0,03	0,93 ± 0,09	0,66 ± 0,03

Анализируя интенсивность споруляции макромицета в глубинной культуре (табл. 2), было установлено, что штамм *Ph. gigantea* Р-1-96 способен был продуцировать оидии на всех исследованных питательных средах, причем глюкозо-пептонная среда была более благоприятной для спорообразовательной активности флебиопсиса гигантского, чем другие среды. В фазу спороношения штамм *Ph. gigantea* Р-1-96 вступал на третьи сутки роста. Наибольшее количество оидий формировалось мицелием на 10-е сутки роста гриба.

Таким образом, рост и оидиогенез штамма *Ph. gigantea* Р-1-96 в глубинной культуре зависят от состава питательной среды, что подтверждается литературными данными [7, 12, 19].

Анализ экспериментальных данных, приведенных на рис. 1А, показал, что рост штамма *Ph. gigantea* Р-1-96 в глубинной культуре был возможен в интервале температур 16–32 ºС. При температуре +7 и +35 ºС обнаружено только обрастание инокулюма. При перенесении культур в термостат при +26 ºС из инокулюма развивались нормальные колонии. Следовательно, при этих температурах гибель гриба не наступала, а лишь приостанавливалась до минимума его жизнедеятельность.

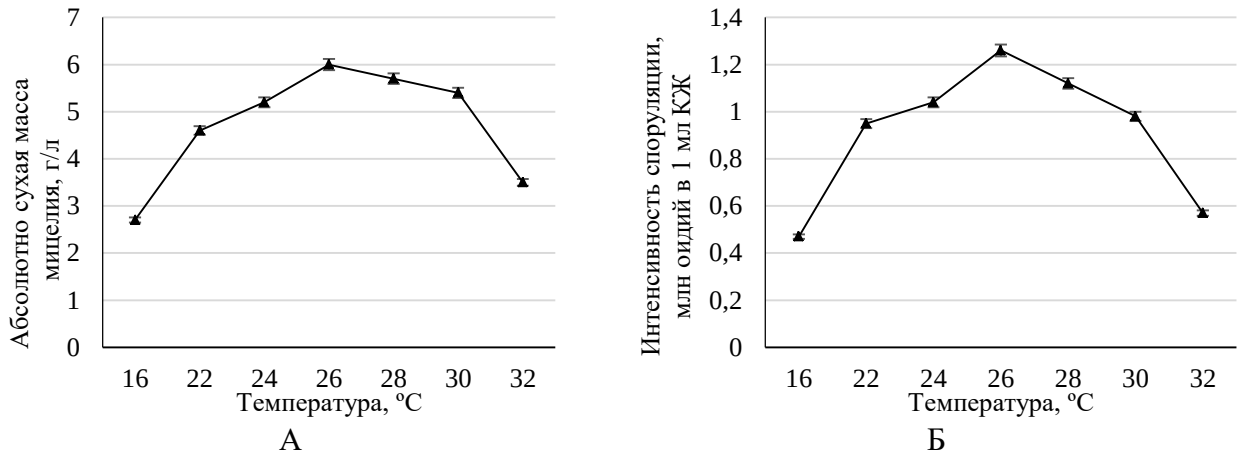


Рис. 1. Термограммы накопления биомассы мицелия (А) и интенсивности споруляции (Б) *Ph. gigantea* Р-1-96 в глубинной культуре

При определении оптимальной температуры для глубинного культивирования штамма *Ph. gigantea* Р-1-96 было установлено, что достоверно наибольшая сухая масса мицелия (6,0 г/л) наблюдалась при температуре +26 °С. Менее благоприятной оказалась температура +16 и +32 °С, при которой рост гриба был менее обильным, а сухая масса мицелия составила 2,7 и 3,5 г/л соответственно.

Спорообразовательная активность штамма *Ph. gigantea* Р-1-96 (рис. 1Б) наблюдалась в том же диапазоне температур, что и рост гриба – 16–32 °С. Наибольшая интенсивность споруляции у исследованного штамма была зафиксирована при температуре +26 °С.

Таким образом штамм *Ph. gigantea* Р-1-96 является мезофилом, т. к. оптимальная температура для глубинного культивирования гриба составила +26 °С, что совпадает с литературными данными [7, 19].

Анализ экспериментальных данных, приведенных на рис. 2, показал, что рост штамма *Ph. gigantea* Р-1-96 на глюкозо-пептонной среде наблюдался в диапазоне pH от 2,6 до 8,2. В щелочной среде при pH 8,6–9,0 глубинный рост гриба полностью отсутствовал, а сухая масса соответствовала весу посевного блока.

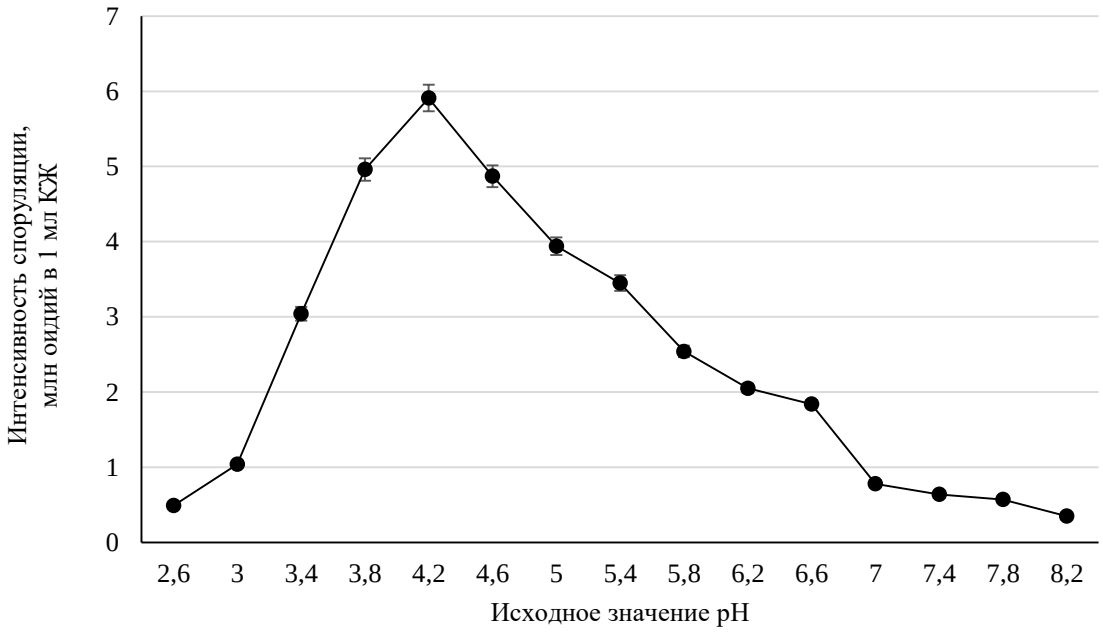


Рис. 2. Абсолютно сухая масса мицелия штамма *Ph. gigantea* Р-1-96 на глюкозо-пептонной среде с разными значениями исходной pH

Кривая зависимости роста *Ph. gigantea* Р-1-96 от pH среды имела четко выраженную куполообразную форму с одним максимумом. Лучшей оказалась среда с pH 4,2, при которой наблюдалась достоверно максимальная сухая масса мицелия (5,91 г/л). Очень низкие показатели накопления мицелиальной биомассы (0,35–1,04 г/л) выявлены на сильнокислой (pH 2,6–3,0), нейтральной (pH 7,0) и щелочной (pH 7,4–8,2) среде. Таким образом, исследованный штамм *Ph. gigantea* является факультативным ацидофилом, который переносит нейтральную и щелочную реакцию среды. Н. Е. Ерошкина [7] и некоторые зарубежные авторы [19] также отмечают, что базидиальный ацидофил *Ph. gigantea* способен произрастать в широком диапазоне pH – от 2,5 до 9,0. При этом интенсивность роста гриба увеличивается в кислой и слабокислой среде (pH 3,5–6,5) и значительно снижается в нейтральной и щелочной. Однако наши данные не согласуются с исследованиями Е. А. Януцевича и др. [17], которые установили, что штамм *Ph. gigantea* VKM F-4932, выделенный из торфа с глубины 0,5 м переходного аапа-болота, является облигатным ацидофилом с оптимумом роста при pH 4,0 и отсутствием роста при pH 7,0. Это, по-

видимому, связано с тем, что штаммы *Ph. gigantea*, имеющие различное эколого-географическое происхождение, отличаются между собой пределом толерантности по отношению к кислотности среды.

Оидиогенез штамма *Ph. gigantea* Р-1-96 наблюдался в том же диапазоне pH среды, что и рост гриба – от 2,6 до 8,2 (рис. 3). Наибольшая интенсивность споруляции у исследованного штамма флебиопсиса гигантского обнаружена на питательной среде с pH 3,8. Следовательно, оптимальные значения pH для роста вегетативного мицелия (pH 4,2) и споруляции (pH 3,8) штамма *Ph. gigantea* Р-1-96 не совпадают. Поэтому необходимо использовать комбинированный кислотный режим культивирования гриба: вначале поддерживать постоянную кислотность среды, которая способствует активному росту мицелия, а затем создавать оптимальные значения pH среды для оидиогенеза.

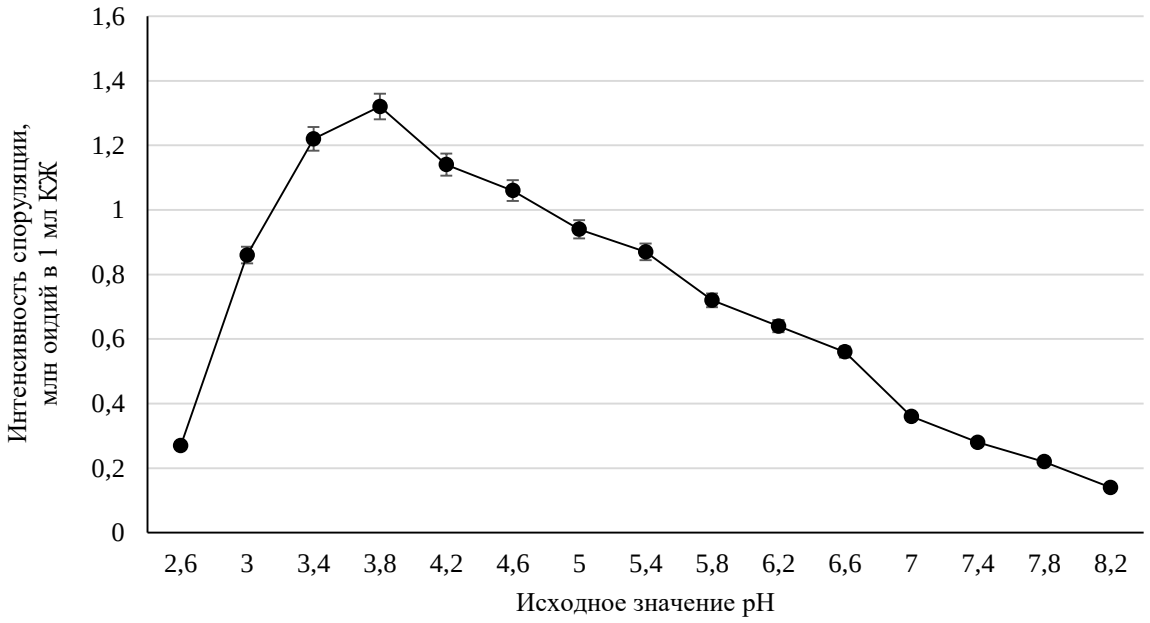


Рис. 3. Интенсивность споруляции штамма *Ph. gigantea* Р-1-96 в глубинной культуре при разной концентрации ионов водорода в питательной среде

Выводы

В результате проведенных исследований подобрана комплексная питательная среда, на которой накопление биомассы и оидиогенез глубинной культуры *Ph. gigantea* Р-1-96 происходил наиболее эффективно. Максимальный выход мицелиальной биомассы (5,9 г/л) и высокие показатели спорообразовательной активности (1,28 млн оидий в 1 мл КЖ) получены на 10-е сутки выращивания гриба на глюкозо-пептонной среде.

Установлены оптимальные для глубинного роста местного штамма *Ph. gigantea* Р-1-96 параметры температуры культивирования (26 ºС) и кислотности среды (pH 4,2). При этом выявлено, что для интенсивного оидиогенеза флебиопсиса гигантского требуется более низкое значение pH питательной среды – 3,8 pH.

Полученные данные могут быть использованы для оптимизации состава питательной среды и условий культивирования *Ph. gigantea* Р-1-96 с целью получения мицелиальной биомассы и оидий для производства биопрепарата против фитопатогенного гриба *H. annosum* s. str.

Исследование проводилось по теме государственного задания (№ госрегистрации 124012400346-5).

Список литературы

1. *Василяускас А. П.* Корневая губка и устойчивость экосистем хвойных лесов. Вильнюс: Мокслас, 1989. 175 с.

2. *Беккер З. Э.* Физиология и биохимия грибов. М.: Изд-во Москов. ун-та, 1988. 230 с.

3. *Билай В. И.* Основы общей микологии: Учебн. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. К.: Вища шк., 1980. 360 с.

4. *Бухало А. С.* Высшие съедобные базидиомицеты в чистой культуре. К.: Наук. думка, 1988. 144 с.

5. *Демченко С. И.* Антагонистическая активность природных штаммов *Phlebiopsis gigantea* (Fr.) Jülich. по отношению к фитопатогену *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. 2023. № 1–2. С. 77–84.

6. *Демченко С. И.* Скрининг природных штаммов *Phlebiopsis gigantea* (Fr.) Jülich., перспективных для биологической борьбы с корневой губкой // Современная микология в России: материалы международного микологического форума. Т. 10. М.: Национальная академия микологии, 2024. С. 296–297.

7. *Ерошкина Н. Е.* Биологические особенности гриба *Peniophora gigantea* (Fr.) Masse как антагониста *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. (корневой губки): автореф дис. ... канд. биол. наук: 03.00.05; 03.00.24. К., 1985. 22 с.

8. *Лакин Г. Ф.* Биометрия. М.: Высш. шк., 1990. 350 с.

9. *Лыков И. В., Максимчук П. А.* Обзор современного состояния и эффективности мероприятий по защите сосновых насаждений от корневой губки (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.) // Лесотехнический журнал. 2021. № 3. С. 63–73.

10. Методы экспериментальной микологии: справ. / Под ред. В. И. Билай. К.: Наук. думка, 1982. 550 с.

11. *Негруцкий С. Ф.* Корневая губка. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1986. 196 с.

12. *Полещук Ю. М.* Биологическая защита сосновых насаждений от корневой губки: обзорная информация. Минск, 1991. 34 с.

13. *Приседський Ю. Г.* Статистична обробка результатів біологічних експериментів: Навч. посібник. Донецьк: ТОВ «НОРД Компьютер», 1999. 210 с.

14. *Романовская Т. В., Арашкова А. А., Тригубович А. М., Коломиец Э. И., Звягинцев В. Б., Волченкова Г. А., Савицкий А. В.* Скрининг изолятов *Phlebiopsis gigantea*, перспективных для создания биопрепарата против корневой губки // Микробные биотехнологии: фундаментальные и прикладные аспекты: сб. науч. тр. Минск: Беларуская навука, 2017. Т. 9. С. 92–103.

15. *Семенов С. М.* Лабораторные среды для актиномицетов и грибов: справ. М.: Агропромиздат, 1990. 240 с.

16. *Федоров Н. И.* Корневые гнили хвойных пород. М.: Лесная промышленность, 1984. 160 с.

17. *Януцевича Е. А., Данилова О. А., Грум-Гржимайло О. А., Терёшина В. М.* Роль осмолитов и мембранных липидов ацидофильного базидиомицета *Phlebiopsis gigantea* в ответе на стрессорные воздействия // Современная микология в России: материалы международного микологического форума. Т. 10. М.: Национальная академия микологии, 2024. С. 21–22.

18. *Holdriender O., Greig B.* Biological methods of control // *Heterobasidion annosum*: Biology, Ecology, Impact and Control. Oxon (UK) – New York (USA): CAB International, 1998. P. 235–258.

19. *Prasher I. B., Negi S., Kumar R.* Nutritional characteristics and physiological studies on the growth and development of *Phlebiopsis gigantean* // Current Botany. 2017. Vol 8. P. 92–96.

Поступила в редакцию 21.11.2024 г.

Demchenko S. I. The optimization of conditions for deep cultivation of Phlebiopsis gigantea P-1-96. – The effect of the composition and acidity of the nutrient medium, cultivation temperature on the growth and oidiogenesis of the *Phlebiopsis gigantea* P-1-96 in deep culture was studied. It was shown that a more intensive accumulation of

mycelium biomass and high spore-forming activity of the fungus were observed on a glucose-peptone medium at a temperature 26 °C. The optimal parameters of the medium acidity for growth (pH 4.2) and oidiogenesis (pH 3.8) of the *Ph. gigantea* P-1-96 have been established.

Key words: antagonist fungus, pathogen, deep culture, nutrient medium, medium acidity, cultivation temperature, biomass accumulation, oidiogenesis.

Демченко Светлана Ивановна,
кандидат биологических наук, доцент,
зав. кафедрой физиологии растений
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: *sdemch5@mail.ru*
ORCID: 0009-0002-4868-5988
AuthorID: 1033943

Demchenko Svetlana Ivanovna,
Candidate of Biological Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Plant Physiology, Donetsk
State University, Donetsk, DNR, Russian Federation.

УДК 582.284:577.151.52 DOI: 10.5281/zenodo.14543836 EDN: FECJJP

© **О. В. Чемерис**

ФЕРМЕНТАТИВНЫЙ ГИДРОЛИЗ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЧАТКОВ КУКУРУЗЫ ЦЕЛЛЮЛАЗАМИ ШТАММА *IRPEX LACTEUS* (FR.) FR. 2434

ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
Россия, 283050, ДНР, г. Донецк, ул. Щорса, 46

Чемерис О. В. **Ферментативный гидролиз отходов переработки початков кукурузы целлюлазами штамма *Irpex lacteus* (Fr.) Fr. 2434.** – В лабораторных условиях исследованы особенности ферментативного гидролиза в цитратно-фосфатном буфере отходов переработки початков кукурузы (обертки и стержней початков) целлюлазами штамма *Irpex lacteus* 2434. Установлено, что ферментный препарат целлюлаз действует в пределах pH 4,0–5,5. С целью повышения выхода восстанавливающих сахаров и глюкозы необходимо вносить ферментный препарат штамма *I. lacteus* 2434 в количестве 10 мг/г субстрата.

Ключевые слова: целлюлазы, ферментативный гидролиз, растительные отходы, *Irpex lacteus*

Введение

В результате биоконверсии лигноцеллюлозной биомассы получают различные продукты – спирты, органические кислоты, аминокислоты и т. д. [4]. Гидролиз целлюлозосодержащего сырья может быть осуществлен как химическими [2], так и биологическими методами [3]. Причем биологические технологии наиболее устойчивые благодаря их безопасности, способности к биологическому разложению и возможности рециркуляции. Вид растительного сырья, его физико-химические свойства и способ получения из него сбраживающих сахаров обуславливают особенности ферментативного гидролиза [4, 5, 8].

С точки зрения промышленного применения, технико-экономическая целесообразность технологий биоконверсии должна оцениваться с учетом ключевых факторов, среди которых не только стоимость процесса, но и вид растительного сырья, и потенциальные продукты. Среди различных агрокультур кукуруза имеет важное значение. Она богата целлюлозой, белками, зольными элементами, содержит жиры и другие ценные вещества. Такие растительные отходы кукурузы как листья и стебли могут быть использованы для корма скоту, в качестве подстилки, для производства искусственного шелка и полифенолов [14], а кукурузные початки и солома – для производства гликолипидов и липидов с высокой добавленной стоимостью [15].

Исходная концентрация субстрата и фермента в растворе реакционной смеси – факторы, определяющие скорость гидролиза и выход конечного продукта [10]. Так, авторами показано, что при повышении концентрации фермента наблюдается ограниченная эффективность гидролиза соломы пшеницы за счет снижения центров связывания целлюлаз на субстрате [3]. Особое внимание уделяется составлению мультиэнзимных композиций с оптимальным соотношением ферментных препаратов целлюлаз, пектиназ и ксиланаз [10] для эффективного процесса гидролиза лигноцеллюлозного субстрата. Каждый из ферментов в таком комплексе действует синергетически, в связи с чем оптимальные значения таких параметров как pH раствора и температура могут отличаться от заявленных.

Изучение факторов, влияющих на ферментативный гидролиз лигноцеллюлозного сырья, усовершенствование технологий получения комплексных ферментных препаратов и процесса ферментативного гидролиза различных видов растительного сырья являются актуальными для современной промышленной биотехнологии.

Целью данной работы являлось исследование особенностей ферментативного гидролиза отходов переработки початков кукурузы целлюлазами штамма *Irpex lacteus* (Fr.) Fr. 2434.

© **Чемерис О. В., 2024**

Материал и методы исследования

В качестве сырья для исследования особенностей ферментативного гидролиза использовали предварительно высушенные стержни и обертку початков кукурузы. Эффективность процесса ферментативного гидролиза полисахаридов зависит от степени измельчения сырья и его доступности для ферментных препаратов [3, 8, 13], поэтому растительный материал предварительно измельчали с помощью бытовой кофемолки, просеивали через сито с размером ячеек менее 1 мм.

В качестве биокатализатора использовали лабораторный образец ферментного препарата внеклеточных целлюлаз штамма *I. lacteus* 2434 [11, 12], который проявляет эндоглюканазную (117,16 Ед./мг белка) и целлобиазную (5,37 Ед./мг белка) активность.

Обработку растительного материала ферментным препаратом проводили при 45 °С и pH цитратно-фосфатного буфера от 4,0 до 5,5 с шагом pH 0,5. Реакционная смесь состояла из 150 мг растительного материала, 1,5 мл 0,1 М цитратно-фосфатного буфера, 0,5 мл раствора ферментного препарата (5 мг и 10 мг белка на 1 г субстрата) и 10 мг тетрациклина для предупреждения микробной контаминации. Отборы проб проводили через 24 и 48 ч и определяли содержание восстанавливающих сахаров (ВС) в гидролизатах в перерасчете на глюкозу методом Шомодьи-Нельсона [1, 7, 16], а содержание глюкозы – глюкозооксидазным методом с использованием наборов реагентов для определения глюкозы в биологических жидкостях («Агат», Россия).

Исследования проводили в трехкратной повторности. Статистическую обработку полученных данных осуществляли методом дисперсионного анализа, а сравнение средних арифметических величин – методом Дункана [7].

Результаты и обсуждение

Результаты исследования ферментативного гидролиза обертки початков кукурузы ферментным препаратом целлюлаз штамма *I. lacteus* 2434, вносимого из расчета 5 мг/г субстрата, отражены на рис. 1.

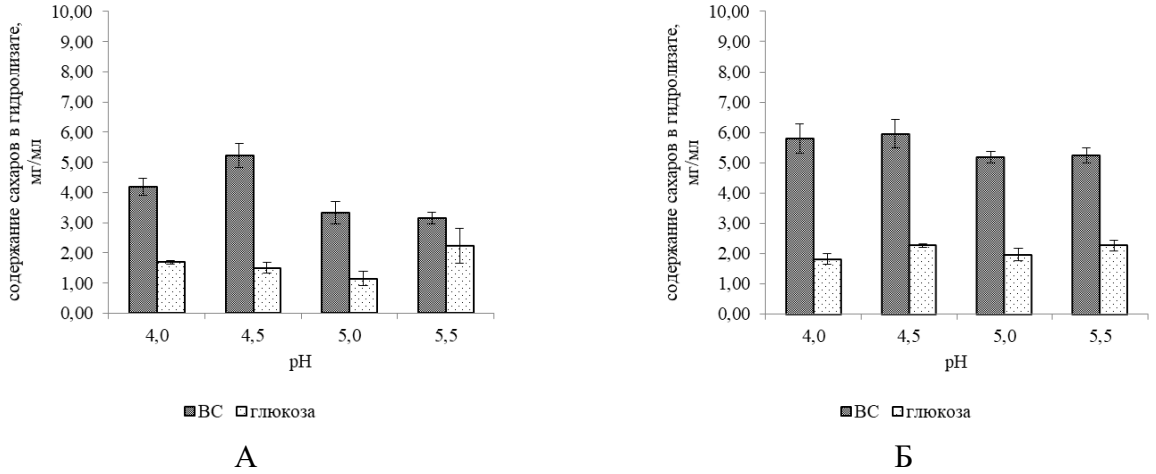
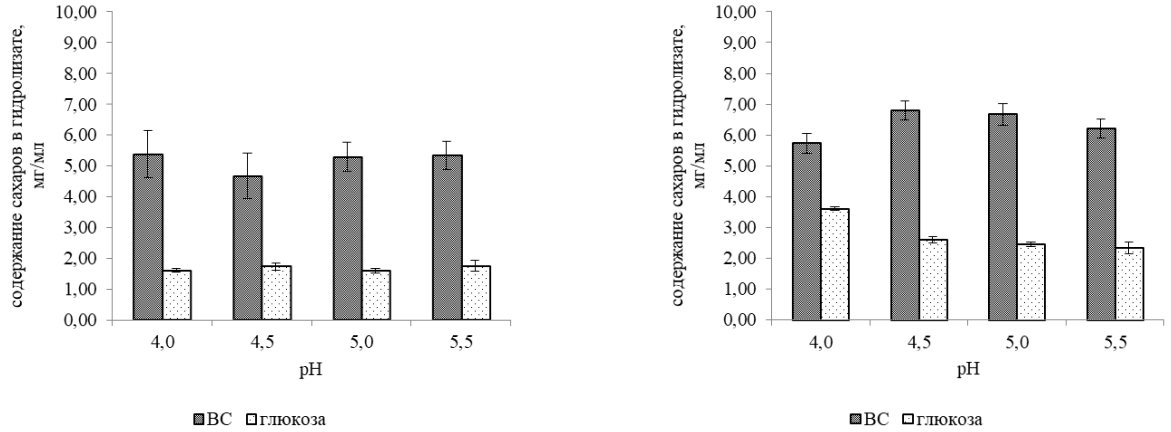


Рис. 1. Содержание восстанавливающих сахаров (ВС) и глюкозы при ферментативном гидролизе обертки початков кукурузы ферментным препаратом целлюлаз *I. lacteus* 2434 (5 мг/г субстрата): А – 24 ч, Б – 48 ч

Установлено, что через 24 ч при pH 4,0 и 4,5 содержание ВС в гидролизате было выше, чем при pH 5,0 и 5,5 на ~25 и 65 % соответственно. Однако наиболее высокое содержание глюкозы в гидролизате в данный период отмечено при кислотности цитратно-фосфатного буфера pH 5,5. Через 48 ч содержание ВС в гидролизатах повышалось от ~15 % в варианте pH 4,5 и до ~50 % в варианте pH 5,0. Содержание глюкозы в гидролизатах также увеличивалось от ~7 % в варианте pH 4,0 до 40 % при pH 4,5. При pH 5,5 сохранялось высокое содержание глюкозы на уровне 24-часового гидролиза.

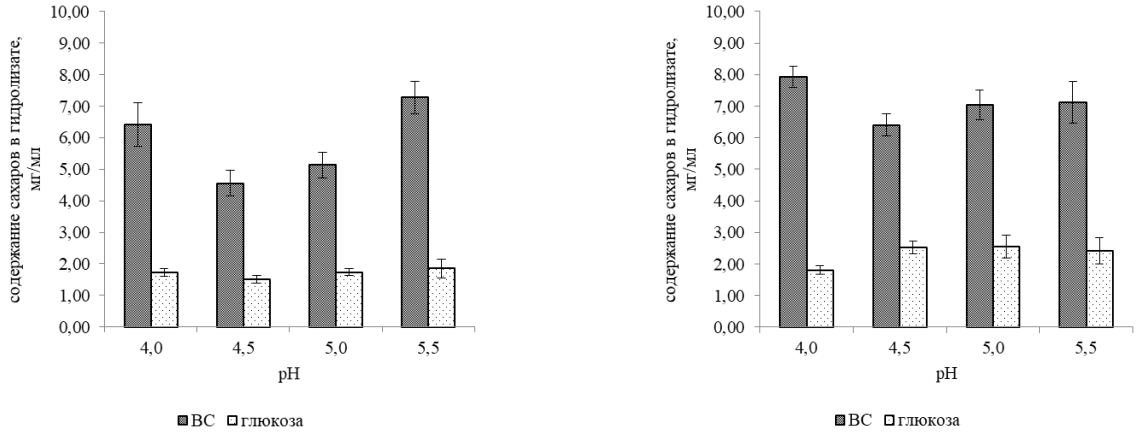
При внесении ферментного препарата штамма *I. lacteus* 2434 в количестве 10 мг/г субстрата содержание ВС в гидролизатах через 24 ч было выше (рис. 2) по сравнению с аналогичным периодом ферментативного гидролиза при 5 мг/г субстрата (рис. 1). Однако достоверные отличия по содержанию ВС и глюкозы в исследуемых гидролизатах во всех вариантах pH цитратно-фосфатного буфера не наблюдались. Через 48 ч ферментативного гидролиза растительного материала содержание ВС и глюкозы увеличилось по всем вариантам pH. Причем наибольшее повышение содержания ВС на ~50 % отмечено для варианта pH 4,5, а глюкозы – для варианта pH 4,0.



А Б

Рис. 2. Содержание восстанавливающих сахаров (ВС) и глюкозы при ферментативном гидролизе обертки початков кукурузы ферментным препаратом целлюлаз *I. lacteus* 2434 (10 мг/1 г субстрата): А – 24 ч, Б – 48 ч

Результаты ферментативного гидролиза стержней початков кукурузы при внесении ферментного препарата штамма *I. lacteus* 2434 в количестве 5 мг/г субстрата представлен на рис. 3.

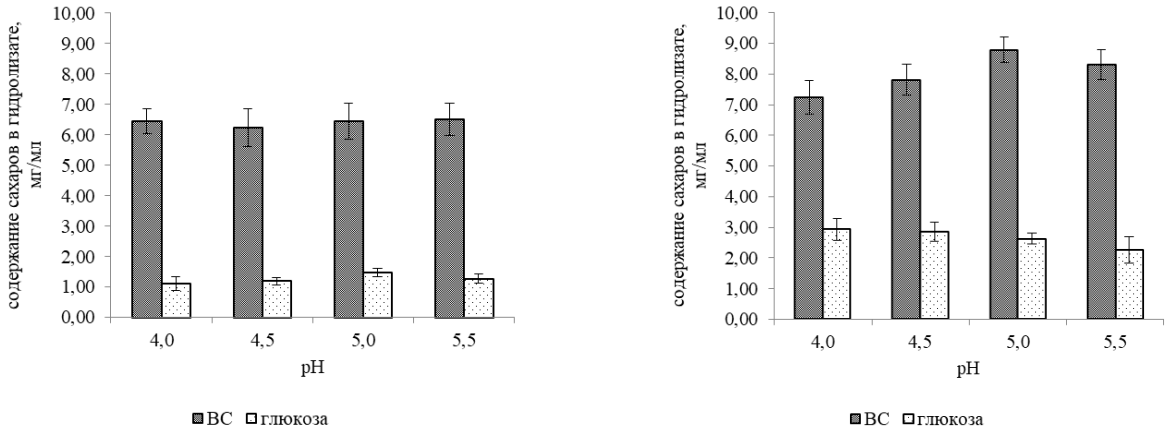


А Б

Рис. 3. Содержание восстанавливающих сахаров (ВС) и глюкозы при ферментативном гидролизе стержней початков кукурузы ферментным препаратом целлюлаз *I. lacteus* 2434 (5 мг/1 г субстрата): А – 24 ч, Б – 48 ч

Через 24 ч наибольший выход ВС в гидролизатах отмечен при pH 4,0 и pH 5,5. Содержание глюкозы в гидролизатах находилось примерно на одном уровне во всех исследуемых вариантах pH цитратно-фосфатного буфера. Дальнейшая ферментация растительного материала приводила к повышению содержания ВС в гидролизатах примерно до одного уровня независимо от варианта pH среды. Наибольшее повышение содержания ВС и глюкозы примерно на 40 % отмечено для варианта pH 4,5 и pH 5,0.

При увеличении вносимого ферментного препарата целлюлаз штамма *I. lacteus* 2434 до 10 мг/г субстрата в реакционную смесь содержание ВС и глюкозы в гидролизатах через 24 ч составляло ~6 мг/мл и ~1,2 мг/мл соответственно во всех исследованных вариантах pH среды (рис. 4А).



А Б

Рис. 4. Содержание восстанавливающих сахаров (ВС) и глюкозы при ферментативном гидролизе стержней початков кукурузы ферментным препаратом целлюлаз *I. lacteus* 2434 (10 мг/1 г субстрата): А – 24 ч, Б – 48 ч

Через 48 ч ферментативного гидролиза стержней початков кукурузы отмечено повышение содержания ВС и глюкозы в гидролизатах. Причем наибольшее повышение содержания ВС наблюдалось при pH 5,0 и pH 5,5, а глюкозы – при pH 4,0 (рис. 4Б).

При ферментативном гидролизе стержней початков кукурузы концентрация ВС и глюкозы в гидролизате был выше, чем при гидролизе листьев початков кукурузы.

Выводы

Таким образом, проведены исследования особенностей ферментативного гидролиза отходов переработки початков кукурузы препаратом целлюлаз штамма *I. lacteus* 2434. Ферментный препарат целлюлаз штамма *I. lacteus* 2434 действует в пределах pH 4,0–5,5. С целью повышения выхода восстанавливающих сахаров и глюкозы необходимо вносить ферментный препарат штамма *I. lacteus* 2434 в количестве 10 мг/г субстрата.

Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по теме «Биологические способы переработки растительных отходов агропромышленного комплекса» (№ госрегистрации 124012400346-5).

Список литературы

1. *Билай В. И.* Методы экспериментальной микологии. К.: Наук. думка, 1973. 243 с.
2. *Болтовский В. С.* Новые способы кислотного гидролиза целлюлозы и растительного сырья // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. 2021. Т. 57, № 1. С. 119–128. https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-1-119-128.
3. *Зиновьева М. Е., Волкова Т. С., Шафигуллина Н. Ф.* Особенности ферментативного гидролиза целлюлозосодержащего сырья ферментным препаратом «Целлолюкс-А» // Вестник Технологического университета. 2018. Т. 21, № 3. С. 56–58. EDN: XMJWNV.
4. *Макарова Е. И.* Результаты ферментации целлюлозы мискантуса в ацетатном буфере и водной среде // Химия в интересах устойчивого развития. 2013. Т. 21, № 2. С. 219–225. EDN: SZUOEX.
5. *Макарова Е. И., Будаева В. В.* Биоконверсия непищевого целлюлозосодержащего сырья часть 2 // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2016. №3 (18). С. 26–34. DOI: 10.21285/2227-2925-2016-6-3-26-35.

6. *Приседський Ю. Г.* Статистична обробка результатів біологічних експериментів: навчальний посібник. Донецьк: ТОВ «Норд Компьютер», 1999. 210 с.

7. *Синицын А. П., Черноглазов В. М., Гусаков А. В.* Методы изучения и свойства целлюлозолитических ферментов // Итоги науки и техники. Сер. Биотехнология. 1993. Т. 25. 152 с.

8. *Сушкова В. И., Устюжанинова Л. В., Березина О. В., Яроцкий С. В.* Методы подготовки растительного сырья к биоконверсии в кормовые продукты и биоэтанол // Химия растительного сырья. 2016. № 1. С. 93–119. DOI: 10.14258/jcprm.201601841. EDN: VPWXAX.

9. *Тышкунова И. В., Синельников И. Г.* Влияние расхода ферментного препарата *Penicillium verruculosum* на степень конверсии технической целлюлозы до глюкозы // Актуальная биотехнология. 2016. № 2(17). С. 4–7. EDN: XEEBJN.

10. *Уткина А. В., Ожимкова Е. В.* Ферментативная обработка льняной костры в процессе получения биоэтанола // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2024. № 3. С. 39–51. DOI: 10.24412/2071-6176-2024-3-39-51. EDN: IICZWN.

11. *Чемерис О. В.* Оценка возможности применения ферментного препарата целлюлаз *Irpex lacteus* для осахаривания растительных отходов // Современная микология в России: Материалы международ. микологического форума. Т. 10. М.: Национальная академия микологии, 2024. С. 324–326.

12. *Чемерис О. В.* Получение ферментного препарата целлюлаз базидиомицета *Irpex lacteus* (Fr.) Fr. и исследование его свойств // Вестник ДонНУ. Серия А: Естественные науки. 2024. № 4. С. 114 – 118. DOI: 10.5281/zenodo.14227685. EDN: SDVXZS.

13. *Шаполова Е. Г., Бычков А. Л., Ломовский О. И.* Механическая активация процесса ферментативного осахаривания углеводов рисовой шелухи // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20, № 5. С. 639–644. EDN: PIWHAR.

14. *Faiza N., Imran A., Arshad M. U., Arshad M. S., Shah M.A.* Valorization and characterization of corn by-product polyphenols through green extraction technologies // Front. Nutr. 2023. Vol. 10: 1107067. DOI: 10.3389/fnut.2023.1107067.

15. *Liu G. L., Bu X.Y., Chen C. et al.* Bioconversion of non-food corn biomass to polyol esters of fatty acid and single-cell oils // Biotechnology for Biofuels and Bioproducts. 2023. Vol. 16: 9. 14 p. https://doi.org/10.1186/s13068-023-02260-z.

16. *Nelson N.* A photometric adaptation of the Somogyi method for the determination of sugars // J. Biol. Chem. 1944. Vol. 153, No 2. P. 375–379.

Поступила в редакцию 17.11.2024 г.

Chemeris O. V. **Enzymatic hydrolysis of corn cob processing waste by cellulases of the strain *Irpex lacteus* (Fr.) Fr. 2434.** – The features of enzymatic hydrolysis in citrate-phosphate buffer of corn cob processing waste (corn cob wrappers and rods) by cellulases of the *Irpex lacteus* 2434 strain were studied in laboratory conditions. It has been established that the enzyme preparation cellulase acts within the pH range of 4.0–5.5. In order to increase the yield of reducing sugars and glucose, it is necessary to introduce an enzyme preparation of the strain *I. lacteus* 2434 in an amount of 10 mg/g of substrate.

Key words: cellulases, enzymatic hydrolysis, plant waste, *Irpex lacteus*

Чемерис Оксана Вячеславовна
кандидат биологических наук;
старший научный сотрудник НИЧ
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
г. Донецк, ДНР, РФ.
E-mail: *chemeris07@rambler.ru*
ORCID: 0000-0002-2446-4710
AuthorID: 869557

Chemeris Oksana Viacheslavovna
Candidate of Biological Sciences;
Senior Researcher of the Research Department,
Donetsk State University,
Donetsk, DPR, Russian Federation.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Для публикации в научно-практическом журнале «Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона» принимаются не опубликованные ранее научные роботы по всем разделам биологии (ботаника, физиология растений, зоология, физиология человека и животных, биофизика и др.), которые касаются проблем экологии и охраны природы. В печать принимаются научные статьи на русском и английском языках, которые имеют необходимые элементы: постановка проблемы в общем виде и еѐ связь с важнейшими научными и практическими задачами; анализ последних достижений и публикаций, в которых рассмотрена данная проблема и на которые ссылается автор, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, на решение которых направлена данная статья; формулирование цели и постановка задач; изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов; выводы из этого исследования и перспективы дальнейших исследований в данном направлении.

2. Статья набирается в редакторе MS Word как документ Word (*.doc, *.docx) или текст в формате RTF (*.rtf). Шрифт – Times New Roman Cyr, размер – 12 пунктов, межстрочный интервал – одинарный; поля со всех сторон – по 2 см; абзацный отступ – 1 см; выравнивание – по ширине, без переносов; колонтитулы – 1,2 см, стиль «Обычный». Страницы рукописи не нумеруются.

Объем статьи (включая иллюстративный материал, таблицы, список литературы, резюме) – 5–16 страниц.

3. Текст статьи должен соответствовать структурной схеме:

УДК (в верхнем левом углу страницы)

Инициалы и фамилия автора (-ов)

Название статьи – **ЗАГЛАВНЫМИ БУКВАМИ**

Полное официальное название учреждения и его почтовый адрес с индексом
(для каждого из авторов, если они представляют разные учреждения)

4. Резюме (не более 50 слов) и ключевые слова подаются на русском и английском языках по такому образцу (размер шрифта – 10 пунктов):

Фамилия и инициалы автора (-ов). **Название статьи.** – Текст, который должен содержать краткое изложение предмета исследований, результатов и выводов.

Ключевые слова: не более 5–8 слов.

5. В тексте статьи выделяют разделы: **Введение, Материал и методы исследования, Результаты и обсуждение, Выводы, Список литературы**.

Благодарности, информацию об источниках финансирования подаются в конце статьи перед списком литературы.

6. Список литературы приводится согласно с правилами оформления библиографического списка (ГОСТ Р 7.05-2008).

Фамилии и инициалы авторов выделить курсивом.

Ссылки на литературные источники подаются цифрами в квадратных скобках.

Фамилии авторов в списке литературы размещаются в алфавитном порядке. Названия работ приводятся на языке оригинала.

Следует тщательно выверить соответствие литературных источников в тексте и в списке, проверить правильность названий периодических источников. При цитировании материалов и тезисов конференций, съездов, симпозиумов и др. обязательно указывать место

и дату их проведения. При цитировании издания коллектива авторов следует указывать инициалы и фамилию ответственного редактора.

7. Латинские названия *родов* и *видов* необходимо выделить *курсивом*. Первое упоминание любого названия организма должно сопровождаться полным научным (латинским) названием с указанием автора (фамилия полностью) и года опубликования (например, *Passer domesticus* (Linnaeus, 1758)), при следующем упоминании фамилия автора и год не приводятся, а название рода можно подавать сокращенно (*P. domesticus*).

8. В тексте, таблицах и списке литературы (там, где необходимо) следует употреблять короткое тире (–), а не дефис (-). Любой знак препинания набирается слитно с предыдущим словом и отделяется от последующего одним пробелом. Текст статьи должен быть тщательно выверен, без орфографических и стилистических ошибок.

9. Таблицы следует набирать в редакторе MS Word, размещать в «книжном», а не в «альбомном» формате, с максимальной насыщенностью информацией в строках. В названиях граф сокращение слов нежелательно. Следует избегать составления слишком громоздких таблиц. Заголовок таблицы оформить по следующему примеру:

Таблица 1

Название таблицы

10. Рисунки, схемы, графики, диаграммы, фотографии в электронной форме должны быть вставлены в текст, сразу после ссылки на них (или на следующей странице). Подписи под рисунками делать в текстовом редакторе MS Word (**Рис. 1. Название**), размер шрифта – 10 пунктов, выравнивание – «по середине». Все элементы текста на графиках и диаграммах должны быть набраны шрифтом Times New Roman Cyr. Фотографии должны быть качественными и контрастными. Объем иллюстративного материала и таблиц не должен превышать 30 % объема статьи.

11. Математические формулы и уравнения приводить с использованием редактора MS Equation 3.0.

12. Сокращения слов, кроме общепринятых, не допускаются или обязательно дается их расшифровка.

13. К статье прилагается письмо-заявление от организации, сведения об авторах (фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, должность, место работы, почтовый адрес, телефон, E-mail, ORCID, Author ID).

14. Если статья подается на английском языке, то прилагается ее русский вариант.

15. Ответственность за содержание статей и качество рисунков несут авторы.

16. Рукопись проходит независимое анонимное рецензирование специалистами на предмет научной ценности статьи, ее соответствия профилю и требованиям журнала. По рекомендации рецензентов редколлегия принимает решение о возможности и условиях опубликования статьи. Редакционная коллегия оставляет за собой право редактировать текст по согласованию с авторами.

Все материалы направляйте электронной почтой по адресу: dongu_eco@mail.ru

Адрес редакции:
Биологический факультет ДонГУ,
ул. Щорса, 46, к. 202, г. Донецк, ДНР, 283050, Россия

Отв. секретари: к.б.н. Чемерис Оксана Вячеславовна,
к.б.н. Пирко Инна Федоровна
Тел.: +7 (856) 302-09-93
http://donnu.ru/ecolog

Научно-практический журнал

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ И ОХРАНЫ ПРИРОДЫ ТЕХНОГЕННОГО РЕГИОНА

2024

№ 4

Учредитель: ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»

Свидетельство о регистрации СМИ, выданное Министерством информации ДНР:
Серия ААА № 000073 от 21.11.2016 г.

Оригинал-макет: О. В. Чемерис, И. Ф. Пирко