

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

№ 2

Основан в 1999 г.

PROBLEMS OF ECOLOGY AND NATURE PROTECTION OF TECHNOGENIC REGION

Scientific and practical journal

No 2

Founded in 1999

2026

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»
Вардун 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	ФГБНУ «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 № 230-11/2025 от 17 ноября 2025 г.).

Адрес издателя:

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации 125009, г. Москва, вн. тер. г. Муниципальный Округ Тверской, ул. Тверская, д. 11, стр. 1;
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донецкий государственный университет» 283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24

Адрес редакции:

Россия, 283050, г. Донецк, ул. Щорса, 46, к. 310.

Сайт журнала: <https://dongu-ecolog.ru/>

E-mail: dongu_eco@mail.ru

Печатается по решению Ученого совета ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
протокол № 13 от 26.06.2026 г.

© ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», 2026

The journal "Problems of Ecology and Nature Protection of Technogenic Region" publishes papers of academic staff, scientific employees and post-graduate students of high schools and research organizations that cover a wide range of questions of ecological, floristic, faunistic, biophysical and physiological orientation related to 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
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

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).

Journal is included in the List of Russian scientific citation index (license agreement No 230-11/2025 dated 17.11.2025).

Publisher's address:

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Tverskoy Municipal District, Tverskaya St., 11, building 1, Moscow, 125009;
Donetsk State University, 24 Universitetskaya str., Donetsk, 283001.

Address of editorial board:

Faculty of Biology, Donetsk State University, Schorsa str., 46, room 310, Donetsk, DPR, 283050.

Web-site of journal: <https://dongu-ecolog.ru/> E-mail: dongu_eco@mail.ru

*Printed by decision of Donetsk State University Scientific Council
protocol No 13 dated 26.06.2026*

СОДЕРЖАНИЕ

ФЛОРА, ЭКОЛОГИЯ И ОХРАНА РАСТИТЕЛЬНОГО МИРА

<i>Жучков Д. В.</i> Роль зеленых насаждений в смягчении эффекта городского теплового острова (на примере г. Биробиджана)	6
<i>Коренская И. М., Дьякова Н. А.</i> Элементный профиль <i>Mentha aquatica</i> L. Воронежской области	16
<i>Носова М. В., Середина В. П., Стовбунник С. А.</i> Полевые исследования гидрофизической дегидратации почв в среднетаежной подзоне Западной Сибири	26

ФАУНА, ЭКОЛОГИЯ И ОХРАНА ЖИВОТНОГО МИРА

<i>Тищенко А. А.</i> Структура гнездовой орнитофауны города Рыбница в начале XXI века (Приднестровье)	38
---	----

ФИЗИОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ, МИКОЛОГИЯ

<i>Дьякова Н. А.</i> Накопление тория-232 в лекарственном растительном сырье Воронежской области	49
<i>Усик Д. А.</i> Структурно-функциональная пластичность стебля травянистых растений при градиенте освещенности	60

C O N T E N T S

FLORA, ECOLOGY AND PROTECTION OF THE PLANT KINGDOM

Zhuchkov D. V. The role of green spaces in mitigating the urban heat island effect (a case study of Birobidzhan).....	6
Korenskaya I. M., Dyakova N. A. Element profile <i>Mentha aquatica</i> L. Voronezh region.....	16
Nosova M. V., Seredina V. P., Stovbunik S. A. Field studies of hydrophysical dehydration of soils in the middle taiga subzone of Western Siberia	26

FAUNA, ECOLOGY AND PROTECTION OF THE ANIMAL KINGDOM

Tischenkov A. A. Structure of the nesting avifauna of Rybnitsa City at the beginning of the XXI century (Pridnestrovie).....	38
---	-----------

PHYSIOLOGY AND ECOLOGY OF THE PLANT, MYCOLOGY

Dyakova N. A. Accumulation of thorium-232 in medicinal plant raw materials of the Voronezh region.....	49
Usik D. A. Structural and functional plasticity of herbaceous plants stems under illumination gradients.....	60

© Д. В. Жучков

**РОЛЬ ЗЕЛЕННЫХ НАСАЖДЕНИЙ В СМЯГЧЕНИИ ЭФФЕКТА ГОРОДСКОГО
ТЕПЛОВОГО ОСТРОВА (НА ПРИМЕРЕ Г. БИРОБИДЖАНА)***ФГБУН «Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН»
Россия, 679016, г. Биробиджан, ул. Шолом-Алейхема, д. 4*

Жучков Д. В. Роль зеленых насаждений в смягчении эффекта городского теплового острова (на примере г. Биробиджана). – В статье приведены результаты оценки интенсивности эффекта теплового острова г. Биробиджана, а также его изменчивость в зависимости от плотности застройки, доли запечатанных почв и уровня озеленения. Определено, что интенсивность эффекта в градиенте «город–пригород» достигает в среднем 1,4 °С. Однако максимальная разница (2,2 °С) отмечена при сравнении температуры воздуха центра города и пригородных лесов. Анализ пространственной неоднородности территории при движении с северо-запада на юго-запад позволил выявить локальный термический контраст. Так, между центром города и пригородом он достигает 7,3 °С. В связи с этим, учет только данных об интенсивности городского теплового острова не позволяет в полной мере говорить о реальной ситуации с термическими характеристиками городских и пригородных территорий. Максимальная температура воздуха отмечена в общественно-деловой зоне города и его центре (пешеходная зона «Арбат»), а также в многоэтажной жилой застройке. Напротив, минимальные значения отмечены в пригородных и городских лесных массивах, парке и скверах, где сформирован полог древесных насаждений, создающий затенение и способствующий испарению. Следовательно, развитие зеленых насаждений г. Биробиджана, особенно деревьев с широкой кроной, и охрана городских и пригородных лесных массивов являются актуальными направлениями в борьбе с эффектом городского теплового острова, высокой температурой и душной погодой в летний сезон с целью повышения комфортности проживания.

Ключевые слова: городской тепловой остров, охлаждающий эффект, термический режим, зеленые насаждения, система озеленения, город, запечатанность почв, уровень озеленения, плотность застройки.

Введение

Микроклимат урбанизированных территорий характеризуется устойчивым повышением температуры, что обусловлено преобладанием искусственных непроницаемых поверхностей. В научной литературе данное явление определяется как эффект городского теплового острова (от англ. *Urban Heat Island, UHI*) [1, 7, 16, 18, 19]. Выраженность эффекта может увеличиваться в период прохождения волн тепла, что, в свою очередь, оказывает негативное влияние на здоровье и самочувствие людей. В исследованиях, выполненных в разных городах мира, показано, что максимальные температуры воздуха отмечаются в городских центрах, промышленных и жилых районах с высокой плотностью застройки и низким уровнем озеленения. Минимальные значения часто фиксируются в районах индивидуальной жилой застройки, скверах и парках, а также на территориях, примыкающих к периферийным зонам [15, 16, 18]. Однако проявление городского теплового острова для каждого населенного пункта имеет выраженную региональную специфику. Например, в летний сезон разница между промышленной зоной и окружающими лесными массивами достигает 10 °С в г. Ханое (Вьетнам) [9], тогда как в Москве и ближайшими городскими и сельскими населенными пунктами аналогичный показатель не превышает 2,6 °С [10, 11]. Для Якутска также зафиксирована десятиградусная разница между центром города и пригородом [14], в Тюмени – 9 °С [6].

Одним из наиболее эффективных способов смягчения эффекта городского теплового острова в теплый период года признается развитие системы зеленых насаждений, крупных

объектов озеленения и лесопарковых поясов (городских лесов, лесопарков) [12, 18, 20, 22]. Основываясь на результатах исследований, указывается, что охлаждающий эффект озеленения зависит от комплекса факторов: площади зеленых зон, их связанности линейными объектами озеленения, состав и конфигурация насаждений, проективное покрытие крон деревьев [7, 8, 21, 22], а также наличие водных объектов в границах озелененных территорий [15]. На примере исследований, проведенных в Воронеже [12], Ессентуках [13] и др. [6, 10, 11, 18], было установлено, что зеленые насаждения выполняют охлаждающую роль и выступают в противовес плотно застроенным городским территориям, где отмечается наиболее высокая интенсивность городского теплового острова.

Спецификой климатических условий Приамурья является их принадлежность к муссонной зоне, для которой в летний сезон характерно сочетание высоких температур и влажности воздуха, формирующие душный эффект. Волны тепла, представляющие собой опасное природное явление, негативно сказываются на здоровье жителей, социально-экономической активности населения и создают нагрузку на систему здравоохранения. Воздействие данного явления усугубляется эффектом городского теплового острова.

Изложенное выше также актуально для административного центра Еврейской автономной области (ЕАО) – г. Биробиджана, расположенного в Среднем Приамурье. Оценка биоклимата города и области в целом приводятся в работах Е. А. Григорьевой [2–4]. Однако количественная оценка эффекта городского теплового острова в г. Биробиджане и анализ влияния на него зеленых насаждений ранее не проводились.

Цель работы – выявление и количественная характеристика эффекта городского теплового острова в г. Биробиджане и оценка роли зеленых насаждений в его смягчении.

Материал и методы исследования

Исследования проводились в административных границах г. Биробиджана (ЕАО), площадь которого составляет около 170 км², численность населения в 2025 г. – 67,2 тыс. человек. Дополнительно данные собирались в ближайших пригородных селах: Кирга, Раздольное, Икура, Птичник, Валдгейм и на территориях с пригородными лесами, луговыми фитоценозами, которые выступали в качестве площадок с фоновыми значениями исследуемых микроклиматических показателей.

Город характеризуется умеренным муссонным климатом. Средняя температура самого холодного месяца (январь): –22 °С. Относительно низкая скорость ветра делает зиму Биробиджана комфортнее, чем в Хабаровске, а отсутствие сильных морозов отличает его от Благовещенска. Средняя температура самого теплого месяца (июль) +21,7 °С. Лето в городе теплое, влажное с большим количеством осадков, особенно в конце июля–первой половины августа.

Для обеспечения репрезентативности собираемых данных в границах исследуемых территорий было заложено 400 точек замеров. Выбор местоположений осуществлялся на основе функционального зонирования, преобладающих типов поверхности и характеристик озеленения.

Полевые работы проводились с начала июля до середины августа 2025 г. в дни с ясной погодой, а также в период прохождения волны жары. Измерения осуществлялись в часы максимальной тепловой нагрузки – с 12:00 до 15:00. Для повышения достоверности на каждой точке замеры выполнялись в течение трех последовательных дней, после чего значения усреднялись [17].

Параллельно в 13:00 фиксировались данные со стационарной метеостанции Биробиджан (индекс ВИМ 31713), расположенной в Биробиджанском районе (с. Птичник), получаемые через официальный ресурс Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Эти данные использовались в качестве независимого контроля и учитывались при расчете средней температуры пригородной зоны.

Для сбора микроклиматических показателей использовались следующие приборы:

1) Измерительный параметров микроклимата «Метеоскоп-М», используемый для стационарных замеров, обеспечивающий непрерывную регистрацию температуры и влажности воздуха, скорости ветра.

2) Измеритель комбинированный «ТАММ-20М» для маршрутных исследований.

Оба прибора имеют действующую заводскую поверку. Дополнительно в летний сезон 2025 г. проводилась их синхронная калибровка в условиях метеостанции Биробиджана перед проведением исследований.

Для визуализации изменений данных температур, полученных в ходе полевых измерений, было выполнено картографирование в геоинформационной программе QGIS. На первом этапе был создан точечный векторный слой, содержащий информацию о месторасположении каждой точки и показателей температуры воздуха. Затем, с помощью инструмента «Contour», по этим точкам было проведено построение изолиний. На основе полученных векторных данных в модуле «Интерполяция TIN» был построен растровый слой температуры воздуха анализируемой территории.

Интенсивность теплового острова ($\Delta T_{\text{инт}}$, °C) рассчитывалась как разность между средней температурой воздуха, зафиксированной по всем точкам в городской зоне ($T_{\text{город}}$, °C), и средней температуры воздуха в пригородной зоне ($T_{\text{пригород}}$, °C) [5]:

$$\Delta T_{\text{инт}} = T_{\text{город}} - T_{\text{пригород}}$$

Результаты и обсуждение

Проявление и интенсивность теплового острова в г. Биробиджане. Результаты, полученные в ходе полевых исследований, позволили выявить пространственные различия термического режима по функциональным зонам (ФЗ) г. Биробиджана (табл. 1).

Таблица 1

Термические характеристика анализируемых функциональных зон г. Биробиджана

ФЗ	Температура воздуха, °C (mean)	Отклонение от среднего по городу, °C	Плотность застройки, %	Запечатанность почв, %	Открытые пространства, в т. ч. зеленые зоны, %
Центральные, общественно-деловые и коммерческие	32,7	+2,5	25,1	49,9	50,1 (29,6)
Жилые зоны, в т. ч.: 1) индивидуальная 2) малоэтажная и многоэтажная (свыше 2 этажей)	31,2 32,4	+1 +2,2	11,0 19,3	32,0 42,8	68 (44,3) 57,2 (37,9)
Производственные и коммунально-складские зоны	32,1	+1,9	24,9	42,7	57,3 (32,1)
Природно-рекреационные зоны	28,9	-1,3	0,9	24,0	76,0 (61,7)
Специального назначения	29,8	-0,4	9,2	31,5	68,5 (53,7)
Среднее по городу	30,2				

Максимальная средняя температура зафиксирована в центральной и общественно-деловой зоне (32,7 °C), что на 2,5 °C выше среднегогородского показателя. Это связано с высокой долей запечатанных почв (49,9 %) и значительной плотностью застройки (25,1 %). Несмотря на относительно большую долю открытых пространств (50,1 %), доля непосредственно зеленых насаждений здесь минимальна среди всех ФЗ города (29,6 %).

В жилых зонах прослеживается четкая связь между этажностью застройки и температуры воздуха. В зоне малоэтажной (здание от 2 до 4 этажей) и многоэтажной (выше 5) жилой застройки средняя температура составляет 32,4 °С (+2,2 °С к среднему по городу). Показатель коррелирует с высоким процентом запечатанных почв (42,8 %) и плотностью застройки (19,3 %), формирующих поверхности из асфальта и бетона, интенсивно нагреваемых в дневное время.

В зоне индивидуальной жилой застройки зафиксирован относительно меньший нагрев. Средняя температура здесь составляет 31,2 °С. Доля запечатанных почв также ниже – 32 %, как и плотность застройки – 11 %. Большая площадь открытых пространств (свободных от застройки), включая приусадебные участки и озелененные территории, способствует снижению температуры воздуха по сравнению с кварталами многоэтажной застройки.

Высокие температуры отмечены и для производственных и коммунально-складских ФЗ (32,1 °С), что также обусловлено значительной долей непроницаемых поверхностей и застроенных территорий. Напротив, зона специального назначения близка к среднему значению по городу (–0,4 °С от среднего), что объясняется неоднородностью морфологии землепользования этой категории. Здесь представлены как участки с плотной застройкой и высокой долей искусственных поверхностей – режимные и военные объекты, так и лесные массивы у защитных сооружений и городских кладбищ.

Природно-рекреационная зона города демонстрирует наиболее выраженный охлаждающий эффект. Температура воздуха здесь на 1,3 °С ниже среднегогородского значения. Максимальная доля зеленых насаждений (61,7 %), минимальная запечатанность почв (24 %) и низкая плотность застройки (0,9 %) формируют комфортные условия за счет затенения и испарения.

Градиент температуры в системе «город–пригород». Для оценки интенсивности городского теплового острова были определены термические характеристики пригородной зоны Биробиджана (табл. 2).

Таблица 2

Термические характеристика и типы поверхностей пригородной зоны г. Биробиджана

Территория	Температура воздуха, °С (mean)	Отклонение от среднего по городу, °С	Плотность застройки, %	Запечатанность почв, %	Открытые пространства, в т. ч. зеленые зоны, %
Лесные массивы в пригороде	28,0	-2,2	0,1	3,1	96,1 (90,2)
Сельская местность в пригороде	29,8	+0,4	5,6	27,1	72,9 (54,2)
Метеостанция Биробиджан	28,6	-1,6	-	-	-
Среднее в пригороде	28,8				

Прослеживается устойчивый градиент снижения температур воздуха по направлению от центра города к пригородным территориям. Так, температура в сельской местности пригорода в среднем на 1,4 °С ниже, чем в зоне индивидуальной застройки Биробиджана, и на 0,4 °С ниже общегородского показателя. Минимальные температуры зафиксированы в лесных массивах пригорода (28 °С), что на 2,2 °С ниже среднего по городу.

Таким образом, интенсивность эффекта теплового острова г. Биробиджана, определенная как разность между среднегогородской температурой (30,2 °С) и средней температурой пригорода (28,8 °С), составила 1,4 °С. Результат количественно подтверждает влияние степени трансформации городского землепользования – от обширных застроенных и запечатанных территорий при относительно низком уровне озеленения до открытых пространств с высокой долей зеленых насаждений – на формирование локального термического режима.

Пространственная неоднородность городского теплового острова г. Биробиджана. Контраст в локальном распределении температур важен для понимания охлаждающей роли различных типов озелененных территорий. Различия в пространственном распределении значений температуры воздуха по конкретным точкам наблюдения представлены на рисунке 1. Красной линией на рисунке проведен профиль температур по точкам наблюдений.

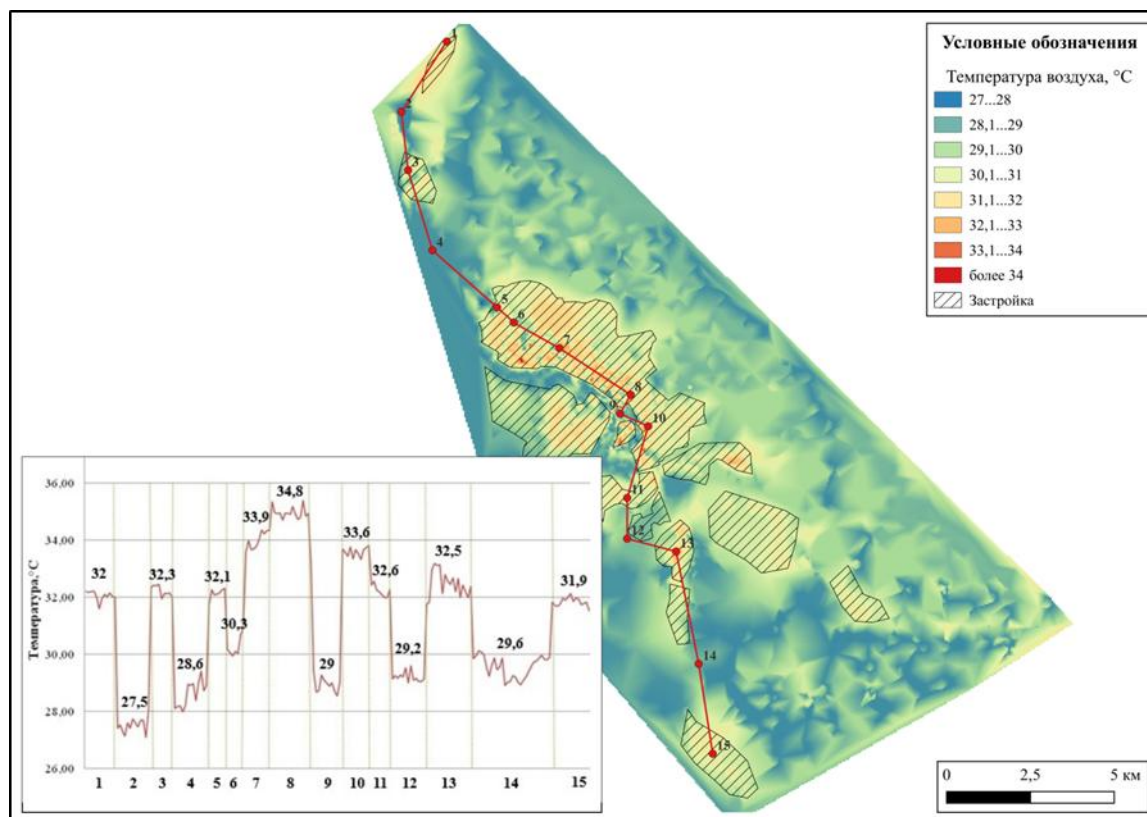


Рис. 1. Распределение значений температур воздуха по исследуемой территории в границах г. Биробиджана и ближайшем пригороде

На рисунке 1 представлены точки наблюдений с северо-запада (с. Кирга) на юго-запад (с. Валдгейм), связывающие ключевые участки города, различаемые в доле непроницаемых поверхностей и уровне озеленения (табл. 3). Описание каждой точки проводилось на основе следующих характеристик климатопов:

1. Доля застроенной территории, % (отношение площади всех застроенных территорий к общей площади анализируемого участка);
2. Доля дорожной сети, в том числе тротуарной, %;
3. Доля озеленения травяной и кустарниковой растительностью, %;
4. Доля озеленения древесной растительностью, %.

Таблица 3

Термические характеристики и морфология анализируемых ключевых участков

Номера на рис. 1	Наименование участка	Температура воздуха, °C			Характеристика климатопов			
		min	max	mean	1	2	3	4
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	село Кирга	31,8	32,3	32	27	12	36	25
2	Пригородный лес	27,1	28,0	27,5	0	0	30	70
3	село Раздольное	31,9	32,5	32,3	33	14	36	17
4	Городской лес	28,0	29,4	28,6	0	0	36	64
5	Восточная окраина г. Биробиджана	31,8	32,3	32,1	15	9	41	35
6	Сквер	29,9	30,9	30,3	0	14	38	48

Продолжение табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
7	Общественно-деловая зона (территория ТЦ)	33,6	34,4	33,9	66	23	8	3
8	Городской центр (пешеходная зона «Арбат»)	33,7	35,4	34,8	70	21	6	3
9	Парк культуры и отдыха	28,6	29,5	29,0	4	11	28	57
10	Многоэтажная жилая застройка (от 5 этажей)	33,3	33,8	33,6	67	29	3	1
11	Индивидуальная жилая застройка	32,0	32,9	32,6	23	13	51	13
12	Пойма р. Бира	29,0	29,6	29,2	0	0	31	69
13	село Птичник	31,8	33,2	32,5	31	15	32	22
14	Луговой фитоценоз	28,9	30,2	29,6	0	0	100	0
15	село Валдгейм	31,6	32,3	31,9	26	14	35	25

Анализ данных показывает, что в период измерений максимальные температуры воздуха (свыше 34 °C) отмечались в городском центре на территории пешеходной зоны «Арбат», где суммарная доля озеленения составляет всего 9 %. Высокие значения (33,9 °C и 33,6 °C) зафиксированы также в общественно-деловой и многоэтажной жилой зонах, для которых характерен высокий процент непроницаемых поверхностей. Непосредственно в городской застройке заметное снижение температуры наблюдается на территории сквера (№ 6), городского парка культуры и отдыха (№ 9) и в пойме р. Бира (№ 12). Это снижение связано с высоким проективным покрытием древесной растительности и наличием водных объектов в районе точек 9 и 12.

Локальный термический контраст, установленный между центральной частью города и пригородными лесными массивами, достигает разницы в 7,3 °C, а с учетом пригородных сельских поселений – до 3 °C. Следовательно, интегральный показатель интенсивности теплового острова (1,4 °C) в полной мере не отражает реальной ситуации с термическими характеристиками городских и пригородных территорий.

Сопоставление данных по точкам с разной структурой озеленения позволяет оценить роль зеленых насаждений. Сравнение точек 2 (пригородный лес) и 4 (городской лес), а также 9 и 12 (различные типы внутригородских озелененных территорий) с точкой 14 (луговой фитоценоз) показывает, что максимальный охлаждающий эффект создают древесные насаждения с высокой сомкнутостью крон. Травянистая растительность обеспечивает лишь охлаждение за счет испарения, но при этом она не создает затенения, в связи с чем она менее эффективна в снижении дневных температур. На примере рассмотренного сквера (№ 6) также отмечается снижение температуры воздуха, но его охлаждающая способность на 2–2,5 °C отличается от территорий с наиболее развитым древесным покровом. Следовательно, для смягчения эффекта теплового острова г. Биробиджана приоритетное значение имеет не просто увеличение площади озеленения, а формирования многоярусных крупных озелененных территориях с обязательным участием древесных растений с широкой кроной. Дополнительно необходимо обеспечение связанности этих территорий с помощью линейных объектов озеленения, формирующих единую систему озеленения города – насаждения вдоль дорог/тротуаров, бульвары, аллеи и пр. Такой подход позволит повысить эффективность охлаждающего эффекта за счет затенения и эвапотранспирации [20, 22].

Выводы

На основе результатов полевых исследований впервые для г. Биробиджана количественно оценена интенсивность городского теплового острова. В градиенте «город–пригород» в среднем она составляет 1,4 °C.

Определено, что локальный контраст температур между застроенными территориями и озелененными пространствами достигает 7,3 °C.

Ключевыми факторами в повышении температуры воздуха в городской застройке являются высокая доля запечатанных почв и плотность застройки. При этом основным

фактором в смягчении действия высоких температур являются зеленые насаждения, эффективность которых зависит от их структуры.

Расчетным путем установлено, что многоярусные древесные насаждения с сомкнутыми кронами обладают в 2–2,5 раза более высоким потенциалом охлаждения по сравнению с травянистыми пространствами.

Для адаптации территории города и его населения к волнам жары и высоким температурам в летний сезон необходимо:

- сохранение существующих лесных массивов, расположенных на периферии;
- создание и развитие многоярусных насаждений с преобладанием деревьев с широкой кроной;
- обеспечение связанности крупных озелененных пространств линейными объектами озеленения в единый зеленый каркас города.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИКАРП ДВО РАН, тема № 1021062311241-6-1.6.20;1.6.22;1.6.15;1.5.12 Основные закономерности динамических процессов в биологических популяциях и сообществах на примере экосистем Среднего Приамурья (FWUG2024-0005).

This work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Water and Ecology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IWEF FEB RAS), under topic No. 1021062311241-6-1.6.20;1.6.22;1.6.15;1.5.12 "Fundamental patterns of dynamic processes in biological populations and communities, using the ecosystems of the Middle Amur region as a case study" (FWUG2024-0005).

Список литературы

1. Гиясов А. И. Модель «острова тепла» урбанизированных территорий и его трансформация // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 2. С. 180–192. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.180-192.
2. Григорьева Е. А. Интегральная оценка эколого-климатических условий Еврейской автономной области // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2010. № 3. С. 65–70.
3. Григорьева Е. А. Биоклимат Дальнего Востока России и здоровье населения // Экология человека. 2019. № 5. С. 4–10.
4. Григорьева Е. А., Фетисов Д. М. Оценка пригодности климата региона для спортивно-оздоровительной рекреации // Проблемы региональной экологии. 2009. № 6. С. 211–216.
5. Демин В. И., Козелов Б. В., Горбань Ю. А. Влияние микроклимата на оценки интенсивности городского острова тепла // Фундаментальная и прикладная климатология. 2019. Т. 3. С. 76–91. DOI: 10.21513/2410-8758-2019-3-76-91.
6. Добрякова В. А. Исследование и моделирование городского острова тепла на примере г. Тюмени // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2025. Т. 31. Ч. 3. С. 195–211. DOI: 10.35595/2414-9179-2025-3-31-195-211.
7. Корниенко С. В. Совершенствование температурного режима урбанизированных территорий на основе климатополюсов // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2024. № 4 (48). С. 68–75. DOI: 10.22227/2311-1518.2024.4.68-75.
8. Косицына Э. С., Рубанова Е. Ю. К вопросу о роли и влиянии озеленения на формирование микроклимата городов степной и полупустынной зон // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2012. № 27(46). С. 170–173.
9. Ле Минь Туан, Шкуров И. С., Нгуен Тхи Май. Исследование интенсивности городского острова тепла на основе городской планировки // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9, №. 3. С. 2. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.3.2.

10. Локощенко М. А., Енукова Е. А., Алексеева Л. И. О современных изменениях «острова тепла» Москвы // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 511, № 2. С. 243–253. DOI: 10.31857/S2686739723600728.
11. Локощенко М. А., Енукова Е. А. Острова тепла малых городов и деревень московского региона // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 500, № 2. С. 200–207. DOI: 10.31857/S268673972110011X.
12. Попова И. В., Куропан С. А., Виноградов П. М. Моделирование «городского острова тепла» средствами геоинформационного анализа // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2018. № 2(5). С. 87–95.
13. Скрипчинская Е. А. Пространственно-временная динамика теплового загрязнения среды г. Ессентуки // Наука. Инновации. Технологии. 2024. № 2. С. 63–96. DOI: 10.37493/2308-4758.2024.2.3.
14. Стручкова Г. П. Определение тепловых аномалий г. Якутск по результатам дешифрирования спутниковых данных // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2023. Т. 28, № 3. С. 415–424. DOI: 10.31242/2618-9712-2023-28-3-415-424.
15. Bartesaghi-Koc C. Mapping and classifying green infrastructure typologies for climate-related studies based on remote sensing data // Urban Forestry and Urban Greening. 2019. Vol. 37. P. 154–167. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.11.008.
16. Connors J. P., Galletti Ch. S., Chow W. T. L. Landscape configuration and urban heat island effects: assessing the relationship between landscape characteristics and land surface temperature in Phoenix, Arizona // Landscape Ecology. 2013. Vol. 28, No 2. P. 271–283. DOI: 10.1007/s10980-012-9833-1.
17. De Quadros B. M. Reliability of urban microclimate simulations: spatio-temporal validation through intra-urban canyon transects for outdoor thermal comfort analysis // International Journal of Biometeorology. 2024. Vol. 68. P. 2715–2729. DOI: 10.1007/s00484-024-02784-5.
18. Forman R. T. T. Urban Ecology: Science of Cities. Cambridge University Press; 2014. 462 p.
19. Furuya M. T. G. A machine learning approach for mapping surface urban heat island using environmental and socioeconomic variables: a case study in a medium-sized Brazilian city // Environmental Earth Sciences. 2023. Vol. 82, No. 13. P. 325. DOI: 10.1007/s12665-023-11017-8.
20. Li H. Cooling efficacy of trees across cities is determined by background climate, urban morphology, and tree trait // Communications Earth & Environment. 2024. Vol. 5. No 1. P. 754. DOI: 10.1038/s43247-024-01908-4.
21. Shaamala A. Algorithmic urban greening for thermal resilience: AI-optimised tree placement and species selection // Cities. 2025. Vol. 167. P. 106356. DOI: 10.1016/j.cities.2025.106356.
22. Wang J. A scaling law for predicting urban trees canopy cooling efficiency // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2024. Vol. 121, No 46. P. e2401210121. DOI: 10.1073/pnas.2401210121.

References

1. Giyasov, A. I. (2025). Model of the “heat island” of urbanized territories and its transformation. *Vestnik MGSU*, 20(2), 180–192, DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.180-192. (In Russian).
2. Grigorieva, E. A. (2010). Integral assessment of ecological and climatic conditions of the Jewish Autonomous Region. *Vestnik Rossiiskogo universiteta družby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost zhiznedeyatel'nosti*, 3, 65–70. (In Russian).
3. Grigorieva, E. A. (2019). Bioclimate of the Russian Far East and public health. *Ekologiya cheloveka*. 5, 4–10. (In Russian).
4. Grigorieva, E. A. & Fetisov, D. M. (2009). Assessment of the region's climate suitability for sports and recreational activities. *Problemy regionalnoi ekologii*, 6, 211–216. (In Russian).

5. Demin, V. I., Kozelov, B. V. & Gorban, Yu. A. (2019). Influence of microclimate on estimates of urban heat island intensity. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*, 3, 76–91, DOI: 10.21513/2410-8758-2019-3-76-91. (In Russian).
6. Dobryakova, V. A. (2025). Research and modeling of the urban heat island on the example of Tyumen city. *InterKarto. InterGIS*, 31(3), 195–211, DOI: 10.35595/2414-9179-2025-3-31-195-211. (In Russian).
7. Kornienko, S. V. (2024). Improvement of the temperature regime of urbanized territories based on climatopes. *Biosfernaya sovместimost: chelovek, region, tekhnologii*, 4(48), 68–75, DOI: 10.22227/2311-1518.2024.4.68-75. (In Russian).
8. Kositsyna, E. S. & Rubanova, E. Yu. (2012). On the role and influence of landscaping on the formation of microclimate in cities of the steppe and semi-desert zones. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*, 27(46), 170–173. (In Russian).
9. Le Minh Tuan, Shkurov, I. S. & Nguyen Thi Mai (2019). Investigation of urban heat island intensity based on urban planning. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie*, 9(3), 2. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.3.2. (In Russian).
10. Lokoshchenko, M. A., Eukova, E. A. & Alekseeva, L. I. (2023). On current changes in the Moscow “heat island”. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle*, 511(2), 243–253. DOI: 10.31857/S2686739723600728. (In Russian).
11. Lokoshchenko, M. A. & Eukova, E. A. (2021). Heat islands of small towns and villages in the Moscow region. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle*, 500(2), 200–207. DOI: 10.31857/S268673972110011X. (In Russian).
12. Popova, I. V., Kurolap, S. A. & Vinogradov, P. M. (2018). Modeling of the “urban heat island” using geoinformation analysis. *Zhilishchnoe khozyaistvo i kommunalnaya infrastruktura*, 2(5), 87–95. (In Russian).
13. Skripchinskaya, E. A. (2024). Spatio-temporal dynamics of thermal pollution of the environment in Essentuki city. *Nauka. Innovatsii. Tekhnologii*, 2, 63–96. DOI: 10.37493/2308-4758.2024.2.3. (In Russian).
14. Struchkova, G. P. (2023). Determination of thermal anomalies in Yakutsk city based on satellite data interpretation. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarkтики*, 28(3), 415–424. DOI: 10.31242/2618-9712-2023-28-3-415-424. (In Russian).
15. Bartesaghi-Koc, C. (2019). Mapping and classifying green infrastructure typologies for climate-related studies based on remote sensing data. *Urban Forestry and Urban Greening*, 37, 154–167. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.11.008. (In English).
16. Connors, J. P., Galletti, Ch. S. & Chow, W. T. L. (2013). Landscape configuration and urban heat island effects: assessing the relationship between landscape characteristics and land surface temperature in Phoenix, Arizona. *Landscape Ecology*, 28(2), 271–283. DOI: 10.1007/s10980-012-9833-1. (In English).
17. De Quadros, B. M. (2024). Reliability of urban microclimate simulations: spatio-temporal validation through intra-urban canyon transects for outdoor thermal comfort analysis. *International Journal of Biometeorology*, 68, 2715–2729. DOI: 10.1007/s00484-024-02784-5. (In English).
18. Forman, R. T. T. (2014). *Urban Ecology: Science of Cities*. Cambridge University Press. 462 p. (In English).
19. Furuya, M. T. G. (2023). A machine learning approach for mapping surface urban heat island using environmental and socioeconomic variables: a case study in a medium-sized Brazilian city. *Environmental Earth Sciences*, 82(13), 325. DOI: 10.1007/s12665-023-11017-8. (In English).
20. Li, H. (2024). Cooling efficacy of trees across cities is determined by background climate, urban morphology, and tree trait. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 754. DOI: 10.1038/s43247-024-01908-4. (In English).

21. Shaamala, A. (2025). Algorithmic urban greening for thermal resilience: AI-optimised tree placement and species selection. *Cities*. 167, 106356. DOI: 10.1016/j.cities.2025.106356. (In English).
22. Wang, J. (2024). A scaling law for predicting urban trees canopy cooling efficiency. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(46), e2401210121. DOI: 10.1073/pnas.2401210121. (In English).

Поступила в редакцию 06.05.2026 г.

Zhuchkov D. V. The role of green spaces in mitigating the urban heat island effect (a case study of Birobidzhan). – This article presents the results of an assessment of the intensity of the urban heat island (UHI) effect in Birobidzhan, as well as its variability depending on building density, the proportion of sealed soils, and the level of greening. It was determined that the intensity of the effect along the urban–suburban gradient averages 1.4 °C. However, the maximum temperature difference (2.2 °C) was observed when comparing air temperatures in the city center and suburban forests. An analysis of spatial heterogeneity when moving from northwest to southwest revealed a local thermal contrast. Specifically, the contrast between the city center and the suburbs reaches 7.3 °C. In this regard, relying solely on urban heat island intensity data does not fully reflect the actual thermal conditions of urban and suburban areas. The highest air temperatures were recorded in the city's public and commercial zone and its center (the "Arbat" pedestrian zone), as well as in high-rise residential areas. In contrast, the lowest values were observed in suburban and urban forests, parks, and squares, where a tree canopy is formed, providing shade and promoting evapotranspiration. Consequently, the development of green spaces in Birobidzhan – especially trees with broad crowns – along with the protection of urban and suburban forests, represent relevant strategies for combating the urban heat island effect, high temperatures, and oppressive summer weather, with the aim of improving living comfort.

Keywords: urban heat island, cooling effect, thermal regime, green spaces, greening system, city, soil sealing, level of greening, building density.

Жучков Дмитрий Витальевич

младший научный сотрудник,
ФБГУН «Институт комплексного анализа
региональных проблем ДВО РАН»,
г. Биробиджан, РФ.
E-mail: dmitriy.zhuchkov.2000@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7474-2910
SPIN-код: 5692-2930
Author ID: 1115838

Zhuchkov Dmitry Vitalyevich

junior researcher
Institute for Complex Analysis of Regional Problems
Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences,
Birobidzhan, Russian Federation.

© И. М. Коренская, Н. А. Дьякова

ЭЛЕМЕНТНЫЙ ПРОФИЛЬ *MENTHA AQUATICA* L. ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»
Россия, 394006, г. Воронеж, Университетская пл., д. 1

Коренская И. М., Дьякова Н. А. Элементный профиль *Mentha aquatica* L. Воронежской области. –

В статье приведены результаты масс-спектрометрического определения элементного профиля *Mentha aquatica* L. Воронежской области. *M. aquatica* активно поглощает из почвы жизненно важные макроэлементы (фосфор, магний, кальций, калий, натрий), а также ряд высокотоксичных элементов (кадмий, свинец, мышьяк). *M. aquatica* имеет барьерный механизм всасывания в отношении алюминия, железа и редкоземельных металлов. Возможно использование *M. aquatica* в качестве биоиндикатора загрязнения почв тяжелыми металлами.

Ключевые слова: Воронежская область, *Mentha aquatica* L., элементный профиль.

Введение

Неуклонный рост популярности фитопрепаратов обусловлен их доказанной терапевтической эффективностью в сочетании с высоким профилем безопасности и минимальным риском побочных реакций [14, 16]. При этом значительный объем заготавливаемых лекарственных растений приходится на Центральную Россию – регион с высокой плотностью населения, развитой промышленностью, густой транспортной сетью и интенсивным сельским хозяйством [4, 6]. В подобных условиях резко возрастает риск сбора сырья в зонах с неблагоприятной экологической обстановкой, что обуславливает актуальность исследований, направленных на изучение влияния антропогенного загрязнения на химический состав растений. Известно, что помимо эссенциальных (жизненно необходимых) элементов, лекарственные растения способны аккумулировать поллютанты антропогенного происхождения, среди которых наиболее распространены и опасны соли тяжелых металлов [3, 9, 15].

Анализ литературных источников выявил существенный пробел в изученности элементного состава лекарственной флоры Центрального Черноземья. Имеющиеся единичные работы, как правило, ограничиваются анализом лишь нескольких элементов, что не позволяет составить целостную картину химического состава растительного сырья и выявить закономерности биологического накопления элементов в этой специфической биогеохимической системе [7, 8, 18, 19].

Одним из популярных у населения видов лекарственного растительного сырья являются различные виды рода Мята (*Mentha* L.). Наряду с мятой перечной (*Mentha × piperita*) спросом пользуются мята полевая (*Mentha arvensis* L.), мята колосистая (*Mentha spicata* L.), а также мята водная (*Mentha aquatica* L.) [21, 25, 26].

M. aquatica является одним из диких видов-предков *Mentha × piperita* и обладает своим уникальным химическим профилем, который сильно варьируется в зависимости от места произрастания, хемотипа и стадии вегетации [17, 20, 22–24].

M. aquatica можно охарактеризовать как вид-индикатор переувлажненных местообитаний. Ее ареал в природе ограничен линией уреза воды и зоной постоянного подтопления. Типичные места обитания – берега водоемов (литоральная зона), заболоченные территории, трясины и топкие места. Предпочитает открытые, хорошо освещенные солнцем места. Достаточно зимостойка в условиях умеренного климата. Приспособлена к условиям кислородной недостаточности в переувлажненной почве. Широко произрастает в Северной Африке, Северной Америке, Европе, средней полосе России, на Кавказе, где она растет по

берегам рек и озер. В регионах, где *M. aquatica* распространена, местные жители активно собирают ее для личного использования [11, 16, 25].

Популярность *M. aquatica* в сравнении с другими видами рода *Mentha* можно охарактеризовать как локальную и специфическую. *M. aquatica* ценится как декоративное прибрежное растение для оформления прудов и влажных зон в саду. В народной медицине *M. aquatica* занимает более заметное, но также специфическое место. Настой листьев *M. aquatica* используют при спазмах в животе, метеоризме, тошноте, для улучшения аппетита. Этому способствует ее спазмолитическое и ветрогонное действие. Благодаря высокому содержанию ментофурана и линалоола, она считается хорошим успокаивающим средством. Ее применяют при тревоге, бессоннице, нервном перевозбуждении. Используется как легкое отхаркивающее и антисептическое средство при простудах, кашле (за счет цинеола и других компонентов). В последнее время интерес к *M. aquatica* возрастает среди ароматерапевтов. Ее масло используется как источник уникального ментофурана для создания успокаивающих, медитативных композиций [16, 21, 22, 24].

Фитохимический профиль *M. aquatica* характеризуется уникальным составом эфирного масла, богатым полифенольным комплексом, что обеспечивает сильную антиоксидантную активность, а также наличием тритерпеновых кислот, которые вносят вклад в ее фармакологический потенциал [16, 17, 20, 22–24]. Кроме того, листья *M. aquatica* содержат богатый минеральный комплекс, который напрямую зависит от региональных условий места ее произрастания [3, 11, 15, 27]. Исследования элементного состава растений рода *Mentha*, культивируемого в условиях республики Башкортостан, показали высокую аккумуляцию в вегетативных органах растений цинка, молибдена и серебра [27]. В листьях *Mentha* × *piperita* республики Северная Осетия отмечено высокое накопление марганца и железа [11]. Травы *Mentha* × *piperita*, заготовленные в Горисском регионе Армении, сорбируют из почв стронций и молибден [3]. Исследования листьев растений рода *Mentha* × *piperita*, заготовленных в естественных фитоценозах Московской и Саратовской областей, а также ряда российских производителей (ЗАО «АПФ «Фито-Эм», г. Пушкино, Московская область; ООО «Лек-С+», г. Домодедово, Московская область; ООО «Фито-Бот», Республика Карачаево-Черкесия; АО «Красногорсксредства» г. Красногорск, Московская область; ООО «Милфорд», г. Серпухов Московской обл.; ИП «Теплова К. А.», г. Пенза; «WEISERHOUSE», Германия; ООО «Емельяновская Биофабрика», Новгородской области; ИП «Хлобданов А. Р.», г. Симферополь; ООО «Объединенная чайная компания», г. Москва; ООО «Алтайвита», г. Барнаул) показали, что уровень содержания мышьяка в них в ряде случаев превышает норму [5], что предположительно является специфической характеристикой вида [15].

Вследствие достаточно высоких требований к эколого-географическим условиям произрастания важной является региональная оценка качества, в том числе, элементного комплекса листьев *M. aquatica* в Воронежской области, отличающейся сочетанием большого количества водоемов, высоким уровнем инсоляции, а также высокой популярностью заготовки вида среди населения [9].

Цель исследования – проведение полного элементного анализа листьев *M. aquatica* естественного экотопа Воронежской области.

Материал и методы исследования

Заготовку листьев *M. aquatica* проводили в фенофазу цветения на побережье пруда в Новоусманском районе Воронежской области [9]. Выбирали 5 опытных площадок. Листья срывали, после чего сушили в условиях естественной тени [5]. Для исследований использовали объединенные пробы. Каждая объединенная проба состояла из 5 точечных проб (не менее 200 г каждая). Проба растительного сырья для определения элементного состава выделялась методом квартования из объединенной пробы. Для каждого определения использовали 10,0 г измельченного испытуемого сырья [5].

Параллельно с заготовкой растительных проб с места произрастания были отобраны пробы почвы верхнего горизонта (0–20 см) для последующего сравнительного анализа. Отбор почвенных проб регламентировался ГОСТ Р 58595-2019 и производился по методу «конверта». Почвы в месте отбора образцов относятся к гидроморфным аллювиально-луговым почвам, формирующимся в условиях переменного увлажнения и близкого залегания грунтовых вод. Для таких почв характерны специфические геохимические условия: сезонная смена окислительно-восстановительных режимов, накопление органического детрита и, как следствие, повышенная подвижность ряда тяжелых металлов (в частности, кадмия и свинца) в восстановительной среде [12]. Водородный показатель водной вытяжки составил 6,8, содержание органического вещества (потери при прокаливании) – 6,2 %, что обусловлено постоянным поступлением растительного опада. Данные условия способствуют высокой буферности почвы и активизации восстановительных процессов, при которых подвижность кадмия и свинца возрастает [12].

Отобранные образцы растительного сырья и почв подвергали кислотному разложению для перевода элементов в растворенную форму. Навеску образца помещали во фторопластовый реактор, куда добавляли 5 мл смеси концентрированных азотной (HNO₃) и плавиковой (HF) кислот. Пробоподготовку выполняли с использованием системы микроволнового разложения, по программе, рекомендованной производителем оборудования. Полученный после разложения раствор количественно переносили в мерную пробирку на 15 мл, выполняя трехкратное смывание реактора деионизованной водой (порциями по 1 мл). Объем полученного раствора доводили до 10 мл той же водой. Для проведения анализа методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой аликвотную часть раствора (1 мл) разбавляли в 10 раз 0,5 % раствором азотной кислоты [18, 19]. Определение микроэлементного состава выполняли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИПС-МС) на спектрометре «ELAN-DRC» в соответствии с методическими указаниями МУК 4.1.1483-03. Контроль правильности получаемых результатов осуществляли с помощью метода добавок [8]. Все анализы выполняли в трехкратной повторности, после чего данные подвергали статистической обработке при доверительной вероятности $p \leq 0,05$.

Для анализа способности *M. aquatica* накапливать химические элементы из почвы был рассчитан коэффициент биологического поглощения (КБП).

Результаты и обсуждение

Масс-спектроскопически в образцах почв и листьях *M. aquatica* определено 65 элементов (табл. 1).

Таблица 1

Результаты элементного анализа листьев *Mentha aquatica* L. и почв

№ п/п	Элемент	Содержание, мкг/г		КБП
		<i>M. aquatica</i>	Почва	
1	2	3	4	5
1	Ag (Серебро)	0,0049 ± 0,0004	0,27 ± 0,02	0,02
2	Al (Алюминий)	26 ± 1,2	13500 ± 674	< 0,01
3	As (Мышьяк)	0,13 ± 0,01	0,088 ± 0,007	1,48
4	Au (Золото)	0,01 ± 0,001	0,05 ± 0,004	0,20
5	B (Бор)	20,6 ± 1,6	–	< 0,01
6	Ba (Барий)	18,2 ± 1,3	140 ± 7,4	0,13
7	Be (Бериллий)	0,03 ± 0,001	0,56 ± 0,04	0,05
8	Bi (Висмут)	0,003 ± 0,0002	0,081 ± 0,006	0,04
9	Br (Бром)	39,8 ± 1,9	–	< 0,01
10	Ca (Кальций)	22485 ± 788	5100 ± 132	4,41

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5
11	Cd (Кадмий)	$0,017 \pm 0,001$	$0,0013 \pm 0,0001$	9,44
12	Ce (Церий)	$0,05 \pm 0,003$	$14 \pm 0,7$	< 0,01
13	Co (Кобальт)	$0,33 \pm 0,02$	$5,7 \pm 0,3$	0,06
14	Cr (Хром)	$2,45 \pm 0,16$	$130 \pm 9,2$	0,02
15	Cs (Цезий)	$0,0043 \pm 0,0003$	$0,95 \pm 0,07$	< 0,01
16	Cu (Медь)	$3,2 \pm 0,21$	$32 \pm 2,3$	0,10
17	Dy (Диспрозий)	$0,0023 \pm 0,0002$	$1,0 \pm 0,02$	< 0,01
18	Er (Эрбий)	$0,0013 \pm 0,0001$	$0,61 \pm 0,05$	< 0,01
19	Eu (Европий)	$0,0011 \pm 0,0001$	$0,29 \pm 0,02$	< 0,01
20	Fe (Железо)	$245 \pm 10,4$	26300 ± 861	0,01
21	Ga (Галлий)	$0,068 \pm 0,004$	$4,3 \pm 0,53$	0,02
22	Gd (Гадолиний)	$0,0039 \pm 0,00048$	$1,4 \pm 0,11$	< 0,01
23	Ge (Германий)	$0,0015 \pm 0,0001$	$1,3 \pm 0,1$	< 0,01
24	Hf (Гафний)	$0,0014 \pm 0,0001$	$0,89 \pm 0,07$	< 0,01
25	Hg (Ртуть)	$0,003 \pm 0,0003$	$0,003 \pm 0,0003$	1,00
26	Ho (Гольмий)	$0,00057 \pm 0,00001$	$0,16 \pm 0,01$	< 0,01
27	I (Йод)	$2,84 \pm 0,15$	–	< 0,01
28	In (Индий)	$0,0003 \pm 0,00001$	$0,050 \pm 0,002$	0,01
29	K (Калий)	21921 ± 718	3000 ± 172	7,31
30	La (Лантан)	$0,024 \pm 0,002$	$6,6 \pm 0,12$	< 0,01
31	Li (Литий)	$0,83 \pm 0,06$	$7,5 \pm 0,33$	0,11
32	Lu (Лютеций)	$0,00034 \pm 0,00002$	$0,11 \pm 0,003$	< 0,01
33	Mg (Магний)	4101 ± 109	1600 ± 98	2,56
34	Mn (Марганец)	225 ± 21	270 ± 23	0,83
35	Mo (Молибден)	$1,78 \pm 0,11$	$2,30 \pm 0,12$	0,77
36	Na (Натрий)	5415 ± 271	880 ± 59	6,15
37	Nb (Ниобий)	$0,0063 \pm 0,0004$	$3,8 \pm 0,27$	< 0,01
38	Nd (Неодим)	$0,017 \pm 0,001$	$6,4 \pm 0,29$	< 0,01
39	Ni (Никель)	$1,47 \pm 0,08$	$8,00 \pm 0,31$	0,18
40	P (Фосфор)	4732 ± 287	360 ± 24	13,14
41	Pb (Свинец)	$0,15 \pm 0,01$	$0,068 \pm 0,004$	2,21
42	Pr (Празеодим)	$0,0058 \pm 0,0004$	$1,6 \pm 0,03$	< 0,01
43	Pt (Платина)	$0,01 \pm 0,001$	$0,1 \pm 0,01$	0,10
44	Rb (Рубидий)	$5,31 \pm 0,41$	$17 \pm 1,1$	0,31
45	Re (Рений)	$0,00072 \pm 0,00004$	$0,01 \pm 0,001$	0,07
46	Sb (Сурьма)	$0,021 \pm 0,002$	$0,48 \pm 0,03$	0,04
47	Sc (Скандий)	$0,05 \pm 0,004$	$50 \pm 4,2$	< 0,01
48	Se (Селен)	$0,3 \pm 0,02$	$5,0 \pm 0,24$	0,06
49	Sm (Самарий)	$0,0042 \pm 0,0003$	$1,1 \pm 0,1$	< 0,01
50	Sn (Олово)	$0,01 \pm 0,001$	$2,3 \pm 0,2$	< 0,01
51	Sr (Стронций)	126 ± 11	$38 \pm 2,7$	3,32
52	Ta (Тантал)	$0,00064 \pm 0,00005$	$0,28 \pm 0,03$	< 0,01
53	Tb (Тербий)	$0,00054 \pm 0,00002$	$0,2 \pm 0,02$	< 0,01
54	Te (Теллур)	$0,0079 \pm 0,0005$	$0,5 \pm 0,04$	0,02
55	Th (Торий)	$0,0049 \pm 0,0004$	$1,9 \pm 0,14$	< 0,01
56	Ti (Титан)	$2,46 \pm 0,11$	1400 ± 74	< 0,01
57	Tl (Таллий)	$0,0007 \pm 0,00004$	$0,1 \pm 0,01$	0,01
58	Tm (Тулий)	$0,00029 \pm 0,00002$	$0,077 \pm 0,005$	< 0,01

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5
59	U (Уран)	$0,003 \pm 0,0002$	$1,2 \pm 0,1$	$< 0,01$
60	V (Ванадий)	$0,1 \pm 0,01$	–	$< 0,01$
61	W (Вольфрам)	$0,073 \pm 0,005$	$0,64 \pm 0,05$	0,11
62	Y (Иттрий)	$0,015 \pm 0,001$	$5,1 \pm 0,43$	$< 0,01$
63	Yb (Иттербий)	$0,0014 \pm 0,0001$	$0,61 \pm 0,05$	$< 0,01$
64	Zn (Цинк)	$16,9 \pm 1,5$	$24 \pm 1,1$	0,70
65	Zr (Цирконий)	$0,046 \pm 0,003$	$47 \pm 3,8$	$< 0,01$

Почва в месте отбора образцов достаточно богата макроэлементами (калий, кальций, магний). При этом содержание большинства тяжелых металлов (свинец, никель, ртуть, кадмий, мышьяк) в почве находится на уровне регионального геохимического фона или ниже, что указывает на отсутствие сильного техногенного загрязнения [12].

M. aquatica проявляет высокую избирательность в поглощении химических элементов из почвы, что отражается в широком диапазоне КБП – от $< 0,01$ до 13,14. Эта избирательность определяется как физиологическими потребностями растения, так и наличием барьерных механизмов, ограничивающих поступление потенциально токсичных элементов.

Анализ полученных данных позволил разделить определяемые элементы на несколько условных групп по характеру поглощения *M. aquatica*. К элементам энергичного накопления (КБП $> 10,0$) относятся фосфор (КБП 13,14). Это характерно для большинства растений и объясняется ключевой ролью фосфора в энергетическом обмене (АТФ, АДФ), построении нуклеиновых кислот и фосфолипидов мембран [1, 2].

К элементам сильного накопления отнесены как ряд жизненно необходимых элементов (калий (КБП 7,31), натрий (КБП 6,15), кальций (КБП 4,41), магний (КБП 2,56)), так и ряд токсичных (кадмий (КБП 9,44), стронций (КБП 3,32), свинец (КБП 2,21), мышьяк (КБП 1,48), ртуть (КБП 1,00)). Высокая аккумуляция калия листьями *M. aquatica* обусловлена ролью его как основного осмотически активного иона, регулятора тургора, активатора ферментов, критической важностью для функционирования устьиц и проведения сигналов [10, 13]. Отмечено необычно высокое поглощение натрия для растения, не являющегося галофитом, что может быть связано с адаптацией к условиям повышенной влажности и спецификой ионного баланса водных растений, а также выполнением осмотических функций, частично замещая калий. Активное поглощение кальция объясняется его ролью как структурного компонента клеточных стенок (пектаты кальция), вторичного мессенджера, участием в поддержании мембранной стабильности и передаче сигналов [1, 2, 10]. Магний входит в состав хлорофилла, активатор многих ферментов, особенно участвующих в переносе фосфатных групп, поэтому отмечено активное его поглощение листьями *M. aquatica* при умеренном содержании в почве (1 600 мкг/г) [10].

Критически опасный показатель биологического поглощения листьями *M. aquatica* кадмия связан прежде всего с чрезвычайно эффективным поглощением его из почв даже при ничтожном содержании в грунте (0,0013 мкг/г). Это указывает на отсутствие эффективных барьерных механизмов против этого элемента, который является токсичным даже в следовых количествах и обладает кумулятивным действием [2, 9, 10]. Активное накопление высокотоксичного свинца, который, как и стронций, может поглощаться через кальциевые каналы вследствие схожести ионных радиусов, представляет серьезный риск при использовании сырья [5, 9, 10]. Кроме того, значения КБП кадмия и свинца (2,21) в условиях прибрежного биотопа, вероятно, дополнительно усиливаются за счет восстановительной обстановки в переувлажненной почве, способствующей переходу этих металлов в более подвижные формы [12]. Мышьяк может конкурировать с фосфатами за транспортные системы [2, 10]. Для ртути выявлено нейтральное поглощение, содержание в листьях

M. aquatica соответствует почвенному. Стронций, проявляющий химическое сходство с кальцием, абсорбируется посредством тех же транспортных систем, а его кумуляция не обладает избирательностью [2, 10].

К элементам среднего захвата (КБП от 0,1 до 1,0) отнесены ряд эссенциальных элементов – марганец (КБП 0,83), цинк (КБП 0,70), молибден (КБП 0,77). Достаточно активное поглощение марганца объясняется его ролью в фотосистеме II и как активатора ферментов. Активное накопление цинка связано с его вхождением в состав более 300 ферментов. Поглощение молибдена, играющего важнейшую роль для азотного метаболизма (элемент активного центра ферментов нитратредуктазы, нитрогеназы), близко к пропорциональному содержанию в почве [1, 2, 10].

К элементам слабого (КБП < 0,1) и очень слабого захвата (КБП < 0,01) отнесены алюминий, железо, титан, цирконий, гафний, ниобий, тантал, торий, уран и ряд редкоземельных элементов. Для данных элементов ярко выражен барьерный эффект при значительно более высоком содержании в почве. Биохимические механизмы подавления их аккумуляции включают хелатирование в ризосфере, осаждение в апопласте корней, селективность мембранных каналов и переносчиков. Кроме того, большинство данных элементов сильно гидролизуются в почвенном растворе, переходя в малорастворимые и труднодоступные для растений формы [2, 9, 10].

Выводы

В листьях *M. aquatica*, заготовленных в прибрежном экотопе (Новоусманский район Воронежской области), методом ИСП-МС идентифицировано 65 элементов. Для исследованного биотопа значения КБП варьируют от < 0,01 до 13,14, что отражает высокую избирательность поглощения в условиях переувлажненных почв.

К элементам с наибольшей аккумулятивной способностью (КБП > 2,0) относятся: фосфор (13,14), кадмий (9,44), калий (7,31), натрий (6,15), кальций (4,41), стронций (3,32), магний (2,56) и свинец (2,21). Концентрация кадмия в листьях (0,017 мкг/г) в 9,4 раза превышает его содержание в почве, что свидетельствует об отсутствии физиологического барьера для данного токсиканта. Мышьяк (КБП 1,48) и ртуть (КБП 1,00) накапливаются в листьях на уровне, сопоставимом с почвенным или слегка превышающем его, что также требует обязательного токсикологического контроля сырья.

Для алюминия (КБП < 0,01), железа (0,01), титана, циркония, гафния, ниобия, тантала, тория, урана и всех редкоземельных элементов зафиксирован устойчивый барьерный механизм: их содержание в листьях на 2–3 порядка ниже почвенного, что указывает на крайне низкую биодоступность этих элементов для *M. aquatica* даже в условиях гидроморфных почв.

Выявленная способность *M. aquatica* к сверхнакоплению кадмия и высокому накоплению свинца, мышьяка и ртути позволяет рекомендовать данный вид в качестве биоиндикатора загрязнения прибрежных экосистем. Вместе с тем, использование *M. aquatica* в качестве лекарственного, пищевого или косметического сырья, заготовленного вблизи водоемов, недопустимо без предварительного лабораторного контроля на соответствие требованиям ГФ РФ и СанПиН по содержанию тяжелых металлов и мышьяка.

Список литературы

1. Авцын А. П., Жаворонков А. А., Риш М. А., Строчкова Л. С. Микроэлементозы человека. М.: Медицина, 1991. 496 с.
2. Афиногенов Ю. П., Бусыгина И. А., Гончаров Е. Г. Биогенные элементы и их физиологическая роль. Воронеж: Издательский Дом ВГУ, 2008. 143 с.
3. Варданян Л. Р., Айрапетян С. А. Экспериментальные исследования по изучению макро- и микроэлементного состава мяты перечной (*Mentha piperita*), произрастающей в Горисском регионе Армении // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. 2024. Т. 21, № 2. С. 7–13. DOI: 10.25587/2222-5404-2024-21-2-7-13.

4. Галенко М. С., Гравель И. В. Оценка рисков воздействия тяжелых металлов и мышьяка, поступающих в организм человека с лекарственными растительными препаратами // Разработка и регистрация лекарственных средств. 2024. Т. 13, № 4. С. 180–189. DOI: 10.33380/2305-2066-2024-13-4-1934.
5. Государственная фармакопея Российской Федерации. Издание XIV. Т. 4. М.: ФЭМБ, 2018. 1834 с.
6. Гравель И. В., Лёвушкин Д. В. Грудной сбор № 4: содержание молибдена, вольфрама, лития, ванадия, титана и циркония // Фармация. 2025. Т. 74, № 4. С. 23–30. DOI: 10.29296/25419218-2025-04-03.
7. Дунилин А. Д., Тринеева О. В., Чистякова А. С., Гудкова А. А. Элементный состав каштана конского (*Aesculus hippocastanum* L.) цветков, произрастающего в Воронежской области // Микроэлементы в медицине. 2023. Т. 24, № 3. С. 46–56. DOI: 10.19112/2413-6174-2023-24-3-46-56.
8. Дьякова Н. А. Анализ особенностей накопления макро- и микроэлементов в траве пустырника пятилопастного флоры Воронежской области // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2022. № 4. С. 24–32. DOI: 10.36906/2311-4444/22-4/03.
9. Дьякова Н. А., Сливкин А. И., Гравель И. В. Эколого-фармакогностическая оценка качества лекарственного растительного сырья Центрального Черноземья: монография. М.: РУСАЙНС, 2023. 238 с.
10. Ильин В. Б. Элементарный химический состав растений. Новосибирск: Наука, 1985. 129 с.
11. Караева Л. В., Гагиева Л. Ч., Цагараева Э. А., Цугкиева В. Б. Оценка содержания некоторых эссенциальных элементов в почве и образцах мяты (*Mentha*) // Известия Горского государственного аграрного университета. 2023. Т. 60, № 1. С. 138–142. DOI: 10.54258/20701047_2023_60_1_138.
12. Перельман А. И., Касимов Н. С. Геохимия ландшафта. М.: МГУ, 1999. 610 с.
13. Скальный А. В., Скальная М. Г., Киричук А. А., Тиньков А. А. Медицинская элементология. 2-е изд. переработ. и доп. М.: Наука, 2021. 199 с.
14. Чевидаев В. В., Боков Д. О., Гравель И. В., Самылина И. А. Исследование элементного состава грудного сбора № 2 и его компонентов // Ведомости Научного центра экспертизы средств медицинского применения. Регуляторные исследования и экспертиза лекарственных средств. 2024. Т. 14, № 2. С. 171–180. DOI: 10.30895/1991-2919-2023-566.
15. Щукин В. М., Блинкова Е. А., Кузьмина Н. Е., Лутцева А. И. Содержание тяжелых металлов, мышьяка и алюминия в листьях мяты и продуктах на их основе // Ведомости Научного центра экспертизы средств медицинского применения. Регуляторные исследования и экспертиза лекарственных средств. 2022. Т. 12, № 2. С. 193–204. DOI: 10.30895/1991-2919-2022-12-2-408.
16. Barnes J., Anderson L. A., Phillipson J. D. Herbal Medicines. 4th ed. London: Pharmaceutical Press, 2012. 510 p.
17. Dhifi W., Litaïem M., Jelali N., Hamdi N., Mnif W. Identification of a new chemotype of the plant *Mentha aquatica* grown in Tunisia: chemical composition, antioxidant and biological activities of its essential oil // Journal of Essential Oil Bearing Plants. 2011. Vol. 14. P. 320–328. DOI: 10.1080/0972060X.2011.10643941.
18. Dyakova N. A. Features of accumulation of macro- and trace elements by medicinal plant raw materials of Voronezh region // Pharmaceutical Chemistry Journal. 2023. Vol. 56, No 11. P. 1471–1476. DOI: 10.1007/s11094-023-02816-1.
19. Dyakova N. A. Features of extraction of rare-earth elements from medicinal plant raw materials into infusions and decoctions // Pharmaceutical Chemistry Journal. 2023. Vol. 57, No 5. P. 688–693. DOI: 10.1007/s11094-023-02939-5.
20. Esmaili A., Rustaiyan A., Masoudi S., Nadjji K. Composition of the essential oils of *Mentha aquatica* L. and *Nepeta meyeri* Benth. from Iran // Journal of Essential Oil Research. 2006. Vol. 18. P. 263–265. DOI: 10.1080/10412905.2006.9699082.

21. European Directorate for the Quality of Medicines & HealthCare. European Pharmacopoeia. 10th ed. Strasbourg: EDQM, 2019. 4120 p.
22. Ferhat M., Erol E., Beladjila K. A., Çetintaş Y., Duru M. E., Öztürk M., Kabouche A., Kabouche Z. Antioxidant, anticholinesterase and antibacterial activities of *Stachys guyoniana* and *Mentha aquatica* // *Pharmaceutical Biology*. 2017. Vol. 55. P. 324–329. DOI: 10.1080/13880209.2016.1238488
23. Ferrati M., Spinozzi E., Baldassarri C., Maggi F., Pavela R., Canale A., Petrelli R., Cappellacci L. Efficacy of *Mentha aquatica* L. essential oil (linalool/linalool acetate chemotype) against insect vectors and agricultural pests // *Pharmaceuticals (Basel)*. 2023. Vol. 16, No 4. P. 633. DOI: 10.3390/ph16040633.
24. Gethaun Z., Asres K., Mazumder A., Bucar F. Essential oil composition, antibacterial and antioxidant activities of *Mentha aquatica* growing in Ethiopia // *Ethiopian Pharmaceutical Journal*. 2008. Vol. 26. P. 9–16.
25. Lawrence B. M. *Mint: The Genus Mentha*. Boca Raton: CRC Press, 2007. 584 p.
26. Mimica-Dukić N., Božin B., Soković M., Mihajlović B., Matavulj M. Antimicrobial and antioxidant activities of three *Mentha* species essential oils // *Planta Medica*. 2003. Vol. 69, No. 5. P. 413–419. DOI: 10.1055/s-2003-39704.
27. Minina N. N., Chernyh I. V. The elemental composition of *Mentha piperita* L. (Lamiaceae Lindl.), grown in the forest-steppe zone of Southern Urals // *Journal of Agriculture and Environment*. 2020. Vol. 3, No. 15. P. 19–23. DOI: 10.23649/jae.2020.3.15.4.

References

1. Avtsyn, A. P., Zhavoronkov, A. A., Rish, M. A., & Strochkova, L. S. (1991). *Mikroelementozy cheloveka* [Human microelementoses]. *Medsina*. 496 p. (In Russian).
2. Afinogenov, Yu. P., Busygina, I. A., & Goncharov, E. G. (2008). *Biogennyye elementy i ikh fiziologicheskaya rol* [Biogenic elements and their physiological role]. Voronezh State University Publishing House. 143 p. (In Russian).
3. Vardanyan, L. R., & Airapetyan, S. A. (2024). Eksperimentalnye issledovaniya po izucheniyu makro- i mikroelementnogo sostava myaty perechnoy (*Mentha piperita*), proizrastayushchey v Gorisskom regione Armenii [Experimental studies on the macro- and microelement composition of peppermint (*Mentha piperita*) growing in the Goris region of Armenia]. *Vestnik Severo-Vostochnogo federalnogo universiteta im. M. K. Ammosova*, 21(2), 7–13. <https://doi.org/10.25587/2222-5404-2024-21-2-7-13>. (In Russian).
4. Galenko, M. S., & Gravel, I. V. (2024). Otsenka riskov vozdeystviya tyazhelykh metallov i myshyaka, postupayushchikh v organizm cheloveka s lekarstvennymi rastitelnymi preparatami [Risk assessment of exposure to heavy metals and arsenic from herbal medicinal products]. *Razrabotka i registratsiya lekarstvennykh sredstv*, 13(4), 180–189. <https://doi.org/10.33380/2305-2066-2024-13-4-1934>. (In Russian).
5. Gosudarstvennaya farmakopeya Rossiyskoy Federatsii [State Pharmacopoeia of the Russian Federation]. (2018). (14th ed., Vol. 4). Moscow: FEMB, 1834 p. (In Russian).
6. Gravel, I. V., & Lyovushkin, D. V. (2025). Grudnoy sbor № 4: sodержание molibdena, volframa, litiya, vanadiya, titana i tsirkoniya [Chest collection No. 4: Content of molybdenum, tungsten, lithium, vanadium, titanium and zirconium]. *Farmatsiya*, 74(4), 23–30. <https://doi.org/10.29296/25419218-2025-04-03>. (In Russian).
7. Dunilin, A. D., Trineeva, O. V., Chistyakova, A. S., & Gudkova, A. A. (2023). Elementnyy sostav kashtana konskogo (*Aesculus hippocastanum* L.) tsvetkov, proizrastayushchego v Voronezhskoy oblasti [Elemental composition of horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.) flowers growing in the Voronezh region]. *Mikroelementy v meditsine*, 24(3), 46–56. <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2023-24-3-46-56>. (In Russian).
8. Dyakova, N. A. (2022). Analiz osobennostey nakopleniya makro- i mikroelementov v trave pustyrnika pyatilopastnogo flory Voronezhskoy oblasti [Analysis of the accumulation features of macro- and microelements in the herb of motherwort five-lobed flora of the Voronezh region].

Vestnik Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta, (4), 24–32. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/22-4/03>. (In Russian).

9. Dyakova, N. A., Slivkin, A. I., & Gravel, I. V. (2023). *Ekologo-farmakognosticheskaya otsenka kachestva lekarstvennogo rastitelnogo syrya Tsentralnogo Chernozemya* [Ecological and pharmacognostic assessment of the quality of medicinal plant raw materials of the Central Black Earth Region]. Moscow: RUSAINS, 238 p. (In Russian).

10. Ilyin, V. B. (1985). *Elementarnyy khimicheskiy sostav rasteniy* [Elementary chemical composition of plants]. Novosibirsk: Nauka, 185 p. (In Russian).

11. Karaeva, L. V., Gagieva, L. Ch., Tsagaraeva, E. A., & Tsugkueva, V. B. (2023). Otsenka soderzhaniya nekotorykh essentsialnykh elementov v pochve i obraztsakh myaty (*Mentha*) [Assessment of the content of some essential elements in soil and mint (*Mentha*) samples]. *Izvestiya Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 60(1), 138–142. https://doi.org/10.54258/20701047_2023_60_1_138. (In Russian).

12. Perelman, A. I., & Kasimov, N. S. (1999). *Geokhimiya landshafta* [Landscape geochemistry]. Moscow: Moscow State University, 610 p. (In Russian).

13. Skalny, A. V., Skalnaya, M. G., Kirichuk, A. A., & Tinkov, A. A. (2021). *Meditinskaya elementologiya* [Medical elementology] (2nd ed.). Moscow: Nauka, 199 p. (In Russian).

14. Chevadaev, V. V., Bokov, D. O., Gravel, I. V., & Samylina, I. A. (2024). Issledovanie elementnogo sostava grudnogo sbora № 2 i ego komponentov [Study of the elemental composition of chest collection No. 2 and its components]. *Vedomosti Nauchnogo tsentra ekspertizy sredstv meditsinskogo primeneniya. Regulyatornye issledovaniya i ekspertiza lekarstvennykh sredstv*, 14(2), 171–180. <https://doi.org/10.30895/1991-2919-2023-566>. (In Russian).

15. Shchukin, V. M., Blinkova, E. A., Kuzmina, N. E., & Lutseva, A. I. (2022). Soderzhanie tyazhelykh metallov, myshyaka i alyuminiya v listyakh myaty i produktakh na ikh osnove [Content of heavy metals, arsenic and aluminum in mint leaves and products based on them]. *Vedomosti Nauchnogo tsentra ekspertizy sredstv meditsinskogo primeneniya. Regulyatornye issledovaniya i ekspertiza lekarstvennykh sredstv*, 12(2), 193–204. <https://doi.org/10.30895/1991-2919-2022-12-2-408>. (In Russian).

16. Barnes, J., Anderson, L. A., & Phillipson, J. D. (2012). *Herbal medicines* (4th ed.). Pharmaceutical Press, 510 p. (In English).

17. Dhifi, W., Litaïem, M., Jelali, N., Hamdi, N., & Mnif, W. (2011). Identification of a new chemotype of the plant *Mentha aquatica* grown in Tunisia: Chemical composition, antioxidant and biological activities of its essential oil. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 14, 320–328. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2011.10643941>. (In English).

18. Dyakova, N. A. (2023a). Features of accumulation of macro- and trace elements by medicinal plant raw materials of Voronezh region. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 56(11), 1471–1476. <https://doi.org/10.1007/s11094-023-02816-1>. (In English).

19. Dyakova, N. A. (2023b). Features of extraction of rare-earth elements from medicinal plant raw materials into infusions and decoctions. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 57(5), 688–693. <https://doi.org/10.1007/s11094-023-02939-5>. (In English).

20. Esmaeili, A., Rustaiyan, A., Masoudi, S., & Nadji, K. (2006). Composition of the essential oils of *Mentha aquatica* L. and *Nepeta meyeri* Benth. from Iran. *Journal of Essential Oil Research*, 18, 263–265. <https://doi.org/10.1080/10412905.2006.9699082>. (In English).

21. European Directorate for the Quality of Medicines & HealthCare. (2019). *European pharmacopoeia* (10th ed.). Strasbourg: EDQM? 4120 p. (In English).

22. Ferhat, M., Erol, E., Beladjila, K. A., Çetintaş, Y., Duru, M. E., Öztürk, M., Kabouche, A., & Kabouche, Z. (2017). Antioxidant, anticholinesterase and antibacterial activities of *Stachys guyoniana* and *Mentha aquatica*. *Pharmaceutical Biology*, 55, 324–329. <https://doi.org/10.1080/13880209.2016.1238488>. (In English).

23. Ferrati, M., Spinozzi, E., Baldassarri, C., Maggi, F., Pavela, R., Canale, A., Petrelli, R., & Cappellacci, L. (2023). Efficacy of *Mentha aquatica* L. essential oil (linalool/linalool acetate

chemotype) against insect vectors and agricultural pests. *Pharmaceuticals (Basel)*, 16(4), 633. <https://doi.org/10.3390/ph16040633>. (In English).

24. Gethaun, Z., Asres, K., Mazumder, A., & Bucar, F. (2008). Essential oil composition, antibacterial and antioxidant activities of *Mentha aquatica* growing in Ethiopia. *Ethiopian Pharmaceutical Journal*, 26, 9–16. (In English).

25. Lawrence, B. M. (2007). *Mint: The genus Mentha*. Boca Raton: CRC Press, 584 p. (In English).

26. Mimica-Dukić, N., Božin, B., Soković, M., Mihajlović, B., & Matavulj, M. (2003). Antimicrobial and antioxidant activities of three *Mentha* species essential oils. *Planta Medica*, 69(5), 413–419. <https://doi.org/10.1055/s-2003-39704>. (In English)

27. Minina, N. N., & Chernyh, I. V. (2020). The elemental composition of *Mentha piperita* L. (Lamiaceae Lindl.), grown in the forest-steppe zone of Southern Urals. *Journal of Agriculture and Environment*, 3(15), 19–23. <https://doi.org/10.23649/jae.2020.3.15.4>. (In English).

Поступила в редакцию 29.05.2026 г.

Korenskaya I. M., Dyakova N. A. Element profile *Mentha aquatica* L. Voronezh region. – The article presents the results of mass spectrometric determination of the element profile of *Mentha aquatica* L. of the Voronezh region. *M. aquatica* actively absorbs vital macronutrients (phosphorus, magnesium, calcium, potassium, sodium) from the soil, as well as a number of highly toxic elements (cadmium, lead, arsenic). *M. aquatica* has a barrier suction mechanism for aluminum, iron, and rare earth metals. It is possible to use *M. aquatica* as a bioindicator of soil pollution with heavy metals.

Keywords: Voronezh region, *Mentha aquatica* L., element profile.

Коренская Ирина Михайловна

кандидат фармацевтических наук, доцент,
доцент кафедры фармацевтической химии и
фармакогнозии фармацевтического факультета
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
университет», г. Воронеж, РФ.
E-mail: irmich65@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-5444-8108
SPIN-код: 1706-6248
AuthorID: 717552

Korenskaya Irina Mikhailovna

Candidate of Pharmaceutical Sciences, Docent,
Associate Professor of Department of Pharmaceutical
Chemistry and Pharmacognosy, Faculty of Pharmacy,
Voronezh State University,
Voronezh, Russian Federation.

Дьякова Нина Алексеевна

доктор фармацевтических наук, доцент,
доцент кафедры фармацевтической технологии
фармацевтического факультета
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
университет», г. Воронеж, РФ.
E-mail: ninotchka_v89@mail.ru
ORCID: 0000-0002-0766-3881
SPIN-код: 3477-0510
AuthorID: 684554

Dyakova Nina Alekseevna

Doctor of Pharmaceutical Sciences, Docent, Associate
Professor of Department of Pharmaceutical Technology,
Faculty of Pharmacy,
Voronezh State University,
Voronezh, Russian Federation.

© М. В. Носова¹, В. П. Середина², С. А. Стовбунник³**ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКОЙ ДЕГИДРАТАЦИИ ПОЧВ
В СРЕДНЕТАЕЖНОЙ ПОДЗОНЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**¹ООО «Сахалинская Энергия»,

Россия, 693020, г. Южно-Сахалинск, ул. Дзержинского, д. 35,

²Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36,

³ООО «РН-Проектирование Добыча»,

Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, д. 72

Носова М. В., Середина В. П., Стовбунник С. А. Полевые исследования гидрофизической дегидратации почв в среднетаежной подзоне Западной Сибири. – В статье представлены результаты комплексного исследования трансформации водно-физических свойств и почвенно-гидрологических констант аллювиальных почв среднетаежной подзоны Западной Сибири в условиях локального нефтяного загрязнения. На основе анализа почвенных горизонтов в эпицентре и периферийных зонах нефтеразлива установлено значительное ухудшение таких показателей, как полная и наименьшая влагоемкость, диапазон активной влаги и влажность завядания. Выявлены четкие корреляционные связи между уровнем загрязнения и деградацией водоудерживающих свойств почвы. Особое внимание уделено пространственной стратификации нефтепродуктов и их влиянию на физиологическую доступность влаги. Предложен комплекс мер по рекультивации, включающий биологические, агротехнические и сорбционные подходы. Результаты могут быть использованы для экологического мониторинга, планирования устойчивого землепользования и разработки региональных программ восстановления почв, нарушенных нефтяной нагрузкой.

Ключевые слова: нефтяное загрязнение почв, аллювиальные почвы, гидрофобизация, почвенно-гидрологические константы, полная влагоемкость, диапазон активной влаги, Западная Сибирь, деградация почв.

Введение

Проблема деградации почв под воздействием нефтяных загрязнений остается одним из ключевых вызовов в области почвоведения и охраны окружающей среды, особенно для регионов с развитой нефтедобычей, таких как Западная Сибирь. В условиях умеренно-влажного климата среднетаежной подзоны любое техногенное вмешательство, связанное с разливами углеводородов, провоцирует быстрое и глубинное изменение почвенных свойств, отражаясь как на структурно-функциональной организации почвы, так и на функционировании экосистем в целом. При этом наиболее уязвимыми компонентами почвенной системы являются гидрофизические параметры, определяющие режим влагообеспечения, газообмена и доступность воды для биоты [8, 10].

Современные исследования подтверждают, что нефтяные компоненты способны нарушать водный режим почв как на уровне макроструктуры – через образование гидрофобных пленок, препятствующих водопроницаемости, – так и на уровне микроструктуры, где происходит нарушение коллоидной системы и агрегации. На этом фоне особенно актуальными становятся количественные оценки изменений почвенно-гидрологических констант, таких как полная влагоемкость (ПВ), гигроскопическая влажность (ГВ), влажность завядания (ВЗ), максимальная гигроскопичность (МГ), наименьшая влагоемкость (НВ) и диапазон активной влаги (ДАВ). Эти параметры играют роль индикаторов функционального состояния почв и являются основой для мониторинга и управления последствиями техногенного воздействия.

Многочисленные публикации [4, 8–11] подчеркивают, что нефтяное загрязнение нарушает баланс капиллярной и гравитационной влаги, снижает водоудерживающую способность и увеличивает долю недоступной влаги в профиле. Поскольку органические

компоненты нефти формируют устойчивые соединения с минералами почвы, они резко снижают сорбционную способность агрегатов и приводят к структурной деградации. В частности, отмечается, что в горизонтах с высоким содержанием углеводов падает наименьшая влагоемкость и обнуляется ДАВ, делая влагу физиологически недоступной даже в условиях обильного увлажнения.

Для таежных почв аллювиального генезиса, часто встречающихся в поймах крупных сибирских рек, характерна высокая пористость и сезонная переувлажненность, что делает их особенно чувствительными к нефтеуглеводородному загрязнению. В этих условиях даже локальный нефтеразлив способен вызвать долговременные сдвиги в гидрологическом режиме, нарушив водный баланс не только в точке инцидента, но и в прилегающих участках благодаря миграции загрязнителей по профилю и ландшафту. Более того, трансформация гидрофизических свойств почв оказывает кумулятивное воздействие на фитоценозы, микробиоту и процессы самоочищения, обуславливая снижение биоразнообразия и продуктивности экосистем.

Несмотря на возрастающее количество работ по вопросам диагностики нефтезагрязнения, в большинстве случаев они ограничиваются оценкой концентрации нефтепродуктов и токсикологическим тестированием [8, 9, 11]. Однако данные о трансформации гидрологических констант и их взаимосвязи с содержанием нефти в почвах представлены фрагментарно. Это затрудняет разработку интегральных моделей прогноза последствий загрязнения, а также адаптацию технологий рекультивации к конкретным типам почв и условиям увлажнения. Таким образом, существует необходимость в исследованиях, которые объединяют как морфологический анализ загрязненных горизонтов, так и детальную оценку водно-физических параметров.

Кроме того, актуальность данного направления обусловлена и практической необходимостью дифференцированного подхода к рекультивации нарушенных земель. Результаты многочисленных полевых экспериментов и лабораторных наблюдений указывают на то, что эффективность восстановительных мероприятий зависит не только от степени загрязнения, но и от исходных водно-физических свойств почв [8, 9]. В связи с этим особенно важным становится определение критических уровней трансформации гидрологических параметров, при которых естественное восстановление невозможно без внешнего вмешательства. Это позволяет обоснованно выбирать стратегии – от пассивного мониторинга до активной ремедиации с применением био-, агро- и физико-химических методов.

Целью настоящего исследования является всесторонняя оценка изменений почвенно-гидрологических констант аллювиальных почв среднетаежной подзоны Западной Сибири в условиях локального нефтяного загрязнения. В фокусе анализа находятся как пространственные закономерности распределения нефтепродуктов по профилю, так и их влияние на ключевые водно-физические параметры. Отдельное внимание уделяется установлению корреляционных связей между концентрацией углеводов и гидрологическими показателями, что позволяет выделить индикаторные параметры деградации почв.

Новизна исследования заключается в комплексной интерпретации почвенных изменений с учетом морфологических, гидрофизических свойств. Практическая значимость результатов связана с возможностью использования данных для оптимизации мероприятий по рекультивации, мониторингу и планированию устойчивого землепользования на территориях, подверженных нефтяному загрязнению. Ожидается, что полученные выводы смогут служить основой для разработки региональных рекомендаций по восстановлению нарушенных почв в условиях таежного климата и высокой увлажненности.

Материал и методы исследования

Для оценки последствий нефтяного загрязнения на водно-физические свойства аллювиальных почв была организована комплексная экспедиционная работа в пределах

среднетаежной подзоны Западной Сибири, в районе активной нефтедобычи на территории Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО). Исследуемая территория охватывала пойменные ландшафты среднего течения реки Обь, характеризующиеся сочетанием глееватых и серогумусовых аллювиальных почв, формирующихся в условиях периодического переувлажнения.

Зонирование участка. Место исследования было стратифицировано на пять функциональных зон в зависимости от степени воздействия нефтяного загрязнения. В каждой зоне было отобрано определенное количество проб (n):

- эпицентр загрязнения (n = 25) – зона непосредственного контакта почвенного покрова с пролившейся нефтью, расположенная вблизи разгерметизированного участка трубопровода;

- импактная (периферийная) зона (n = 25) – участок на расстоянии 3 метра от эпицентра, подвергшийся вторичному загрязнению через миграцию нефтепродуктов;

- граница загрязнения (n = 25) – зона с минимальной визуальной экспозицией, удаленная от эпицентра на 5 метров;

- условный фон (n = 2), объединенная проба из полнопрофильного почвенного разреза) – участок в 500 метрах от пятна загрязнения, подверженный возможному косвенному воздействию;

- фоновый участок (n = 2), объединенная проба из полнопрофильного почвенного разреза) – контрольная зона в 10 км к северу от месторождения, не подвергавшаяся воздействию нефти, но имеющая сходные почвенно-климатические условия.

Такое зонирование позволило провести детальный сравнительный анализ и выявить пространственные градиенты изменения почвенных свойств.

Почвенная диагностика и морфологическое описание. Полевое обследование включало заложение почвенных разрезов в каждой зоне. При описании горизонтов применялась цветовая шкала Манселла (*Munsell Soil Color Charts*, 2009), позволяющая детализировать цветовые изменения почв как индикаторы степени органического загрязнения и переувлажнения. Фиксировались следующие параметры: цвет (по тону, яркости, цветности); структура (зернистая, комковатая, глыбистая); консистенция (влажная, сырой, уплотненная); степень развития корневой системы; наличие битумных корок или нефтяных включений.

Почвы классифицировались в соответствии с российской классификацией (2004) и международной системой WRB 2022 (*World Reference Base for Soil Resources*) [7, 12].

Лабораторная обработка. Для каждого разреза были отобраны почвенные образцы из горизонтов 0–10 см и 10–20 см – наиболее подверженных влиянию нефтяного загрязнения слоев. Образцы хранились в герметичных контейнерах и доставлялись в лабораторию в условиях, предотвращающих испарение или разрушение органических веществ.

Подготовка проб к анализу осуществлялась по ГОСТ 17.4.4.02–84 [1], включавшему просушку, просеивание и определение гигроскопической влажности до состояния воздушно-сухой массы.

Определение содержания нефтепродуктов. Ключевым индикатором степени загрязнения служило содержание нефтепродуктов, определенное методом флуориметрии по ПНД Ф 16.1:2.21–98 [5]. Метод базируется на измерении флуоресценции органических соединений нефти при воздействии УФ-излучения. Для повышения точности анализа проводились трехкратные измерения, с последующим усреднением значений.

Оценка гидрологических констант. Изучение почвенно-гидрологических параметров проводилось в строгом соответствии с государственными стандартами:

Полная влагоемкость (ПВ) – метод насыщения образцов водой с последующим удалением избыточной влаги и вычислением относительной массы удерживаемой воды (РД 52.33.219–2022) [6].

Наименьшая влагоемкость (НВ) – определялась с использованием мембранных установок, имитирующих фильтрацию через корневой профиль (ГОСТ Р ИСО 18763–2019) [3].

Влажность завядания (ВЗ) – лабораторный фитотест с выращиванием подсолнечника в условиях контролируемого снижения влажности (ГОСТ 28268–89) [2].

Гигроскопическая влага (ГВ) и максимальная гигроскопичность (МГ) – рассчитывались после выдержки образцов в эксикаторах с насыщенными солями (KCl и H₂O соответственно), с фиксированием массы до и после гигроскопической сорбции.

Диапазон активной влаги (ДАВ) – определялся как разность между НВ и ВЗ, отражая потенциально доступную растительности влагу.

Биометрия и растительное покрытие. Для оценки экологического отклика были проведены визуальные описания растительного покрова на каждой из зон. Учитывалась степень проективного покрытия, состав доминантных и индикаторных видов, а также морфологические признаки угнетения фитоценозов (хлороз, редукция побегов, стерильность).

Особое внимание уделялось видам, указывающим на степень антропогенной трансформации среды, включая: осоки (*Carex rostrata* Stokes, 1787; *Carex flava* L., 1753), вейники (*Calamagrostis langsdorffii* (Link) Trin., 1824), мхи (*Sphagnum squarrosum* Crome 1803; *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., 1851), кустарники (*Spiraea salicifolia* L., 1753; *Rosa acicularis* Lindl., 1820), сорно-рудеральные виды (*Vicia cracca* L., 1753; *Equisetum palustre* L., 1753).

Статистический анализ. Полученные количественные данные были обработаны методами описательной статистики. Вычислялись: среднее арифметическое (μ), стандартное отклонение (SD).

Для выявления взаимосвязей между содержанием нефтепродуктов и гидрологическими параметрами использовался коэффициент линейной корреляции Пирсона (R). Значимость корреляций оценивалась на уровне $p < 0,05$. Сравнительный анализ между зонами проводился с использованием критерия Стьюдента для независимых выборок. Также применялись ранговые шкалы для оценки степени трансформации почв по каждому параметру.

Результаты и обсуждение

Изучение трансформации почвенно-гидрологических параметров на территориях, подвергшихся нефтяному загрязнению, выявило целый комплекс пространственно выраженных закономерностей, отражающих деградационные процессы в водно-физических свойствах аллювиальных почв. Анализ данных по пяти функционально выделенным зонам (эпицентр, импактная зона, граница загрязнения, условный фон и фоновые почвы) позволил установить как количественные изменения ключевых параметров, так и характер их взаимосвязи с уровнем загрязнения.

Морфологическая трансформация почв под влиянием нефтяного загрязнения. Помимо изменений в гидрофизических характеристиках, нефтяное загрязнение существенно трансформирует морфологические свойства аллювиальных почв, особенно в поверхностных горизонтах. Одним из наиболее наглядных индикаторов трансформации служит изменение цветовых характеристик почв по шкале *Munsell*, а также деградация структуры и консистенции.

Цвет почвы – важный диагностический признак, связанный с состоянием органического вещества, степенью оглеения и степенью гидроморфизма. В загрязненных почвах были зафиксированы следующие закономерности:

Эпицентр загрязнения: горизонты 0–10 см приобретали насыщенно темный, почти черный цвет с антрацитовым оттенком. Показатели по шкале *Munsell* – Hue: Gley 2, Value: 3, Chroma: 5B, что свидетельствует о доминировании битуминозных включений и избыточной влажности. Такие цвета типичны для почв с высокоорганическим, но анаэробным режимом, что указывает на нарушение аэрации и развитие восстановительных процессов.

Импактная зона: верхние горизонты характеризовались буро-серыми тонами (10YR 3/2 – 4/2), с признаками потемнения, но без антрацитового оттенка. Изменение цвета

связано с неполной деградацией органического вещества и частичной миграцией углеводов. Повышение яркости (Value) в сравнении с эпицентром говорит о лучшей аэрации и меньшей плотности нефтяных пленок.

Граница загрязнения: структура цвета возвращается к более типичной для аллювиальных глееватых почв – 10YR 5/3 (серо-коричневый), однако сохраняются отдельные включения более темного материала, указывающие на остаточное загрязнение. Повышенная цветность (*Chroma*) указывает на более выраженные окислительные условия.

Фоновые почвы: имеют стабильные морфометрические показатели: 5YR 5/3 и 5YR 5/4, соответствующие серо-бурым и светло-сероватым оттенкам, характерным для лугово-болотных ассоциаций.

В эпицентре загрязнения горизонты были бесструктурными, с выраженной глыбистой консистенцией. Агрегаты от 3,5 до 5 см полностью пропитаны нефтью. Поверхностная кора из битумов визуально выделялась как отдельный слой, часто с маслянистым блеском. Влажность – высокая, консистенция – вязкая и липкая, указывающая на коллоидное расслоение и потерю водоотдачи.

В импактной зоне отмечались неустойчивые комковато-глыбистые образования, с нарушением агрегатной устойчивости. Механические повреждения корневой системы указывали на ухудшение условий роста. Консистенция – сыроватая и слабоуплотненная, с пятнистым распределением битумных включений.

На границе пятна загрязнения структура почв восстанавливалась: зернисто-комковатая и ореховатая, влажность – умеренная, консистенция – рыхлая. Корневая система развита равномерно, что подтверждает восстановление условий водно-воздушного режима.

Фоновые почвы характеризовались комковато-волокнистой структурой, с четкими переходами горизонтов. Консистенция – влажная, слабоуплотненная, хорошо выраженная пористость и многочисленные анаэробные признаки (сизые и охристые пятна).

Наиболее надежными морфологическими маркерами нефтяного загрязнения, по результатам полевого обследования, являются: снижение цветовой яркости (Value) и насыщенности (*Chroma*) в органогенных горизонтах; формирование монотонных, темных горизонтов без текстурной дифференциации; наличие поверхностной битумной корки; бесструктурность и вязкость консистенции; деструкция или фрагментация корневой системы; резкое снижение проективного растительного покрова.

Эти признаки, в совокупности с лабораторными параметрами, позволяют использовать морфологическую диагностику как начальный этап оценки нефтяного загрязнения, особенно в условиях невозможности быстрого химического анализа

Результаты настоящего исследования свидетельствуют о глубокой трансформации водно-физических свойств аллювиальных почв среднетаежной подзоны Западной Сибири в условиях локального нефтяного загрязнения. Влияние нефти на гидрофизические параметры оказалось как масштабным, так и устойчивым по характеру. Особенно критичные изменения наблюдаются в пределах эпицентра загрязнения, где формируется зона максимальной аккумуляции углеводов и происходит радикальное смещение почвы в сторону гидрофобного состояния.

Пространственная структура нефтяного загрязнения. Наибольшие концентрации нефтепродуктов (НП) были зафиксированы в поверхностных горизонтах (0–10 см) эпицентра загрязнения – в среднем 66,5 мг/кг, с вариацией от 16,2 до 72,3 мг/кг. Эти значения превышают допустимые уровни в 5–6 раз и указывают на формирование устойчивого битумного слоя, способного длительное время препятствовать водному проникновению. В нижнем горизонте (10–20 см) уровень загрязнения снижался, но оставался значимым – до 50,7 мг/кг. В импактной зоне концентрации нефтепродуктов сохраняли сопоставимые значения (52–43 мг/кг), что указывает на активную миграцию углеводов по капиллярным и гравитационным каналам.

На границе загрязнения происходил резкий спад содержания нефти – до 13,3 мг/кг (верхний горизонт), что коррелировало с восстановлением проективного растительного

покрова. В условно-фоновых и фоновых почвах нефтепродукты либо не фиксировались вовсе, либо присутствовали на уровне следов, что подтверждает адекватность выбора контрольных участков (табл. 1).

Таблица 1

Содержание нефтепродуктов в нефтезагрязненных почвах

Зона отбора проб	Глубина, см	Среднее содержание НП, мг/кг	Минимум, мг/кг	Максимум, мг/кг	Стандартное отклонение
Эпицентр	0–10	66,5	16,2	72,3	13,2
	10–20	50,7	11,8	65,6	12,8
Импактная зона	0–10	52,0	11,5	68,1	9,0
	10–20	43,5	10,0	50,2	9,1
Граница загрязнения	0–10	13,3	4,4	13,	2,2
	10–20	5,7	4,0	7,1	1,1
Условный фон	0–10	Ниже предела обнаружения	–	–	–
	10–20		–	–	–
Фоновый участок	0–10		–	–	–
	10–20		–	–	–

Таким образом, установлена четкая радиальная градиция нефтяного загрязнения: от высокой концентрации в центре пятна – к периферийным зонам с постепенным восстановлением природного состояния почв.

Изменение гидрофизических параметров. Почвенно-гидрологические константы отреагировали на загрязнение нефтью неравномерно. В целом, прослеживается тенденция к ухудшению водоудерживающей способности и доступности влаги. Описание значений будет проведено по среднему.

Значения максимальной гигроскопичности (МГ) увеличивались по мере увеличения концентрации нефтепродуктов. В эпицентре значения достигали 15,6 %, в то время как на фоне фиксировались на уровне 7,7 %. В импактной зоне средние показатели составляли 13,2–12,8 %. Причиной роста МГ, по-видимому, является образование нефтяных микропленок на поверхности почвенных агрегатов, что увеличивает сорбционную активность, но одновременно снижает капиллярную водопроницаемость.

Влажность завядания (ВЗ) возросла в загрязненных почвах в 2,3 раза по сравнению с фоном – до 23,4 % против 10,3 %. В импактной зоне значения превышали 20 %, что указывает на присутствие влаги, физиологически недоступной для растений. Этот эффект представляет особую опасность для растительности, особенно в период вегетации, поскольку даже при наличии влаги в почве корни не могут ее усваивать.

Наименьшая влагоемкость (НВ), напротив, резко снижалась в зависимости от уровня загрязнения. В эпицентре она составила лишь 18,1 % по сравнению с фоновыми 46,6 %. Это связано с нарушением агрегатной структуры, сокращением капиллярных пор и деградацией макроструктуры.

Показатель полной влагоемкости (ПВ) почв резко снижался – с 75,5 % на фоне до 24,4 % в эпицентре. Причиной служит не только физическая деградация структуры, но и частичное вытеснение воды нефтяными фракциями из порового пространства.

Диапазон активной влаги (ДАВ) в центре загрязнения полностью обнулится (0 %), что означает невозможность существования устойчивой растительности без вмешательства. В импактной зоне ДАВ достигал лишь 3,56 % против 36,3 % на фоне, что также свидетельствует о критической утрате экосистемной функции почв.

Гигроскопическая влага (ГВ) в загрязненных горизонтах снижалась, хотя не столь резко: с 10,9 % на фоне до 6,3 % в эпицентре. Частичное восстановление показателей ГВ отмечалось уже на границе загрязнения, что подтверждает обратимый характер этого параметра при умеренной экспозиции.

Информация по значениям полученных по результатам обработки материалов подставлена в таблице (табл. 2)

Таблица 2

Значения почвенно-гидрологических констант

Зона отбора проб	Глубина, см	ПВ		НВ		ВЗ		ГВ		МГ		ДАВ (НВ-ВЗ)	
		lim=min-max / μ ± STD											
		%	R	%	R	%	R	%	R	%	R	%	R
Эпицентр	0–10	22,48–28,50 24,42±2,41	–0,60	16,44–21,20 18,12±1,84	–0,47	19,89–26,46 23,37±2,41	0,48	5,41–7,31 6,31±0,69	–0,59	13,26–17,64 15,58±1,61	0,5	0	–
	10–20	19,02–24,23 21,06±1,96		15,57–18,95 16,78±1,37		21,48–25,41 23,04±1,47		3,38–5,28 4,28±0,68		14,32–16,94 15,36±0,98		0	
Импактная зона	0–10	25,17–26,93 25,66±0,75	–0,698	19,91–21,30 20,71±0,6	–0,37	16,35–21,42 19,88±2,08	0,4	4,23–5,63 4,96±0,51	–0,60	10,9–14,28 13,25±1,38	0,47	3,56±0,00 0,00±0,00	–0,60
	10–20	24,67–27,85 26,10±1,20		18,15–20,53 19,45±0,85		17,94–20 19,23±0,87		5,92–7,32 6,65±0,50		11,96–13,33 12,82±0,58		0,21–0,53 0,22±0,60	
Граница загрязнения	0–10	23,45–38,82 32,47±0,22	–0,64	13,94–29,47 22,93±5,94	–0,46	13,04–27,53 20,43±6,69	0,41	9,35–9,8 9,54±0,16	–0,57	8,69–18,35 13,62±4,46	0,54	0,9±1,94 2,50±0,00	–0,58
	10–20	20,7–38,27 28,91±5,95		12,47–30,19 20,64±7,10		13,07–21,78 16,41±3,29		8,08–8,53 8,27±0,15		8,71–10,77 10,94±2,19		0,0–8,41 4,23±1,15	
Условный фон	0–10	68,5	–	48,8	–	12	–	11,02	–	8,9	–	36,8	–
	10–20	52,9		34,5		11,6		9,25		8,6		22,9	
Фоновый участок	0–10	75,5	–	46,6	–	10,3	–	10,94	–	7,7	–	36,3	–
	10–20	59,5		39,1		7,3		9,65		5,4		31,8	

Корреляционные связи. Анализ коэффициентов корреляции между содержанием нефтепродуктов и гидрологическими константами выявил два доминирующих типа связей: Прямая зависимость: между концентрацией НП и показателями МГ ($R = 0,50$), ВЗ ($R = 0,48$), подтверждающая рост гидрофобных характеристик почвы с увеличением загрязнения.

Обратная зависимость: между содержанием НП и НВ ($R = -0,47$), ПВ ($R = -0,60$), ДАВ ($R = -0,59$), что указывает на потерю способности почвы удерживать и предоставлять влагу растительному покрову.

Такая корреляционная структура подчеркивает, что нефтяное загрязнение оказывает не столько количественное, сколько качественное влияние на режим влагообеспечения – изменяя не общую влажность, а ее доступность и поведение в почвенном профиле.

Экологические последствия и растительность. Изменения водно-физических свойств сопровождались резкой трансформацией фитоценозов. В эпицентре плотность растительного покрова снижалась на 80–90 %, наблюдались единичные угнетенные особи влаголюбивых видов (*Carex flava*, *Eriophorum vaginatum*), появлялись маслянистые отложения на поверхности. В импактной зоне сохранялись устойчивые куртины осоки и вейника, но с укороченными побегами и хлорозом листьев.

На границе загрязнения происходило частичное восстановление покрова, появлялись молодые побеги древесных пород (*Pinus sylvestris* Linnaeus, 1753, *Populus tremula* Linnaeus, 1753) и мхи, указывающие на стабилизацию условий. Это подтверждает, что при умеренном уровне загрязнения почвенные экосистемы способны к самовосстановлению, тогда как в зонах с высокими концентрациями нефти необходимы мелиоративные меры.

Эволюция экологических свойств почв под влиянием нефтяного загрязнения. Наряду с морфологическими и гидрофизическими изменениями, нефтяное загрязнение оказывает комплексное воздействие на экологические свойства почв, в первую очередь – на их способность обеспечивать жизнедеятельность почвенной биоты, поддерживать продуктивность растительного покрова и участвовать в круговороте веществ. Эти свойства напрямую зависят от водного режима и структуры порового пространства, которые подвергаются наиболее сильным трансформациям при попадании нефтепродуктов.

Нарушение экологических функций почв. Почва как живая система выполняет ряд важнейших экологических функций:

- аккумулирует влагу и питательные элементы,
- обеспечивает среду обитания для микроорганизмов и корневых систем,
- регулирует газообмен и аэрацию,
- фильтрует и обезвреживает поступающие загрязняющие вещества.

Изменение таких параметров, как полная влагоемкость, влажность завядания и диапазон активной влаги, приводит к следующему:

Гибель и угнетение почвенной микробиоты. Снижение ПВ и НВ более чем на 50 % в эпицентре загрязнения приводит к иссушению микроагрегатов и потере микрониз для аэробной микрофлоры. Одновременно наблюдается локальная анаэробизация, создающая условия для развития патогенных или неактивных микробных сообществ. Исследования показывают, что биомасса микроорганизмов в таких условиях снижается в 4–6 раз [11].

Рост недоступной влаги (при повышении ВЗ до 23–24 %) нарушает снабжение растений водой даже при ее физическом наличии в почве. Это проявляется в массовом увядании, стерильности побегов, неспособности сформировать устойчивую биомассу. Таким образом, происходит разрыв связи между почвой и растительным покровом.

Потеря буферной и фильтрационной способности. Деструкция структуры почв, наблюдаемая в зонах сильного загрязнения, ведет к утрате способности задерживать и трансформировать загрязнители. Вместо фильтра – почва становится проводником для вертикальной миграции токсикантов, что чревато загрязнением подземных и поверхностных вод.

Снижение продуктивности и биоразнообразия. При ДАВ, приближающемся к нулю, происходит выпадение большинства мезофильных видов растений. Выживают лишь гидрофобные или эфемерные формы. Сокращение проективного покрытия до 5–10 % в эпицентре является ярким проявлением утраты экологической функции почвы как продуктивной среды.

Нарушение круговорота веществ. Почвы, утратившие водоудерживающую способность, перестают быть активным участником биогеохимических циклов – влагообеспечение, азотфиксация, гумусообразование и минерализация замедляются или останавливаются. Это приводит к кумуляции токсичных продуктов распада углеводородов, вторичному загрязнению и хронизации деградации.

Фитоиндикация подтверждает критическое ухудшение условий. В эпицентре наблюдается исчезновение типичных лугово-болотных ассоциаций (*Poa*, *Carex*, *Equisetum*), появление единичных стресс-индикаторов и сдвиг в сторону монодоминантных угнетенных сообществ. В импактной зоне, несмотря на частичное сохранение видового состава, снижается плотность побегов, укорочены междоузлия, наблюдаются признаки хлороза и некроза. Это указывает на функциональную деградацию почвы, несмотря на внешний «переходный» характер. На границе загрязнения и в условно-фоновых зонах происходит спонтанное восстановление биоценозов, что может служить ориентиром для оценки эффективности биологической рекультивации.

С точки зрения экологической оценки состояния почв, наибольшую информативность показали следующие параметры (табл. 3).

Таблица 3

**Диагностические и индикаторные показатели изменения
экологического состояния почв**

Показатель	Экологическая интерпретация
Диапазон активной влаги	Потенциал устойчивой вегетации
Влажность завядания	Уровень физиологического стресса растений
Полная влагоемкость	Функциональность поровой системы
Максимальная гигроскопичность	Степень гидрофобизации и доступность микронизаций для микробиоты
Цвет по шкале <i>Munsell</i>	Интегральный индикатор редокс-потенциала и органических накоплений

Таким образом, трансформация водно-физических свойств нефтезагрязненных почв имеет ярко выраженные экологические последствия, отражающиеся как на биотических компонентах (растения, микрофлора), так и на абиотических функциях почвенной системы. Это требует включения экологических показателей в состав мониторинга и разработки многоуровневых программ восстановления нарушенных ландшафтов.

Выводы

По результатам полевых исследований аллювиальных почв среднетаежной подзоны Западной Сибири установлено, что локальное нефтяное загрязнение приводит к резкому снижению ключевых почвенно-гидрологических констант. В эпицентре разлива полная влагоемкость уменьшилась с 75,5 % (фон) до 24,4 %, а наименьшая влагоемкость – с 46,6 % до 18,1 %, что отражает существенную деградацию агрегатной структуры и сокращение капиллярного порового пространства. Диапазон активной влаги в центре загрязнения обнулился (0 % против 36,3 % на фоне), что свидетельствует о полной утрате физиологически доступной влаги для растительности и невозможности устойчивого функционирования фитоценозов без рекультивационных мероприятий.

Показано, что нефтяное загрязнение сопровождается ростом гидрофобных свойств почвы: увеличиваются значения максимальной гигроскопичности и влажности завядания, при этом гигроскопическая влажность в эпицентре снижается с 10,9 % до 6,3 %, демонстрируя изменение соотношения связанной и доступной влаги. Корреляционный анализ выявил прямую зависимость содержания нефтепродуктов от МГ ($R = 0,50$) и ВЗ ($R = 0,48$) и обратную зависимость от НВ ($R = -0,47$), ПВ ($R = -0,60$) и ДАВ ($R = -0,59$), что позволяет использовать эти показатели в качестве индикаторов степени деградации водоудерживающих свойств почвы.

Выявленная пространственная стратификация нефтепродуктов по профилю и зонам воздействия (эпицентр, импактная, буферная и фоновая зоны) показала постепенное восстановление части гидрологических параметров по мере удаления от очага загрязнения, однако даже в импактной зоне ДАВ остается критически низким (3,56 % при фоновых 36,3 %). Это подтверждает длительный характер нарушений гидрофизического режима аллювиальных почв и необходимость применения активных рекультивационных технологий (биологических, агротехнических и сорбционных) для восстановления водного режима и повышения экологических функций почв. С учетом высокой чувствительности аллювиальных почв к нефтеуглеводородам и выявленной сложности трансформаций, дальнейшие исследования должны быть направлены на: анализ временной динамики восстановительных процессов после проведения мелиораций; разработку моделей прогноза изменений почвенного состояния при повторных загрязнениях; включение биологических индикаторов (микробиоты, фаунистических комплексов) для оценки глубины деградации.

Кроме того, перспективным направлением представляется интеграция данных дистанционного зондирования и геоинформационных систем для картографирования

уровней гидрофобности почв и зонирования по степени риска потери экосистемных функций.

Нефтяное загрязнение аллювиальных почв в условиях среднетаежной подзоны вызывает комплексное и, в ряде случаев, необратимое изменение водно-физических параметров, что требует применения адаптивных, научно обоснованных стратегий восстановления. Только междисциплинарный подход, сочетающий биологические, агрохимические и физико-механические методы, способен обеспечить восстановление экологических функций почв и возвращение их в устойчивое продуктивное состояние.

Список литературы

1. ГОСТ 17.4.4.02–84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического и гельминтологического анализа. Введ. 1985-07-01. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1984. 15 с.
2. ГОСТ 28268–89. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений. Введ. 1990-01-01. М.: Госстандарт, 1989. 12 с.
3. ГОСТ Р ИСО 18763-2019. Качество почвы. Определение токсического воздействия загрязняющих веществ на всхожесть и рост на ранних стадиях высших растений. Введ. 2021-01-01. М.: Стандартинформ, 2019. 27 с.
4. Носова М. В. Влияние нефтесолевого загрязнения на экологическое состояние почв поймы реки Оби в условиях среднетаежной подзоны Западной Сибири: дис. ... канд. биол. наук: спец. 1.5.15. Томск, 2024. 213 с.
5. ПНД Ф 16.1:2.21–98. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в почвах и донных отложениях методом ИК-спектроскопии. М.: Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия, 1998. 24 с.
6. РД 52.33.219–2022. Руководство по определению агрогидрологических свойств почв. – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2023. 126 с.
7. Шишов Л. Л., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И., Герасимова М. И. Классификации и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
8. Hussain I., Puschenreiter M., Gerhard S., Schöftner P., Yousaf S., Wang A., Reichenauer T. G. Rhizoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils: Improvement opportunities and field applications // *Environmental and Experimental Botany*. 2018. Vol. 147. P. 202–219. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2017.12.016.
9. Ossai I. C., Ahmed A., Hassan A., Hamid F. S. Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review // *(Environmental) Technology & Innovation*. 2020. Vol. 17. P. 100526. DOI: 10.1016/j.eti.2019.100526.
10. Tang, J., Lu X., Sun Q. & Zhu W. Aging effect of petroleum hydrocarbons in soil under different attenuation conditions // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2012. Vol. 149. P. 109–117.
11. Varjani S. J., Gnansounou E., Pandey A. Comprehensive review on toxicity of persistent organic pollutants from petroleum refinery waste and their degradation by microorganisms // *Chemosphere*. 2017. Vol. 188. P. 280–291. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.09.005.
12. *World Reference Base for Soil Resources*. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps // *World Soil Resources Reports*. Rome: FAO, 2022. No 106. P. 181.

References

1. GOST – State Standard 17.4.4.02–84 (1984). *Okhrana prirody. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya khimicheskogo, bakteriologicheskogo i gel'mintologicheskogo analiza* [Nature protection. Soils. Methods for sampling and preparing samples for chemical, bacteriological, and helminthological analysis]. (In Russian).

2. GOST – State Standard 28268–89 (1989). *Pochvy. Metody opredeleniya vlazhnosti, maksimal'noi gigroskopicheskoi vlazhnosti i vlazhnosti ustoichivogo zavyadaniya rastenii* [Soils. Methods for determining moisture, maximum hygroscopic moisture, and moisture of permanent wilting]. (In Russian).
3. GOST – State Standard R ISO 18763-2019 (2019). *Kachestvo pochvy. Opredelenie toksicheskogo vozdeistviya zagryaznyayushchikh veshchestv na vskhozhest' i rost na rannikh stadiyakh vysshikh rastenii* [Soil quality. Determination of the toxic effects of pollutants on germination and early growth of higher plants]. (In Russian).
4. Nosova, M. V. (2024). *Vliyanie neftesolevogo zagryazneniya na ekologicheskoe sostoyanie pochv poimy reki Obi v usloviyakh srednetazhnoi podzony Zapadnoi Sibiri* [The influence of oil-salt pollution on the ecological condition of soils in the Ob River floodplain in the middle taiga subzone of Western Siberia] [Candidate dissertation, Tomsk]. (In Russian).
5. PND F 16.1:2.21–98 (1998). *Metodika vypolneniya izmerenii massovoi doli nefteproduktov v pochvakh i donnykh otlozheniyakh metodom IK-spektrometrii* [Method for measuring the mass fraction of petroleum products in soils and bottom sediments by IR spectrometry]. Moscow: Federal'nyi tsentr analiza i otsenki tekhnogennogo vozdeistviya, 24 p. (In Russian).
6. RD 52.33.219–2022 (2023). *Rukovodstvo po opredeleniyu agrogidrologicheskikh svoystv pochv* [Guideline for determining agrihydrological properties of soils]. Obninsk: FGBU "VNIIGMI-MTsD", 126 p. (In Russian).
7. Shishov, L. L., Tonkonogov, V. D., Lebedeva, I. I., & Gerasimova, M. I. (2004). *Klassifikatsii i diagnostika pochv Rossii* [Classification and diagnosis of soils in Russia]. Oikumena, 342 p. (In Russian)
8. Hussain, I., Puschenreiter, M., Gerhard, S., Schöftner, P., Yousaf, S., Wang, A., Syed, J. H., & Reichenauer, T. G. (2018). Rhizoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils: Improvement opportunities and field applications. *Environmental and Experimental Botany*, 147, 202–219, doi: 10.1016/j.envexpbot.2017.12.016. (In English).
9. Ossai, I. C., Ahmed, A., Hassan, A., & Hamid, F. S. (2020). Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 17, 100526, doi: 10.1016/j.eti.2019.100526. (In English).
10. Tang, J., Lu, X., Sun, Q., & Zhu, W. (2012). Aging effect of petroleum hydrocarbons in soil under different attenuation conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 149, 109–117. (In English).
11. Varjani, S. J., Gnansounou, E., & Pandey, A. (2017). Comprehensive review on toxicity of persistent organic pollutants from petroleum refinery waste and their degradation by microorganisms. *Chemosphere*, 188, 280–291, doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.09.005. (In English).
12. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *World reference base for soil resources: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps* (World Soil Resources Reports No. 106, p. 181). FAO. (In English).

Поступила в редакцию 07.05.2026 г.

Nosova M. V., Seredina V. P., Stovbunik S. A. Field studies of hydrophysical dehydration of soils in the middle taiga subzone of Western Siberia. – The article presents the results of a comprehensive study of the transformation of water-physical properties and soil-hydrological constants of alluvial soils of the middle taiga subzone of Western Siberia under conditions of local oil pollution. Based on the analysis of soil horizons in the epicenter and peripheral zones of the oil spill, a significant deterioration in such indicators as total and least moisture capacity, active moisture range and wilting point moisture was established. Clear correlations between the level of pollution and the degradation of water-retaining properties of the soil were revealed. Particular attention is paid to the spatial stratification of oil products and their impact on the physiological availability of moisture. A set of reclamation measures is proposed, including biological, agrotechnical and sorption approaches. The results can be used for environmental monitoring, sustainable land use planning and development of regional programs for restoration of soils damaged by oil load.

Keywords: oil pollution of soils, alluvial soils, hydrophobization, soil-hydrological constants, total moisture capacity, active moisture range, Western Siberia, soil degradation.

Носова Мария Владимировна

кандидат биологических наук,
специалист по экологической безопасности
ООО «Сахалинская Энергия»,
г. Южно-Сахалинск, РФ.
E-mail: nsmvsh@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7985-6474
AuthorID: 1043987

Nosova Maria Vladimirovna

Candidate of Biological Sciences;
environmental protection specialist,
Sakhalin Energy LLC,
Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation.

Середина Валентина Петровна

доктор биологических наук,
профессор кафедры почвоведения и экологии почв
Национального исследовательского Томского
государственного университета, г. Томск, РФ.
E-mail: seredina_v@mail.ru
ORCID: 0000-0002-7432-1726
SPIN-код: 3383-2731
AuthorID: 434107

Seredina Valentina Petrovna

Doctor of Biological Sciences;
Professor of the Department of Soil Science and Soil
Ecology of the National Research Tomsk State University,
Tomsk, Russian Federation.

Стовбунник Сергей Анатольевич

главный специалист Управления экологии
ООО «РН-Проектирование Добыча»,
г. Томск, РФ.
E-mail: StovbunikSA@rn-pd.rosneft.ru

Stovbunik Sergey Anatolievich

Chief Specialist of the Ecology Department of RN-Design
Extraction LLC,
Tomsk, Russian Federation.

© А. А. Тищенко

СТРУКТУРА ГНЕЗДОВОЙ ОРНИТОФАУНЫ ГОРОДА РЫБНИЦА
В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА (ПРИДНЕСТРОВЬЕ)

ГОУ «Приднестровский государственный университет им. Т. Г. Шевченко»,
Приднестровская Молдавская Республика, 3300, г. Тирасполь, ул. Покровская, д. 128

Тищенко А. А. Структура гнездовой орнитофауны города Рыбница в начале XXI века (Приднестровье). – В городе Рыбница в начале XXI-го века гнездились 52 вида птиц. В селитебной зоне города гнездились 34 вида, в промышленной зоне – 27 видов, на кладбищах – 23 вида, в городском парке – 8 видов. Суммарная плотность птиц составляла от 320,1 до 2 201,5 пар/км². Экосистема реки Сухая Рыбница обеспечивала гнездование 10 видов лимнофильных птиц. Доминантами в гнездовом населении птиц являлись: *Passer domesticus* и *Delichon urbica* (в селитебной и промышленной зонах), *Lanius collurio*, *Acanthis cannabina* и *Passer montanus* (на кладбищах), *Chloris chloris*, *Passer montanus* и *Fringilla coelebs* (в парке). Среди водно-болотных угодий преобладали: *Acrocephalus arundinaceus*, *Gallinula chloropus*, *Cuculus canorus* и *Acrocephalus scirpaceus*.

Ключевые слова: птицы, распространение, гнездование, видовой состав, численность.

Введение

Современный город – сложная система, включающая в себя комплекс антропогенных и некоторых природных биотопов: ассоциаций, фаций [19]. Основной ассоциацией города является селитебная зона, изучение орнитофауны которой имеет наибольшее значение. Наряду с селитебной зоной, ряд городов включает в себя обширную промышленную зону, представляющую собой наиболее измененную и относительно молодую ассоциацию урбанизированного ландшафта. Ботанические сады, парки, старые кладбища любого города являются промежуточными элементами между природными биотопами и типично городской средой. Они сохраняют и привлекают представителей региональной фауны, способствуют процессу адаптации и расселению животных в городе. Кладбища являются наиболее распространенными озелененными территориями, и присущи большинству населенных пунктов. Интересно, что степень беспокойства птиц на кладбищах, принадлежащих к различным религиозным конфессиям, отличается. Наименьшее влияние человека испытывают мусульманские кладбища, на которых наблюдается очень высокое разнообразие птиц [12]. В Приднестровье большинство кладбищ являются христианскими, иудейскими и смешенными, испытывающими существенную нагрузку со стороны человека. Парки имеются не во всех приднестровских городах, и не все они имеют существенное значение для птиц. Так, типично городские, небольшие парки (например, в Рыбнице) вряд ли могут влиять на формирование авифауны города. В то время как старые крупные парки, например, парк П. Х. Витгенштейна в г. Каменке [18], представляют собой своеобразные «оазисы» – рефугиумы, привлекающие разнообразных птиц, подчас редких для региона или нехарактерных для урбанизированного ландшафта данной местности.

Гнездящиеся птицы являются ядром фауны, имеют наибольшее значение в формировании местных биоценозов, хозяйственной практике и зоогеографическом анализе [4], их гнездование в урбанизированном ландшафте является подтверждением наличия устойчивой экологической связи того или иного вида с этой территорией [11]. По мнению Н. Н. Данилова [6] полный комплекс свойств, характеризующих популяцию и обеспечивающих ее функциональное единство, проявляется только на гнездовой территории.

Поэтому наибольшее внимание нами было уделено изучению репродуктивных сообществ птиц в различных структурных элементах урболандшафта региона.

Рыбница – небольшой промышленный город, расположенный на берегу Днестра на севере Приднестровья (ПМР), с населением около 48 тыс. чел. (2025 г.) и площадью около 25 км². Первое письменное упоминание Рыбницы относится к 1628 г. [13]. Основной ассоциацией города является селитебная зона (фации «индивидуальной застройки», «многоэтажных домов»). Промышленная зона включает металлургический, цементный и прочие заводы и предприятия. Озелененная зона представлена кладбищами (самые старые из сохранившихся были основаны в конце XIX-го века) и небольшим парком, расположенным в центре города.

Помимо биотопов, относящихся непосредственно к урбанизированному ландшафту, в пределах застройки г. Рыбница имеются включения других ландшафтов – рудерального (пустыри) и водно-болотного – малая река Сухая Рыбница (местами ее русло переходит в небольшие озера, максимальный размер одного из них 60×150 м), протекающая через селитебную зону (фация индивидуальной застройки) и впадающая в Днестр, образуя «дельту» заросшую тростником *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. Наиболее крупный «пустырь» (примерно 50 × 200 м) расположен на известняковом склоне южной экспозиции (в районе ул. О. Кошевого). Растительность этого «пустыря» представляла собой сохранившийся фрагмент петрофильного фитоценоза: *Festuca valesiaca* Gaudin, *Botriochloa ischaemum* (L.) Keng, *Salvia nutans* L., *S. nemorosa* L., *Jurinea calcarea* Klok., *Marrubium* sp., *Thymus* sp. и другие с незначительным участием кустарников и деревьев: *Cotinus coggygria* Scop., *Rosa canina* L., *Ligustrum vulgare* L., *Elaeagnus angustifolia* L., *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle, *Pinus pallasiana* D. Don). Без рассмотрения авифауны водно-болотных угодий и пустыря, считаем, что характеристика гнездовой орнитофауны г. Рыбница будет неполной.

Сведения о птицах г. Рыбница в литературе отсутствуют.

Материал и методы исследования

Учеты птиц, гнездящихся в селитебной зоне, на кладбищах и в парке г. Рыбницы проводились в 2003 г., в промышленной зоне – в 2005 г.

В качестве методической основы при проведении маршрутных учетов были взяты работы А. П. Кузякина [9] и В. И. Щеголева [21]. Расчет обилия птиц производился по формуле, предложенной Р. Л. Наумовым (1965, цит. по: [4]). Учеты птиц в пределах кладбищ «Городское» (0,060018 км² в 2003 г.), «Старое христианское» 0,011456 км² (общая площадь – 0,071474 км²) и в парке (0,0375 км²) г. Рыбницы, производились площадочным методом, где в качестве «пробной площадки» принималась вся территория того или иного выдела (т. е. велся сплошной подсчет пар с последующим пересчетом их численности на обследованную площадь). Маршрутный учет лимнофильных птиц, гнездящихся вдоль реки Сухая Рыбница, осуществлялся на расстоянии 3,5 км (плотность птиц не рассчитывалась, указывается количество зарегистрированных пар).

Протяженность учетного маршрута в селитебной зоне составляла 8,3 км. Он проходил через различные районы города, захватывающие фации многоэтажных домов (5–16 этаж.), индивидуальной застройки, скверы: «ул. Севастопольская / ул. Индустриальная → ул. Севастопольская → ул. Гвардейская → ул. Мичурина → ул. Победы → ул. Титова → ул. Садовая → ул. Вальченко → ул. Кирова → ул. Мицкевича → ул. Костюшко → ул. Степная → ул. Кошевого → ул. Бородинская → ул. Комарова / ул. Севастопольская». В промзоне г. Рыбницы маршрутный учет (L – 4,4 км) проводился по периферии «Молдавского металлургического завода», Рыбницкого цементного комбината и др.

Систематика птиц приводится по Л. С. Степаняну [16]. Доминантами по обилию считались виды, доля участия которых в населении по суммарным показателям составляла 10 % и более ($Di > 10$) [9], субдоминантами – виды, индекс доминирования которых находился в пределах от 1 до 9 [14].

Птицы, как и другие организмы, образуют сообщества, которым могут быть присвоены названия по 1–2 (изредка более) доминирующим видам, с перечислением видов (в порядке убывания долевого участия) составляющих в сумме с доминантами более 75 % (доминанты подчеркиваются), а также указании, в скобках, суммарной плотности населения птиц для обследованных местообитаний в особях (парах)/км² [7]. Подобное буквенное выражение орнитоассоциаций производится с целью выявления некоторых особенностей группировок птиц, входящих в те или иные варианты населения. При определении названий орнитоассоциаций и классов населения птиц мы, в отличие от В. Д. Захарова [7], использовали латинские названия видов по аналогии с геоботанической системой Браун-Бланке [3].

Типы фауны птиц приведены по Б. К. Штегману [20]. Расчет индексов разнообразия Шеннона, выравнивания распределения особей Пиелу, концентрации Симпсона производился по формулам, представленным в работе В. Д. Захарова [7]. Распределение видов по экологическим группировкам производилось на основе работы В. П. Белика [4]. Принадлежность к трофическим группам определялась с учетом данных Ю. В. Аверина с соавторами [1, 2], В. П. Белика [4], М. Е. Никифорова с соавторами [10] и личных сведений.

Степени синантропии (S_i) птиц вычислялись по формуле Nuorteva (1963) (цит. по: [15]). Для расчета индекса синантропизации применялась формула Jędrzykowski (1979) (цит. по: [8]). При этом использовались средние значения между показателями обилия птиц, полученных для природных биотопов, расположенных в северном и центральном Приднестровье: лесов и скалистых берегов Днестра «Петрофильного комплекса Рашков»; наземных биотопов заповедника «Ягорлык» [17]. Для измененных (промежуточных) биотопов, при вычислении степеней синантропии использовались показатели обилия птиц, гнездящихся в парке г. Каменка [18]. Гнездование в селитебной и промышленной зонах города хохлатого жаворонка *Galerida cristata* (Linnaeus, 1758) и золотистой шурки *Merops apiaster* Linnaeus, 1758, обусловлено наличием, на данном этапе развития города, некоторых иноландшафтных биотопических включений и элементов (пустыри, отвесные обнажения глинистых пород), в связи с чем степень синантропии этих видов можно считать «неправильной» [15] и не учитывать.

Результаты и обсуждение

В селитебной зоне города было обнаружено 34 вида гнездящихся птиц, в промышленной зоне – 27 видов, наименьшее число видов (n-8), населяло городской парк (табл. 1).

Таблица 1

Структура гнездовой орнитофауны преобразованных биотопов и парка г. Рыбница

Вид	Селитебная зона		Промышленная зона		Парк
	пар/км ²	S_i	пар/км ²	S_i	пар/км ²
1	2	3	4	5	6
<i>Columba livia</i>	176,7	100	26,5	100	–
<i>Streptopelia decaocto</i>	119,5	90	7,6	59	–
<i>Asio otus</i>	1,0	54	–	–	–
<i>Athene noctua</i>	1,0	67	1,9	81	–
<i>Apus apus</i>	22,1	100	–	–	–
<i>Merops apiaster</i> *	4,0	[51]**	–	–	–
<i>Jynx torquilla</i>	1,0	–12	–	–	–
<i>Dendrocopos syriacus</i>	6,0	51	1,9	26	26,7
<i>Hirundo rustica</i>	40,1	100	63,3	100	–
<i>Delichon urbica</i>	259,0	100	90,9	100	–
<i>Galerida cristata</i>	2,0	[74]	3,8	[85]	–
<i>Motacilla alba</i>	10,0	56	19,0	71	–

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6
<i>Lanius collurio</i>	10,0	-46	31,6	-16	-
<i>Oriolus oriolus</i>	5,0	25	1,9	13	26,7
<i>Sturnus vulgaris</i>	34,4	59	18,9	54	26,7
<i>Pica pica</i>	5,0	10	1,9	-37	-
<i>Corvus monedula</i>	-	-	10,8	100	-
<i>Corvus frugilegus</i>	8,8	51	-	-	-
<i>Corvus cornix</i>	2,9	-45	-	-	-
<i>Sylvia atricapilla</i>	6,3	-13	2,4	-25	26,7
<i>Sylvia curruca</i>	10,3	23	3,3	-5	-
<i>Phylloscopus collybita</i>	3,0	-62	3,8	-60	-
<i>Muscicapa striata</i>	10,0	39	-	-	-
<i>Oenanthe oenanthe</i>	-	-	25,3	95	-
<i>Phoenicurus phoenicurus</i>	20,1	-7	7,6	-43	-
<i>Phoenicurus ochruros</i>	28,9	36	11,9	0	-
<i>Luscinia luscinia</i>	2,7	-28	2,5	-29	-
<i>Turdus merula</i>	0,7	-3	-	-	-
<i>Parus major</i>	18,8	-3	4,7	-30	-
<i>Passer domesticus</i>	1 133,8	100	240,5	98	-
<i>Passer montanus</i>	127,1	80	44,3	65	53,3
<i>Fringilla coelebs</i>	15,1	5	4,7	-9	53,3
<i>Chloris chloris</i>	48,2	73	22,7	55	80,0
<i>Carduelis carduelis</i>	35,9	77	27,0	72	-
<i>Acanthis cannabina</i>	30,1	78	11,4	51	26,7
<i>Coccothraustes coccothraustes</i>	2,0	-4	-	-	-
Плотность	2201,5		692,1		320,1
Число видов	34		27		8
Индекс Шеннона (H')	2,26		1,83		0,94
Индекс Пielу (E)	0,64		0,56		0,45
Индекс Симпсона (C)	0,29		0,16		0,15
Индекс синантропизации	58,8		55,6		-

Примечание. * – две пары гнездились в глинистом обрыве возле автовокзала; ** – в квадратных скобках указана «неправильная» [15] степень синантропии.

Доминантами в гнездовом населении птиц селитебной зоны являлись два вида: домовый воробей *Passer domesticus* (Linnaeus, 1758) ($Di = 51,5$) и городская ласточка *Delichon urbica* (Linnaeus, 1758) ($Di = 0,12$). К субдоминантам относились 10 видов: сизый голубь *Columba livia* Gmelin, 1789, полевой воробей *Passer montanus* (Linnaeus, 1758), кольчатая горлица *Streptopelia decaocto* (Frivaldszky, 1838), обыкновенная зеленушка *Chloris chloris* (Linnaeus, 1758), деревенская ласточка *Hirundo rustica* Linnaeus, 1758, черноголовый щегол *Carduelis carduelis* (Linnaeus, 1758), обыкновенный скворец *Sturnus vulgaris* Linnaeus, 1758, коноплянка *Acanthis cannabina* (Linnaeus, 1758), горихвостка-чернушка *Phoenicurus ochruros* (S. G. Gmelin, 1774), черный стриж *Apus apus* (Linnaeus, 1758).

В промзоне также доминировали домовый воробей ($Di = 34,7$) и городская ласточка *Delichon urbica* (Linnaeus, 1758) ($Di = 13,1$). Субдоминантами были 14 видов: деревенская ласточка, полевой воробей, обыкновенный жулан *Lanius collurio* Linnaeus, 1758, черноголовый щегол, сизый голубь, обыкновенная каменка *Oenanthe oenanthe* (Linnaeus, 1758), обыкновенная зеленушка, белая трясогузка *Motacilla alba* Linnaeus, 1758, обыкновенный скворец, горихвостка-чернушка, коноплянка, галка *Corvus monedula*

Linnaeus, 1758, кольчатая горлица и обыкновенная горихвостка *Phoenicurus phoenicurus* (Linnaeus, 1758).

Коэффициент сходства видового состава птиц селитебной и промышленной зон составлял 0,82, индекс сходства населения птиц – 26,1 %.

Явное предпочтение селитебной зоны ($Si > 75$), по отношению к природным и промежуточным биотопам, отдавали 9 видов птиц: сизый голубь, черный стриж, деревенская и городская ласточки, домовый воробей, кольчатая горлица, полевой воробей, коноплянка и щегол. Их обилие составляло около 88,3 % от суммарной плотности птиц в селитебной зоне. Птицы, относящиеся к 13 видам, не избегали этого типа местообитаний (Si 0–75). Иным биотопам ($Si < 0$) отдавали предпочтение 10 видов: вертишейка *Jynx torquilla* Linnaeus, 1758, жулан, обыкновенный соловей *Luscinia luscinia* (Linnaeus, 1758), обыкновенная горихвостка, черный дрозд *Turdus merula* Linnaeus, 1758, славка-черноголовка *Sylvia atricapilla* (Linnaeus, 1758), пеночка-теньковка *Phylloscopus collybita* (Vieillot, 1817), большая синица *Parus major* Linnaeus, 1758, обыкновенный дубонос *Coccothraustes coccothraustes* (Linnaeus, 1758) и серая ворона *Corvus cornix* Linnaeus, 1758. Синантропами ($Si > 20$) по отношению к селитебной зоне г. Рыбницы могут считаться птицы, относящиеся к 20 видам.

Предпочтение промышленной зоны ($Si > 75$), по отношению к природным и промежуточным биотопам, отдавали 7 видов птиц: сизый голубь, домовый сыч *Athene noctua* (Scopoli, 1769), деревенская и городская ласточки, галка, обыкновенная каменка и домовый воробей. Природные и переходные (измененные) биотопы предпочитали 9 видов: жулан, сорока *Pica pica* (Linnaeus, 1758), славка-черноголовка, славка-завирушка *Sylvia curruca* (Linnaeus, 1758), пеночка-теньковка, обыкновенная горихвостка, соловей, большая синица и зяблик *Fringilla coelebs* Linnaeus, 1758. По отношению к промзоне г. Рыбницы в качестве синантропов выступали 15 видов: сизый голубь, кольчатая горлица, домовый сыч, сирийский дятел, деревенская и городская ласточки, белая трясогузка, обыкновенный скворец, галка, обыкновенная каменка, домовый и полевой воробьи, обыкновенная зеленушка, черноголовый щегол и коноплянка.

Почти полное отсутствие кустарников и подлеска в городском парке и очень высокий фактор беспокойства, обуславливают самое низкое видовое разнообразие и плотность птиц по сравнению с другими парками приднестровских городов. Парк г. Рыбницы (коэффициент видового разнообразия (КВР) = 7,3 %) однозначно входит в группу «типично городских парков» – КВР = 6–8 %, согласно классификации С. И. Божко [5]. Здесь доминировали зеленушка ($Di = 25,0$), полевой воробей ($Di = 16,7$) и зяблик ($Di = 16,7$).

На кладбищах г. Рыбницы гнездились 23 вида птиц (табл. 2).

Таблица 2

Структура гнездовой орнитофауны кладбищ г. Рыбница

Вид	Пар/км ²		
	Городское	Старое христианское	Среднее
1	2	3	4
<i>Streptopelia decaocto</i>	16,7	87,3	52,0
<i>Urupa epops</i>	16,7	–	8,4
<i>Dendrocopos syriacus</i>	16,7	87,3	52,0
<i>Galerida cristata</i>	33,3	–	16,7
<i>Lanius collurio</i>	83,3	87,3	85,3
<i>Lanius minor</i>	16,7	–	8,4
<i>Oriolus oriolus</i>	33,3	–	16,7
<i>Sturnus vulgaris</i>	33,3	–	16,7
<i>Garrulus glandarius</i>	16,7	–	8,4
<i>Sylvia atricapilla</i>	16,7	–	8,4
<i>Sylvia curruca</i>	33,3	–	16,7
<i>Phylloscopus collybita</i>	16,7	–	8,4

1	2	3	4
<i>Oenanthe oenanthe</i>	50	–	25,0
<i>Luscinia luscinia</i>	–	87,3	43,7
<i>Turdus merula</i>	16,7	–	8,4
<i>Parus major</i>	16,7	–	8,4
<i>Sitta europaea</i>	16,7	–	8,4
<i>Passer domesticus</i>	50	–	25,0
<i>Passer montanus</i>	50	87,3	68,7
<i>Chloris chloris</i>	33,3	87,3	60,3
<i>Carduelis carduelis</i>	33,3	–	16,7
<i>Acanthis cannabina</i>	83,3	87,3	85,3
<i>Coccothraustes coccothraustes</i>	16,7	–	8,4
Плотность	700,1	611,1	656,4
Число видов	22	7	23
Индекс Шеннона (H')	1,41	0,85	1,46
Индекс Пиелу (E)	0,46	0,43	0,47
Индекс Симпсона (C)	0,06	0,14	0,08

На кладбищах доминировали 3 вида: жулан ($Di = 13,0$), коноплянка ($Di = 13,0$) и полевой воробей ($Di = 10,5$).

Редко посещаемые участки погостов, на которых образуются плотные заросли кустарников (*Syringa vulgaris* L. и др.), привлекают соловья и жулана. Большое количество можжевельника обыкновенного *Juniperus communis* L. привлекает на кладбища коноплянку и славку-завирушку. Административные и хозяйственные строения, часовни обуславливают гнездование там домового воробья, деревенской ласточки, удода *Upupa epops* Linnaeus, 1758. Ниши и полые металлические трубы в ритуальных сооружениях используют для сооружения гнезд полевые воробьи, большие синицы, обыкновенные каменки и др. Ксероморфные участки низкостебельных растений в секторах новых захоронений обуславливают гнездование там хохлатого жаворонка и привлекают обыкновенных каменок. Степень озелененности, в том числе возраст древесных насаждений, имеет большое значение для большинства птиц – дендрофилов: кольчатой горлицы, сирийского дятла, чернолобого сорокопута *Lanius minor* Gmelin, 1788, иволги *Oriolus oriolus* (Linnaeus, 1758), сойки *Garrulus glandarius* (Linnaeus, 1758), дубоноса, поползня *Sitta europaea* Linnaeus, 1758 (на городском кладбище гнездилась одна пара птиц, относящихся к подвиду *Sitta europaea homeyeri* Hart, вероятно г. Рыбница – самое южное в ПМР место гнездования польского подвида).

Сообществам птиц урбанизированных местообитаний города могут быть присвоены названия:

– Селитебной зоны – орнитоассоциация *Passero domesticus* – *Delichonetum urbica* (воробьино-ласточковая). *Passer domesticus*, *Delichon urbica*, *Columba livia*, *Passer montanus* (2 201,5);

– Промышленной зоны – также орнитоассоциация *Passero domesticus* – *Delichonetum urbica* (воробьино-ласточковая): *Passer domesticus*, *Delichon urbica*, *Hirundo rustica*, *Passer montanus*, *Lanius collurio*, *Carduelis carduelis*, *Columba livia* (692,1);

– Кладбищ – орнитоассоциация *Laniuso collurioci* – *Acanthio cannabini* – *Passeretum montanus* (жуланово-коноплянково-воробьиная): *Lanius collurio*, *Acanthis cannabina*, *Passer montanus*, *Chloris chloris*, *Streptopelia decaocto*, *Dendrocopos syriacus*, *Luscinia luscinia*, *Oenanthe oenanthe*, *Passer domesticus* (656,4);

– Парка – орнитоассоциация *Chlorio chlorici* – *Passero montanici* – *Fringillietum coelebs* (зеленушково-воробьино-зябликовая): *Chloris chloris*, *Passer montanus*, *Fringilla coelebs*, *Dendrocopos syriacus*, *Oriolus oriolus*, *Sturnus vulgaris* (320,1).

Птицы, гнездившиеся в урбанизированных биотопах г. Рыбницы представляли: 6 типов фауны (европейский, транспалеарктический, голарктический, монгольский, средиземноморский, сибирский, один вид неясного происхождения); 9 ландшафтно-генетических фаунистических комплексов (ЛГФК: неморальный, древне-неморальный, лесостепной, древне-лесостепной, тропический, пустынно-горный, пустынно-степной, субсредиземноморский, бореальный); 3 экологических группировки (дендрофильная, склерофильная и кампофильная); 5 трофических групп (энтомофаги, фито-энтомофаги, фитофаги, эврифаги, хищники); 4 группы по ярусам гнездования (птицы, гнездящиеся в кронах деревьев и кустарников, дуплогнездники-домушники, наземногнездящиеся птицы и норники).

По числу видов представители европейского типа фауны доминировали в селитебной зоне (55,9 %), промышленной зоне (48,2), на кладбищах (65,2) и в парке (75,0); неморального и пустынно-горного ландшафтно-генетических комплексов – в селитебной зоне (по 29,4 %), неморального – на кладбищах (30,4) и в парке (37,5), пустынно-горного ЛГФК – в промышленной зоне (37,0); дендрофильной группировки – в селитебной зоне (64,7), промзоне (55,6), на кладбищах (73,9) и в парке (75,0); энтомофаги – в селитебной зоне (52,9), промзоне (51,9), на кладбищах (56,5), фитофаги – в парке (37,5); кронники – в селитебной зоне (47,1), на кладбищах (56,5), в парке (62,5); дуплогнездники-домушники – в промзоне (51,9 %).

По обилию, особи видов, относящихся к транспалеарктическому типу фауны преобладали в селитебной (71,8 %) и промышленной (77,2) зонах, европейскому типу – на кладбищах (49,3) и в парке (75,0); пустынно-горному ЛГФК в селитебной (83,0) и промышленной (77,2) зонах, лесостепному ЛГФК на кладбищах (39,0) и в парке (33,3); склерофильной экологической группировке – в селитебной (83,4) и промышленной (80,0) зонах, дендрофильной группе – на кладбищах (75,6) и в парке (75,0); трофической группе фитофагов – во всех урбанизированных местообитаниях (76,0, 54,9, 48,2 и 50,0 % соответственно); по способу гнездования, дуплогнездники-домушники доминировали в селитебной (85,8) и промышленной (82,0) зонах, птицы, гнездящиеся в кронах деревьев и кустарников превалировали на кладбищах (58,4) и в парке (66,7 %).

Орнитофауна иноландшафтных включений («негородских экосистем» [8]) не отличалась высоким разнообразием. На петрофитном «пустыре» гнездились три вида: жулан (4 пары), славка-черноголовка (1 пара) и серая славка *Sylvia communis* Latham, 1787 (1 пара).

Среди водно-болотных местообитаний реки Сухая Рыбница размножались 10 видов лимнофильных птиц (табл. 3).

Доминировали: дроздовидная камышевка *Acrocephalus arundinaceus* (Linnaeus, 1758) ($Di = 28,9$), камышница *Gallinula chloropus* (Linnaeus, 1758) ($Di = 15,7$), обыкновенная кукушка *Cuculus canorus* Linnaeus, 1758 ($Di = 13,2$) и тростниковая камышевка *Acrocephalus scirpaceus* (Hermann, 1804) ($Di = 13,2$). Орнитоассоциация *Acrocephalus arundinacici* – *Gallinuletum chloropus* – aliud. (дроздовидково-камышницевая поливидовая). *Acrocephalus arundinaceus*, *Gallinula chloropus*, *Cuculus canorus*, *Acrocephalus scirpaceus*, *Acrocephalus palustris* (38).

Тростниковые «крепи» были местом гнездования малой выпи *Ixobrychus minutus* (Linnaeus, 1766), дроздовидной и тростниковой камышевок. По краям плесов и озер гнездились камышницы и камышевки-барсучки *Acrocephalus schoenobaenus* (Linnaeus, 1758). Заросли травянистой и кустарниковой растительности по берегам речки использовались для сооружения гнезд кряквой *Anas platyrhynchos* Linnaeus, 1758. Болотные камышевки *Acrocephalus palustris* (Bechstein, 1798) обитали среди зарослей свидины *Swida sanguinea* (L.) Opiz, болиголовы *Conium maculatum* L. и поросли клена американского *Acer negundo* L. Ветви ивы белой *Salix alba* L. служили ремезу *Remiz pendulinus* (Linnaeus, 1758) основой для плетения «рукавичек». Холмисто-овражная местность у речки обеспечивала зимородков *Alcedo atthis* (Linnaeus, 1758) множеством подходящих для рытья нор отвесных обнажений глинистых пород.

Структура гнездовой орнитофауны реки Сухая Рыбница

Вид	Количество пар		
	Сектор 1*	Сектор 2**	Итого
<i>Ixobrychus minutus</i>	2	–	2
<i>Anas platyrhynchos</i> ***	–	1	1
<i>Gallinula chloropus</i>	5	1	6
<i>Cuculus canorus</i> ***	3	2	5
<i>Alcedo atthis</i>	1	1	2
<i>Acrocephalus schonobaenus</i>	1	1	2
<i>Acrocephalus palustris</i>	3	–	3
<i>Acrocephalus scirpaceus</i>	4	1	5
<i>Acrocephalus arundinaceus</i>	5	6	11
<i>Remiz pendulinus</i>	1	–	1
Численность	25	13	38
Число видов	9	7	10
Индекс Шеннона (H)			1,12
Индекс Пиелу (E)			0,69
Индекс Симпсона (C)			0,14

Примечание. * – участок р. Сухая Рыбница (от дома № 35 по ул. 1-й Загородной до автотрассы); ** – Дельта Сухой Рыбницы (от автотрассы до Днестра); *** – условных пар.

Помимо лимнофильных птиц, на лугу возле речки гнездилась представительница кампофильной экологической группы – желтая трясогузка *Motacilla flava* Linnaeus, 1758 (1 пара).

Выводы

В зоне застройки г. Рыбница в начале XXI-го века гнездились 52 вида птиц, относящихся к 10 отрядам и 26 семействам: Ciconiiformes – 1 вид (1 семейство), Anseriformes – 1 (1), Gruiformes – 1 (1), Columbiformes – 2 (1), Cuculiformes – 1 (1), Strigiformes – 2 (1), Apodiformes – 1 (1), Coraciiformes – 3 (3), Piciformes – 2 (1); Passeriformes – 38 видов (15 сем., 73,1 % от общего числа видов). В селитебной зоне города гнездились 34 вида птиц, в промышленной зоне – 27, на кладбищах – 23 вида. Наименьшее число видов (п-8), населяло городской парк. Суммарная плотность птиц составляла от 320,1 до 2 201,5 пар/км². Экосистема реки Сухая Рыбница обеспечивала гнездование 10 видов лимнофильных птиц. На пустыре и лугу возле речки дополнительно зарегистрированы еще два вида (серая славка и желтая трясогузка). Доминантами в гнездовом населении птиц являлись: домовый воробей и городская ласточка (в селитебной и промышленной зонах), жулан, коноплянка и полевой воробей (на кладбищах), зеленушка, полевой воробей и зяблик (в парке). Среди водно-болотных угодий преобладали дроздовидная камышевка, камышница, кукушка и тростниковая камышевка. Синантропами по отношению к селитебной зоне Рыбницы считались птицы, относящиеся к 20 видам. По отношению к промзоне в качестве синантропов выступали 15 видов.

Список литературы

1. Аверин Ю. В., Ганя И. М. Птицы Молдавии. Кишинев: РИО АН МССР, 1970. Т. 1. 240 с.
2. Аверин Ю. В., Ганя И. М., Успенский Г. А. Птицы Молдавии. Кишинев: Штиинца, 1971. Т. 2. 236 с.

3. *Александрова В. Д.* Классификация растительности. Обзор принципов классификации и классификационных систем в разных геоботанических школах. Л.: Наука, 1969. 275 с.
4. *Белик В. П.* Птицы степного Придонья: Формирование фауны, ее антропогенная трансформация и вопросы охраны. Ростов-на-Дону: Изд-во РГПУ, 2000. 376 с.
5. *Божко С. И.* О методах количественного учета и оценки видового состава орнитофауны парков // Орнитология. 1976. Вып. 12. С. 216–221.
6. *Данилов Н. Н.* Формирование пространственной структуры населения птиц // Экология, география и охрана птиц. Л.: ЗИН АН СССР, 1980. С. 113–120.
7. *Захаров В. Д.* Биоразнообразие населения птиц наземных местообитаний Южного Урала. Миасс: ИГЗ УрО РАН, 1998. 158 с. ISBN 5-7691-0871-1.
8. *Клауснитцер Б.* Экология городской фауны. М.: Мир, 1990. 248 с. ISBN 5-03-001383-0.
9. *Кузякин А. П.* Зоогеография СССР // Ученые записки МГПИ им. Н. К. Крупской. 1962. Т. 109, вып. 1. С. 3–182.
10. *Никифоров М. Е., Яминский Б. В., Шкляр Л. П.* Птицы Белоруссии: справочник-определитель гнезд и яиц. Минск: Вышэйша школа, 1989. 479 с. ISBN 5-339-00209-8.
11. *Рахимов И. И.* Участие основных таксономических групп птиц (отрядов и семейств) в авифауне урбанизированных ландшафтов Среднего Поволжья // Русский орнитологический журнал. 2001. № 151. С. 579–589. EDN: IUHLLR.
12. *Рахимов И. И.* Авифауна Среднего Поволжья в условиях антропогенной трансформации естественных природных ландшафтов. Казань: ЗАО «Новое знание», 2002. 272 с. ISBN 5-89347-164-4.
13. Государственная администрация Рыбницкого района и г. Рыбница. [Электронный ресурс]. URL: <https://rybnitsa.org> (дата обращения: 17.04.2026).
14. *Скільський І. В.* Структура та особливості формування орнітокомплексу паркових насаджень м. Чернівці // Беркут. 1998. Т. 7, вып. 1–2. С. 3–11. EDN: UBINXT.
15. *Скільський І. В.* О степени синантропизации орнитофауны: подходы, методики, результаты (на примере г. Черновцы) // Беркут. 2001. Т. 10, вып. 2. С. 140–152. EDN: OMSDVL.
16. *Степанян Л. С.* Конспект орнитологической фауны СССР. М.: Наука, 1990. 728 с. ISBN 5-02-005300-7.
17. *Тищенко А. А.* Птицы заповедника «Ягорлык» // Научные труды зоологического музея Одесского национального университета: Т. 4. Мат-лы по изучению животного мира (фаунистика, морфология, методика исследований). Одесса: Астропринт, 2001. С. 68–74.
18. *Тищенко А. А.* Фауна и население птиц, гнездящихся в парке «П. Х. Витгенштейна» // Научные чтения памяти профессора В. В. Станчинского. Смоленск: Изд-во СГПУ, 2004. Вып. 4. С. 269–273.
19. *Тищенко А. А.* О классификации урбанизированного ландшафта применительно к зоогеографическим целям // Поволжский экологический журнал. 2006. № 1. С. 95–103. EDN: HSQKAN.
20. *Штегман Б. К.* Основы орнитогеографического деления Палеарктики // Фауна СССР: Птицы. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1938. Т. 1, ч. 2. С. 1–157.
21. *Щеголев В. И.* Количественный учет птиц в лесной зоне // Методики исследования продуктивности и структуры видов птиц в пределах их ареалов. Вильнюс: Мокслас, 1977. Ч. 1. С. 95–102.

References

1. Averin, Yu. V. & Ganya, I. M. (1970). *Ptitsi Moldavii [Birds of Moldova]*. Chisinau: MSSR Academy of Sciences Publ. Vol. 1. 240 p. (In Russian).
2. Averin, Yu. V., Ganya, I. M. & Uspenskiy, G. A. (1971). *Ptitsi Moldavii [Birds of Moldova]*. Chisinau: Stiintsa Publ. Vol. 2. 236 p. (In Russian).

3. Aleksandrova, V. D. (1969). *Classification of vegetation. Principles of classification and classification systems of various phytocoenological schools*. Leningrad: Nauka Publ. 275 p. (in Russian).
4. Belik, V. P. (2000). *Ptitsi stepnogo Pridon'ya: Formirovanie fauni, ee antropogennaya transformatsiya i voprosy ohrany* [Birds of the steppe part of the Don River Basin: Formation of birds fauna, and anthropogenic transformation and some conservation problems]. Rostov-on-Don: Rostov Pedagogical State University Publ. 376 p. (In Russian).
5. Bozhko, S. I. (1976). About methods of quantitative accounting and assessment of species composition of ornithofauna of parks. *Ornithologia*, 12, 216–221 (in Russian).
6. Danilov, N. N. (1980). Formirovanie prostranstvennoj struktury naseleniya ptits [Formation of spatial structure of bird population]. *Ekologiya, geografiya i jkhrana ptits* [Ecology, geography and protection of birds]. Leningrad: Zoological institute of the USSR Academy of Sciences Publ., 113–120 (in Russian).
7. Zaharov, V. D. (1998). *Bioraznoobrazie naseleniya ptits nazemnykh mestoobitanij Yuzhnogo Urala* [Biodiversity of the birds population of terrestrial habitats of the Southern Ural]. Miass, 158 p. ISBN 5-7691-0871-1. (In Russian).
8. Klausnitter, B. (1990). *Ekologiya gorodskoj fauny* [Ecology of urban fauna]. Moscow: Mir Publ., 248 p. ISBN 5-03-001383-0. (In Russian).
9. Kuzyakin, A. P. (1962). Zoogeografiya SSSR [Zoogeography of the USSR]. *Uchenyye zapiski MOIP im. N. K. Krupskoy* = Scientific notes of the Moscow Regional Pedagogical Institute named after N. K. Krupskaya, 109, 1, 3–182. (In Russian).
10. Nikiforov, M. E., Yaminskiy, B. V. & Shklyarov, L. P. (1989). *Ptitsy Belorussii: spravochnik-opredelitel' gnezd i ayits* [Birds of the Belarus: reference guide for determining nests and eggs]. Minsk: Vysheishaya shkola Publ. 479 p. ISBN 5-339-00209-8. (in Russian).
11. Rakhimov, I. I. (2001). The involvement of basic taxa (orders and families) of birds in urban avian communities in the Middle Volga. *The Russian Journal of Ornithology*, 151, 579 – 589, EDN: IUHLRL. (in Russian).
12. Rakhimov, I. I. (2002). *Avifauna Srednego Povolzh'ya v usloviyakh antropogennoj transformatsii estestvennykh prirodnykh landshaftov* [Avifauna of the Middle Volga region in the conditions anthropogenic transformation of natural landscapes]. Kazan: Novoe znanie. 272 p. ISBN 5-89347-164-4. (in Russian).
13. The Government of the Rybnitsky district and the city of Rybnitsa. Retrieved from: <https://rybnitsa.org> (accessed 17.04.2026). (In Russian).
14. Skilsky, I. V. (1998). Structure and peculiarities of forming of the park ornithocomplex in Chernivtsi. *Berkut*, 7(1-2), 3–11, EDN: UBINXT. (in Ukraine).
15. Skilsky, I. V. (2001). About synanthropization degree of the ornithofauna: approaches, methods, results (on example of Chernivtsi city). *Berkut*, 10(1-2), 140–152, EDN: OMSDVL. (in Russian).
16. Stepanyan, L. S. (1990). *Synopsis of Ornithological Fauna of the USSR*. Moscow: Nauka Publ. 728 p. ISBN 5-02-005300-7. (In Russian)
17. Tischenkov, A. A. (2001). Birds of the Yagorlyk Reserve. *Transactions of Zoological museum of Odessa national university: materials to the knowledge of animals (fauna, morphology, methods of investigations)*. 4. Odessa: Astroprint. 68–74. (in Russian).
18. Tishchenkov, A. A. (2004). Fauna and population of birds nesting in the park named after P. H. Wittgenstein. *Scientific readings in memory of Professor V. V. Stanchinsky*. 4. Smolensk: Smolensk State Pedagogical University Publ. 269–273. (in Russian).
19. Tischenkov, A. A. (2006). Urbanized landscape classification for zoogeographical purposes. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 1, 95–103. ISSN 1684-7318. (In Russian).
20. Shtegman, B. K. (1938). *Osnovy ornitogeograficheskogo deleniya Palearktiki* [Bases of ornithogeographic division of the Palearctic]. Fauna of the USSR: Birds. Moscow–Leningrad: USSR Academy of Sciences Publ., Vol. 1, part 2, 1–157. (In Russian).

21. Schegolev, V. I. (1977). Kolichestvennyj uchet ptits v lesnoj zone [Quantitative accounting of birds in the forest zone] In *Metodiki issledovaniya produktivnosti i struktury vidov ptits v predelakh ikh arealov* [Methods of using the productivity and structure of bird species within their range]. Vilnius: Mokslas Publ. Part 1. 95–102. (In Russian).

Поступила в редакцию 17.04.2026 г.

Tischenkov A. A. Structure of the nesting avifauna of Rybnitsa City at the beginning of the XXI century (Pridnestrovie). – In Rybnitsa City, 52 species of birds were nested at the beginning of the XXI century. In resident area, 34 species were nested, in industrial zone – 27 species, at the graveyards – 23 species, in city's park – 8 species of birds. The total density of birds ranged from 320,1 to 2201,5 pairs/km². The wetland ecosystem of the Sukhaya Rybnitsa River provided nesting for 10 species of limnophilic birds. *Passer domesticus* and *Delichon urbica* were the dominants in resident and industrial areas; *Lanius collurio*, *Acanthis cannabina* and *Passer montanus* were the dominant in the cemeteries; *Chloris chloris*, *Passer montanus* and *Fringilla coelebs* – in city's park. Among the wetlands, *Acrocephalus arundinaceus*, *Gallinula chloropus*, *Cuculus canorus* and *Acrocephalus scirpaceus* were the predominated.

Keywords: Aves, distribution, nesting, species composition, density.

Тищенко Алексей Анатольевич

заведующий зоологическим музеем естественно-географического факультета ГОУ «Приднестровский государственный университет им. Т. Г. Шевченко», г. Тирасполь, Приднестровская Молдавская Республика.

E-mail: tdbirds2@gmail.com

ORCID: 0009-0004-3607-4201

SPIN-код: 2488-4188

Author ID: 757601

Tischenkov Alexey Anatolievich

Chief of the Zoological Museum of the Pridnestrovian State University, Tiraspol, Pridnestrovian Moldavian Republic.

© Н. А. Дьякова

**НАКОПЛЕНИЕ ТОРИЯ-232 В ЛЕКАРСТВЕННОМ РАСТИТЕЛЬНОМ СЫРЬЕ
ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ***ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»
Россия, 394006, г. Воронеж, Университетская пл., д. 1***Дьякова Н. А. Накопление тория-232 в лекарственном растительном сырье Воронежской области. –**

В статье приведены результаты изучения аккумуляции в лекарственных растениях тория-232 на примере Воронежской области. С наибольшей эффективностью торий-232 аккумулируется в корнях и листьях. Удельная активность тория-232 в почве и растениях отличается относительной равномерностью распределения по районам заготовки и заметной взаимосвязью между данными показателями, что подтверждает преимущественное транспочвенное загрязнение торием-232 флоры.

Ключевые слова: Воронежская область, торий-232, *Polygonum aviculare* L., *Artemisia absinthium* L., *Achillea millefolium* L., *Leonurus quinquelobatus* Gilib., *Plantago major* L., *Urtica dioica* L., *Tilia cordata* Mill., *Tanacetum vulgare* L., *Taraxacum officinale* F. H. Wigg, *Arctium lappa* L.

Введение

Несмотря на то, что лекарственное растительное сырье (ЛРС) и препараты на его основе, как правило, не относятся к значимым источникам поступления радионуклидов в организм человека, учет их аккумуляционного потенциала является обязательным элементом оценки качества. При этом лекарственные растения демонстрируют выраженную способность к накоплению не только нормируемых техногенных изотопов (стронций-90, цезий-137), но и радионуклидов природного происхождения (калий-40, радий-226, торий-232), которые также активно мигрируют по трофической цепи «почва → ЛРС → лекарственный препарат → человек» [15, 16, 20].

Удельная активность природных радионуклидов в настоящее время не нормируется, что обусловлено их повсеместным распространением, значительными периодами полураспада и отсутствием прямой связи с техногенной деятельностью. Эти изотопы формируют естественный радиационный фон, интенсивность которого варьирует в зависимости от геохимических особенностей региона. Ключевой особенностью радиоактивных загрязнителей является их способность инкорпорироваться в биологические объекты, не влияя при этом на показатели плодородия почв [1, 5, 8].

Интенсивность перехода радионуклидов из почвы в растение является мультифакторным процессом, зависящим от комплекса условий.

Важное значение имеет гранулометрический и химический состав почв. Наибольшие коэффициенты перехода характерны для легких минеральных почв (песчаных, супесчаных), тогда как плодородные глинистые почвы (черноземы, серые лесные) за счет высокой сорбционной емкости значительно ограничивают биодоступность изотопов [9, 13].

Повышение кислотности и влажности почвы усиливает мобильность радионуклидов, увеличивая их поступление в корневую систему. Напротив, высокое содержание органического вещества (гумуса) и кальция выступает мощным барьером: увеличение доли гумуса с 1 % до 3 % способно снизить переход изотопов в растение в два раза. Черноземные почвы с высоким содержанием гумуса (6–15 %), создают естественный геохимический барьер для миграции радиоизотопов. Высокая концентрация гуминовых кислот, обладающих большим количеством активных карбоксильных и фенольных групп, обеспечивает прочное

связывание радионуклидов в устойчивые комплексы, снижая его биодоступность для корневых систем растений [2, 3, 14].

Аккумуляционная способность тесно коррелирует с видовой спецификой растения, его фенологической фазой и исторически сформировавшимся радиационным фоном местности. Максимальные коэффициенты накопления наблюдаются в регионах с повышенным естественным фоном (зоны развития гранитоидов, урановых руд, фосфоритов), особенно в условиях гумидного климата [2, 10, 18].

Таким образом, проблема аккумуляции радионуклидов в ЛРС требует дифференцированного подхода. Несмотря на то, что фармакопейные нормы в настоящее время фокусируются на техногенных изотопах, потенциал накопления природных радионуклидов делает целесообразным проведение локального радиоэкологического мониторинга. Это позволит минимизировать потенциальные риски и гарантировать экологическую безопасность фитопрепаратов.

Торий-232, являясь основным и наиболее долгоживущим (период полураспада составляет $1,41 \cdot 10^{10}$ лет) природным радионуклидом, характеризуется как альфа-излучатель с ограниченной способностью к миграции в биосфере. Его поведение в почвах определяется двумя противоположными процессами: интенсивная сорбция и комплексообразование. Радионуклид эффективно поглощается тонкодисперсными фракциями глинистых минералов и гуминовыми кислотами, что резко ограничивает его подвижность. Максимальная сорбция наблюдается в нейтральных и слабощелочных условиях. Однако, при наличии лигандов (фтор-, сульфат-, фосфат-ионов и др.) торий образует координационные соединения, способные к миграции, особенно в грунтовых водах с высоким содержанием органики и низким pH [2, 3, 13, 19].

Несмотря на низкую биологическую значимость, торий-232 постоянно присутствует в живых организмах. Его аккумуляция растениями, характеризуемая коэффициентом накопления (КН), варьируется в чрезвычайно широких пределах (от 0,01 до 10,0) и напрямую зависит от типа почвы. Наибольшие КН характерны для бедных песчаных почв, тогда как минимальное накопление наблюдается в богатых органикой черноземных и болотных почвах. Среди растений-концентраторов выделяются черника, вереск и лишайники, в то время как злаковые культуры (пшеница, рис) накапливают торий наименее интенсивно [2, 6, 7, 18].

Цель исследования – изучение особенностей накопления в растительных ресурсах флоры Воронежской области тория-232.

Материал и методы исследования

В основу настоящего исследования положен принцип использования в качестве модельных объектов широко распространенных видов российской флоры, представляющих как естественные ценозы, так и синантропные группировки. Критерием отбора послужила их значимость в качестве источника лекарственного сырья, заготавливаемого из природных популяций. Включены виды, различающиеся по спектру используемых органов (надземная часть, листья, репродуктивные структуры, подземные части) и по жизненной форме продуцентов. В перечень объектов вошли:

- надземная часть (трава): *Polygonum aviculare* L., *Artemisia absinthium* L., *Achillea millefolium* L., *Leonurus quinquelobatus* Gilib.
- листовая пластинка (листья): *Plantago major* L., *Urtica dioica* L.
- цветки и соцветия (цветки): *Tilia cordata* Mill., *Tanacetum vulgare* L.
- корневая система (корни): *Taraxacum officinale* F.H.Wigg, *Arctium lappa* L.

Для оценки процессов почвенно-растительной миграции радионуклида параллельно с образцами фитомассы отбирались пробы из верхнего горизонта почвы (0–20 см). Отбор проб производился на учетных площадках, контрастных по характеру и интенсивности антропогенной нагрузки (рис. 1) [11, 17].

Удельная активность радионуклидов в образцах почвы и растительного сырья определяли с помощью спектрометра МКГБ-01 «РАДЭК» (НТЦ «РАДЭК», Россия) [4, 12]. Все измерения выполняли в трехкратной аналитической повторности.



Рис. 1. Карта-схема учетных площадок отбора проб почвы и растительных объектов (расшифровка обозначений в таблице 1)

Для оценки способности растений аккумулировать радиоизотоп из почвы был применен коэффициент накопления (КН), рассчитанный по формуле:

$$КН = \frac{A_{ЛРС} \cdot 100}{A_{П}},$$

где $A_{ЛРС}$ – удельная активность радиоизотопа в растительных образцах, Бк/кг,
 $A_{П}$ – удельная активность радиоизотопа в почве, Бк/кг [6, 7].

Статистическую обработку данных проводили с доверительной вероятностью $p = 0,95$. Анализ взаимосвязи между содержанием радиоизотопа в почве и растительных образцах выполняли методом параметрической статистики с вычислением коэффициента корреляции Пирсона. Интерпретацию силы корреляционной связи проводили с использованием шкалы Чеддока [7, 19].

Результаты и обсуждение

Средняя удельная активность тория-232 в почвах региона (табл. 1) составила 38,5 Бк/кг (диапазон 28,9–63,8 Бк/кг), что превышает среднероссийские и среднемировые показатели. Данная особенность обусловлена преобладанием черноземных почв, характеризующихся повышенным содержанием природных радионуклидов.

Исследования выявили значительные межвидовые различия в накоплении тория-232 в ЛРС. Наблюдается четкая органная дифференциация в аккумуляции тория-232: корневые системы (лопух, одуванчик) и листья (крапива, подорожник) демонстрируют наибольшую способность к концентрированию данного радионуклида, тогда как надземные части травянистых растений и цветки накапливают торий-232 в меньшей степени. Наиболее

высокая удельная активность тория-232 отмечена для корней лопуха обыкновенного (среднее значение удельной активности составило 19,0 Бк/кг), листьев крапивы двудомной (15,9 Бк/кг), корней одуванчика лекарственного (14,1 Бк/кг), листьев подорожника большого (14,0 Бк/кг). Наиболее низкая удельная активность тория-232 выявлена для цветков пижмы обыкновенной (6,3 Бк/кг), цветков липы сердцевидной (5,6 Бк/кг), травы тысячелистника обыкновенного (4,9 Бк/кг).

Таблица 1

**Результаты определений удельной активности тория-232
в объектах исследования (Бк/кг)**

№ п/п	Территория отбора образцов	Трава горца птичьего	Трава полыни горькой	Трава тысячелистника обыкновенного	Трава пустырника пятилопастного	Листья подорожника большого	Листья крапивы двудомной	Цветки липы сердцевидной	Цветки пижмы обыкновенной	Корни одуванчика лекарственного	Корни лопуха большого	Почва
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Территория Воронежского заповедника	6,0 ± 2,4	6,5 ± 3,5	3,2 ± 2,3	8,2 ± 4,1	12,4 ± 3,7	11,4 ± 3,5	4,6 ± 1,6	6,7 ± 1,9	10,2 ± 1,9	12,1 ± 4,9	32,1 ± 10,6
2	Территория Хоперского заповедника	6,2 ± 2,1	7,2 ± 2,8	3,4 ± 1,9	8,4 ± 3,2	11,7 ± 4,2	10,8 ± 2,9	4,2 ± 2,8	6,2 ± 1,5	10,4 ± 2,8	11,3 ± 3,8	32,1 ± 6,8
3	Территория Теллермановского леса	1,3 ± 1,0	5,4 ± 4,9	3,6 ± 2,0	6,3 ± 1,5	14,3 ± 5,7	12,3 ± 4,1	5,3 ± 2,0	6,3 ± 2,4	10,7 ± 3,1	14,6 ± 6,1	30,5 ± 4,9
4	Село Елань-Колено	5,0 ± 2,1	7,8 ± 5,3	2,6 ± 1,0	7,5 ± 1,6	10,8 ± 4,8	17,4 ± 5,0	5,7 ± 2,7	6,4 ± 3,0	11,2 ± 2,6	18,4 ± 2,0	36,8 ± 8,4
5	Село Нижнедевицк	7,2 ± 2,9	6,2 ± 1,9	5,3 ± 2,8	7,2 ± 2,5	9,8 ± 3,9	14,5 ± 2,8	6,3 ± 1,9	6,0 ± 2,4	9,9 ± 3,8	14,3 ± 4,1	30,2 ± 11,6
6	Улица города Острогожск	10,4 ± 3,8	17,0 ± 3,9	4,8 ± 0,8	8,3 ± 4,3	11,7 ± 2,0	17,9 ± 3,5	5,9 ± 2,7	7,8 ± 3,9	12,8 ± 4,0	20,1 ± 3,8	41,1 ± 4,8
7	Улица города Семилуки	8,7 ± 2,8	13,4 ± 6,0	2,6 ± 1,9	7,0 ± 3,0	9,3 ± 4,1	14,1 ± 4,8	6,2 ± 3,5	7,6 ± 2,7	11,3 ± 1,9	19,4 ± 4,5	35,9 ± 5,0
8	Улица города Нововоронеж	7,8 ± 2,6	5,0 ± 4,1	3,0 ± 0,7	8,7 ± 2,8	14,7 ± 5,5	18,6 ± 3,0	5,2 ± 1,8	8,3 ± 3,6	12,4 ± 4,5	20,3 ± 2,7	40,6 ± 6,8
9	Высоковольтные линии электропередач	6,5 ± 2,5	5,2 ± 2,8	3,5 ± 2,7	7,2 ± 1,9	15,4 ± 6,0	16,5 ± 2,5	4,7 ± 0,6	6,0 ± 1,7	10,6 ± 2,6	17,4 ± 4,8	32,3 ± 7,0
10	Агробιοценоз Лискинского р-на	6,0 ± 2,3	4,5 ± 1,6	7,7 ± 1,7	6,9 ± 2,4	12,3 ± 4,7	14,1 ± 4,2	5,2 ± 1,9	5,7 ± 3,0	9,8 ± 3,1	12,1 ± 3,8	25,1 ± 9,3
11	Агробιοценоз Ольховатского р-на	9,6 ± 2,8	13,0 ± 5,9	3,2 ± 2,7	9,3 ± 3,5	13,0 ± 3,9	19,6 ± 5,7	6,7 ± 2,8	5,2 ± 2,2	13,3 ± 2,2	24,3 ± 2,9	45,2 ± 6,1
12	Агробιοценоз Подгоренского р-на	3,0 ± 1,9	11,0 ± 3,0	3,8 ± 2,2	9,7 ± 4,1	14,2 ± 2,9	17,4 ± 3,8	6,9 ± 3,6	5,0 ± 1,9	13,2 ± 4,2	22,1 ± 5,1	42,5 ± 11,7
13	Агробιοценоз Петропавловского р-на	5,2 ± 1,3	8,7 ± 5,1	3,4 ± 1,6	7,5 ± 2,8	14,5 ± 4,8	15,9 ± 4,9	7,3 ± 2,8	7,4 ± 2,9	12,4 ± 3,7	19,6 ± 4,0	37,1 ± 10,0
14	Агробιοценоз Грибановского р-на	5,7 ± 1,8	9,6 ± 4,8	3,6 ± 2,2	7,8 ± 3,0	17,4 ± 5,9	16,3 ± 2,7	5,7 ± 0,9	7,2 ± 3,3	14,7 ± 2,9	16,4 ± 3,8	39,8 ± 7,5
15	Агробιοценоз Хохольского р-на	7,6 ± 2,0	6,2 ± 2,7	2,8 ± 1,9	8,2 ± 4,4	16,5 ± 5,0	17,3 ± 5,9	6,0 ± 3,9	7,9 ± 1,6	15,2 ± 4,1	23,1 ± 5,9	40,9 ± 4,6
16	Агробιοценоз Новохоперского р-на	4,0 ± 1,8	7,5 ± 1,7	3,7 ± 0,6	7,3 ± 3,9	17,1 ± 3,0	19,0 ± 6,1	6,3 ± 2,7	7,6 ± 3,7	14,1 ± 3,0	18,3 ± 4,5	39,1 ± 10,2
17	Агробιοценоз Репьевского р-на	3,4 ± 1,5	7,8 ± 5,3	5,6 ± 1,1	7,4 ± 3,8	18,4 ± 4,3	14,5 ± 5,9	5,7 ± 3,5	8,1 ± 2,5	12,4 ± 2,8	14,8 ± 3,0	34,9 ± 10,5
18	Агробιοценоз Воробьевского р-на	6,0 ± 2,9	9,8 ± 6,2	6,7 ± 2,3	6,7 ± 4,0	19,5 ± 6,1	17,6 ± 6,8	5,9 ± 4,0	6,8 ± 3,1	13,3 ± 4,4	19,3 ± 6,2	35,9 ± 9,7
19	Агробιοценоз Панинского р-на	7,2 ± 1,8	7,2 ± 3,5	6,2 ± 1,9	7,5 ± 4,5	12,6 ± 3,4	18,3 ± 2,7	4,9 ± 1,7	6,2 ± 4,4	13,4 ± 4,2	16,4 ± 3,1	38,8 ± 8,8

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
20	Агробιοценоз Верхнехавского р-на	6,5 ± 2,9	5,4 ± 2,4	3,5 ± 0,8	6,7 ± 3,2	18,4 ± 2,5	17,2 ± 5,3	4,7 ± 2,0	6,0 ± 2,0	14,7 ± 3,7	21,1 ± 6,9	39,9 ± 7,4
21	Агробιοценоз Эртильского р-на	8,4 ± 3,2	7,7 ± 4,5	5,8 ± 1,3	5,9 ± 0,9	13,3 ± 4,9	19,1 ± 1,9	6,2 ± 3,6	5,9 ± 3,8	15,6 ± 2,5	21,4 ± 5,0	38,9 ± 9,5
22	Агробιοценоз Россошанского р-на	8,9 ± 1,8	7,8 ± 3,0	4,2 ± 2,3	6,8 ± 1,3	16,5 ± 3,7	18,5 ± 5,2	6,1 ± 4,2	5,4 ± 2,2	16,1 ± 3,1	19,1 ± 3,8	41,1 ± 10,7
23	Вблизи ОАО «Минудобрения»	8,1 ± 2,5	7,9 ± 3,9	4,3 ± 1,9	8,3 ± 2,4	13,9 ± 4,2	18,9 ± 3,0	7,3 ± 3,6	5,6 ± 1,7	17,6 ± 4,0	21,6 ± 4,2	41,6 ± 9,0
24	Вблизи ООО «Бормаш»	4,7 ± 1,9	4,6 ± 1,4	4,6 ± 1,7	6,7 ± 3,0	14,2 ± 3,6	12,6 ± 4,9	4,1 ± 2,7	4,2 ± 1,2	11,1 ± 2,9	15,3 ± 5,1	28,9 ± 8,2
25	Улица города Борисоглебск	4,2 ± 2,0	9,0 ± 5,8	4,5 ± 2,7	6,2 ± 2,7	12,1 ± 3,0	15,7 ± 2,8	3,8 ± 1,9	5,7 ± 2,0	12,8 ± 4,6	16,1 ± 3,7	31,1 ± 6,1
26	Улица города Калач	5,3 ± 1,3	10,1 ± 7,3	3,1 ± 3,1	7,9 ± 3,7	11,7 ± 2,9	14,2 ± 3,5	3,9 ± 2,4	5,9 ± 3,3	12,6 ± 3,1	18,8 ± 5,3	37,8 ± 8,5
27	Вблизи ТЭЦ-1 «ВОГРЭС»	14,0 ± 3,9	16,1 ± 8,0	3,2 ± 2,0	10,4 ± 3,8	20,6 ± 4,7	19,9 ± 6,2	6,9 ± 3,0	7,3 ± 1,8	26,4 ± 1,7	32,3 ± 4,3	63,8 ± 9,8
28	Вблизи ОАО «Воронежсинтезкаучук»	9,6 ± 3,7	11,5 ± 3,8	8,2 ± 1,5	12,1 ± 4,7	18,5 ± 2,9	18,3 ± 2,9	7,2 ± 3,6	6,9 ± 2,6	25,7 ± 3,3	29,4 ± 2,9	55,2 ± 7,7
29	Вблизи Воронежского вдхр.	9,2 ± 2,8	12,1 ± 5,5	8,8 ± 3,2	9,3 ± 3,7	17,3 ± 2,8	18,7 ± 4,0	7,6 ± 3,9	7,2 ± 1,7	22,1 ± 4,9	22,2 ± 4,0	52,9 ± 8,0
30	Вблизи международного аэропорта	8,0 ± 3,2	10,7 ± 6,8	4,2 ± 3,0	5,4 ± 2,2	16,4 ± 4,9	14,2 ± 5,0	4,6 ± 2,7	5,4 ± 2,8	16,4 ± 3,5	20,4 ± 3,2	35,8 ± 7,4
31	Улица города Воронеж	9,2 ± 3,0	9,8 ± 3,3	7,6 ± 1,2	12,9 ± 3,0	11,5 ± 4,0	18,9 ± 2,6	6,7 ± 2,5	7,6 ± 3,8	21,1 ± 5,0	27,4 ± 5,0	52,3 ± 9,5
32	Трасса М4 «Дон» в Рамонском р-не	4,5 ± 2,1	11,5 ± 6,2	6,5 ± 2,5	6,1 ± 4,1	10,6 ± 5,2	10,7 ± 3,7	5,5 ± 2,1	3,8 ± 2,2	12,3 ± 3,8	15,6 ± 7,3	33,3 ± 10,3
33	Трасса А144	7,2 ± 3,0	10,7 ± 4,9	7,7 ± 2,5	7,8 ± 5,2	13,7 ± 3,8	12,9 ± 3,9	5,2 ± 2,9	5,7 ± 3,6	13,7 ± 1,9	16,9 ± 6,2	41,4 ± 7,9
34	Трасса М4 «Дон» в Павловском р-не	3,6 ± 1,7	8,4 ± 4,2	6,4 ± 2,8	5,5 ± 0,8	9,7 ± 4,9	11,3 ± 4,7	4,3 ± 1,5	5,3 ± 2,8	10,8 ± 3,9	14,0 ± 5,8	28,6 ± 6,8
35	Дорога обычного типа	5,0 ± 2,3	7,2 ± 3,9	7,6 ± 1,2	6,3 ± 1,8	9,6 ± 2,8	14,4 ± 2,9	4,7 ± 1,2	6,1 ± 1,6	14,1 ± 2,6	19,3 ± 6,0	39,0 ± 7,9
36	Железнодорожные пути	5,2 ± 2,4	5,6 ± 4,1	6,8 ± 3,0	6,7 ± 2,2	11,1 ± 3,0	14,8 ± 5,9	4,1 ± 1,0	6,0 ± 3,1	14,7 ± 3,9	17,2 ± 3,2	33,5 ± 7,9
Среднее для Воронежской области		6,6	8,8	4,9	7,7	14,0	15,9	5,6	6,3	14,1	19,0	38,5

Наиболее высокие значения удельной активности тория-232 зафиксированы в почвах и ЛРС промышленной зоны, прилегающей к ТЭЦ-1 «ВОГРЭС». Это объясняется многолетним использованием каменного угля, сжигание которого приводит к выбросам естественных радионуклидов, включая торий-232.

Корреляционный анализ удельных активностей тория-232 в почве и изучаемых растительных объектах (табл. 2) показал наличие высокой прямой взаимосвязи между данными числовыми показателями, что подтверждает преимущественное транспочвенное загрязнение флоры региона данным радиоизотопом.

Таблица 2

**Коэффициенты корреляции между удельной активностью тория-232
в растительных объектах исследования и почве**

Растительный объект	Коэффициент корреляции
1	2
Трава горца птичьего (<i>Polygonum aviculare</i> L.)	0,71
Трава полыни горькой (<i>Artemisia absinthium</i> L.)	0,60
Трава тысячелистника обыкновенного (<i>Achillea millefolium</i> L.)	0,12
Трава пустырника пятилопастного (<i>Leonurus quinquelobatus</i> Gilib.)	0,76

Продолжение табл. 2

1	2
Листья подорожника большого (<i>Plantago major</i> L.)	0,50
Листья крапивы двудомной (<i>Urtica dioica</i> L.)	0,69
Цветки липы сердцевидной (<i>Tilia cordata</i> Mill.)	0,64
Цветки пижмы обыкновенной (<i>Tanacetum vulgare</i> L.)	0,37
Корни одуванчика лекарственного (<i>Taraxacum officinale</i> F. H. Wigg)	0,90
Корни лопуха обыкновенного (<i>Arctium lappa</i> L.)	0,90

На основании анализа КН тория-232 изученными видами ЛРС (табл. 3) установлено, что все исследованные виды растений демонстрируют низкую аккумуляционную способность в отношении данного радионуклида. Средние значения коэффициентов накопления варьируют в диапазоне от 0,13 до 0,49, что свидетельствует об эффективных физиологических барьерах, ограничивающих поступление данного радионуклида из почвы в растения.

Таблица 3

**Результаты определений коэффициентов накопления тория-232
в растительных объектах из почв**

№ п/п	Территория отбора образцов	Трава горца птичьего	Трава полыни горькой	Трава тысячелистника обыкновенного	Трава пастушьяк пятлопастного	Листья подорожника большого	Листья крапивы двудомной	Цветки липы сердцевидной	Цветки пижмы обыкновенной	Корни одуванчика лекарственного	Корни лопуха большого
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Воронежский заповедник	0,19	0,20	0,10	0,26	0,39	0,36	0,14	0,21	0,32	0,38
2	Хоперский заповедник	0,19	0,22	0,11	0,26	0,36	0,34	0,13	0,19	0,32	0,35
3	Теллермановский лес	0,04	0,18	0,12	0,21	0,47	0,40	0,17	0,21	0,35	0,48
4	Село Елань-Колено	0,14	0,21	0,07	0,20	0,29	0,47	0,15	0,17	0,30	0,50
5	Село Нижнедевицк	0,24	0,21	0,18	0,24	0,32	0,48	0,21	0,20	0,33	0,47
6	Улица города Острогжск	0,25	0,41	0,12	0,20	0,28	0,44	0,14	0,19	0,31	0,49
7	Улица города Семилуки	0,24	0,37	0,07	0,19	0,26	0,39	0,17	0,21	0,31	0,54
8	Улица города Нововоронеж	0,19	0,12	0,07	0,21	0,36	0,46	0,13	0,20	0,31	0,50
9	Высоковольтные линии электропередач	0,20	0,16	0,11	0,22	0,48	0,51	0,15	0,19	0,33	0,54
10	Агробииоценоз Лискинского р-на	0,24	0,18	0,31	0,27	0,49	0,56	0,21	0,23	0,39	0,48
11	Агробииоценоз Ольховатского р-на	0,21	0,29	0,07	0,21	0,29	0,43	0,15	0,12	0,29	0,54
12	Агробииоценоз Подгоренского р-на	0,07	0,26	0,09	0,23	0,33	0,41	0,16	0,12	0,31	0,52
13	Агробииоценоз Петропавловского р-на	0,14	0,23	0,09	0,20	0,39	0,43	0,20	0,20	0,33	0,53
14	Агробииоценоз Грибановского р-на	0,14	0,24	0,09	0,20	0,44	0,41	0,14	0,18	0,37	0,41
15	Агробииоценоз Хохольского р-на	0,19	0,15	0,07	0,20	0,40	0,42	0,15	0,19	0,37	0,56
16	Агробииоценоз Новохоперского р-на	0,10	0,18	0,09	0,17	0,41	0,45	0,15	0,18	0,33	0,43
17	Агробииоценоз Репьевского р-на	0,10	0,22	0,16	0,21	0,53	0,42	0,16	0,23	0,36	0,42
18	Агробииоценоз Воробьевского р-на	0,17	0,27	0,19	0,19	0,54	0,49	0,16	0,19	0,37	0,54
19	Агробииоценоз Панинского р-на	0,15	0,15	0,13	0,15	0,26	0,38	0,10	0,13	0,27	0,34
20	Агробииоценоз Верхнехавского р-на	0,13	0,11	0,07	0,13	0,37	0,34	0,09	0,12	0,29	0,42

Продолжение табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
21	Агробιοοеноз Эртильского р-на	0,22	0,20	0,15	0,15	0,34	0,49	0,16	0,15	0,40	0,55
22	Агробιοοеноз Россошанского р-на	0,21	0,18	0,10	0,16	0,38	0,43	0,14	0,13	0,37	0,44
23	Вблизи ОАО «Минудобрения»	0,19	0,19	0,10	0,20	0,33	0,45	0,18	0,13	0,42	0,52
24	Вблизи ООО «Бормаш»	0,16	0,16	0,16	0,23	0,49	0,44	0,14	0,15	0,38	0,53
25	Улица города Борисоглебск	0,14	0,29	0,14	0,20	0,39	0,50	0,12	0,18	0,41	0,52
26	Улица города Калач	0,14	0,27	0,08	0,21	0,31	0,38	0,10	0,16	0,33	0,50
27	Вблизи ТЭЦ-1 «ВОГРЭС»	0,26	0,30	0,06	0,19	0,38	0,37	0,13	0,14	0,49	0,60
28	Вблизи ОАО «Воронежсинтезкаучук»	0,19	0,23	0,16	0,24	0,37	0,36	0,14	0,14	0,51	0,59
29	На удалении 0–100 м от низовья Воронежского водохранилища	0,19	0,25	0,18	0,19	0,36	0,39	0,16	0,15	0,46	0,46
30	Вблизи международного аэропорта	0,22	0,30	0,12	0,15	0,46	0,40	0,13	0,15	0,46	0,57
31	Улица города Воронеж	0,19	0,21	0,16	0,27	0,24	0,40	0,14	0,16	0,45	0,58
32	Автоматгистраль М4 «Дон» в Рамонском р-не	0,14	0,35	0,20	0,18	0,32	0,32	0,17	0,11	0,37	0,47
33	Автоматгистраль А144	0,17	0,26	0,19	0,19	0,33	0,31	0,13	0,14	0,33	0,41
34	Автоматгистраль М4 «Дон» в Павловском р-не	0,13	0,29	0,22	0,19	0,34	0,40	0,15	0,19	0,38	0,49
35	Дорога обычного типа	0,13	0,18	0,19	0,16	0,25	0,37	0,12	0,16	0,36	0,49
36	Железнодорожные пути	0,16	0,17	0,20	0,20	0,33	0,44	0,12	0,18	0,44	0,51
Среднее для Воронежской области		0,17	0,23	0,13	0,20	0,37	0,42	0,15	0,17	0,37	0,49

Большое значение для снижения биодоступности радиоизотопа могут иметь уникальные почвенные условия Воронежской области, более 80 % территории которой покрыты черноземами с рекордным содержанием гумуса (6–15 %), создают естественный геохимический барьер для миграции тория-232. Высокая концентрация гуминовых кислот, обладающих большим количеством активных карбоксильных и фенольных групп, обеспечивает прочное связывание радионуклида в устойчивые комплексы, снижая его биодоступность для корневых систем растений. Это значительно минимизирует риски его поступления в продовольственное сырье и лекарственные травы, заготовленные в регионе. Таким образом, черноземы выступают в роли природного буфера, обеспечивая экологическую безопасность агропродукции и снижая потенциальную радиационную нагрузку на население, несмотря на повсеместное присутствие данного долгоживущего радионуклида в окружающей среде [2, 13, 14].

По величине коэффициента накопления исследованные виды образуют следующий ряд в порядке возрастания: трава тысячелистника обыкновенного (0,13) → цветки липы сердцевидной (0,15) → цветки пижмы обыкновенной (0,17) → трава пустырника пятилопастного (0,20) → трава полыни горькой (0,23) → листья подорожника большого (0,37) → корни одуванчика лекарственного (0,37) → листья крапивы двудомной (0,42) → корни лопуха обыкновенного (0,49).

Расчет КН подтвердил четкую органную дифференциацию в аккумуляции тория-232. Наибольшая аккумуляция характерна для корневых систем (лопух обыкновенный – 0,49; одуванчик лекарственный – 0,37) и листьев (крапива двудомная – 0,42; подорожник большой – 0,37). Наименьшая аккумуляция отмечена в цветках (липа сердцевидная – 0,15; пижма обыкновенная – 0,17) и травах (тысячелистник обыкновенный – 0,13).

Полученные данные свидетельствуют о том, что несмотря на высокое содержание тория-232 в почвах Воронежской области, все изученные виды ЛРС обладают низкой аккумуляционной способностью в отношении данного радионуклида, что снижает потенциальные риски при использовании указанного сырья в медицинских целях.

Выводы

Полученные результаты определения удельной активности тория-232 в почве и ЛРС отличаются относительной равномерностью распределения по изучаемым районам заготовки. Несколько более высокими показателями удельной активности тория-232 выделяются образцы, заготовленные в зоне выпадения осадков от выбросов ТЭЦ, которая до начала 2000-х годов функционировала на каменном угле, содержащем в качестве естественной примеси различные изотопы, поступающие вместе с золой и недожогом через выбросы в окружающую среду. Анализ корреляционной зависимости удельной активности тория-232 в почве и ЛРС показал наличие сильной и весьма заметной взаимосвязи между данными числовыми показателями, что подтверждает преимущественное загрязнение ЛРС радионуклидами через почву. При увеличении удельной активности тория-232 в почве возрастала их удельная активность в ЛРС. Аккумуляция тория-232 всеми изученными видами ЛРС оценивается как невысокая. При этом в корнях и листьях торий-232 аккумулировался с большей эффективностью (КН от 0,37 до 0,49). Составлен ряд убывания средних значений удельной активности тория-232: корни лопуха большого → листья крапивы двудомной → корни одуванчика лекарственного → листья подорожника большого → трава полыни горькой → трава пустырника пятилопастного → трава горца птичьего → цветки пижмы обыкновенной → цветки липы сердцевидной → трава тысячелистника обыкновенного. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета региональных особенностей и видовой специфики при оценке содержания природных радионуклидов в ЛРС, особенно в районах с промышленной нагрузкой.

Список литературы

1. Балыкин Д. Н., Пузанов А. В., Балыкин С. Н., Салтыков А. В., Рождественская Т. А. Радионуклиды ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs в почвах и донных отложениях территории космодрома «Восточный» (Амурская область) // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2019. № 3 (54). С. 98–104.
2. Бекман И. Н. Радиоэкология и экологическая радиохимия. М.: Издатель Мархотин П. Ю., 2018. 400 с.
3. Вершинин И. М., Манахов Д. В., Липатов Д. Н., Агапкина Г. И., Щеглов А. И. Формы нахождения радия-226, урана-238 и тория-232 в дерново-подзолисто-глеевой почве и в орштейнах ее элювиального горизонта // Почвоведение. 2025. № 7. С. 913–931. DOI: 10.31857/S0032180X25070031.
4. Государственная фармакопея Российской Федерации. Издание XV. [Электронный ресурс]. URL: <https://pharmacopoeia.regmed.ru/pharmacopoeia/izdanie-15> (Дата обращения: 17.09.2025).
5. Дьякова Н. А. Изучение накопления радионуклидов лекарственным растительным сырьем Центрального Черноземья // Вестник Смоленской Государственной Медицинской Академии. 2022. Т. 21, №3. С. 171–176. DOI: 10.37903/vsgma.2022.3.22
6. Дьякова Н.А., Сливкин А.И., Гапонов С.П. Контроль радиационной безопасности и качества лекарственного растительного сырья Воронежской области на примере корней лопуха обыкновенного // Разработка и регистрация лекарственных средств. 2019. Т. 8. № 1. С. 73–77. DOI: 10.33380/2305-2066-2019-8-1-73-77.
7. Дьякова Н. А., Сливкин А. И., Гапонов С. П. Оценка содержания радионуклидов в лекарственном растительном сырье Центрального Черноземья и их влияния на накопление биологически активных веществ // Химико-фармацевтический журнал. 2020. Т. 54, № 6. С. 68–72. DOI: 10.30906/0023-1134-2020-54-6-49-53.
8. Дьякова Н. А., Сливкин А. И., Тринева О. В. От оценки радионуклидного загрязнения лекарственного растительного сырья Воронежской области к вопросам нормирования природных радионуклидов // Химико-фармацевтический журнал. 2022. Т. 56, № 8. С. 47–51. DOI: 10.30906/0023-1134-2022-56-8-47-51.

9. Егорова И. А., Кислицина Ю. В., Пузанов А. В. Радионуклиды в почвах северо-западного алтая // География и природные ресурсы. 2012. № 3. С. 31–35.
10. Корсун Е. В., Саевич М. А., Авхукова М. А. Радионуклиды в лекарственных растениях и грибах (обзор) // Практическая фитотерапия. 2011. № 3-4. С. 42–52.
11. Куропан С. А., Мамчик Н. П., Клепиков О. В. Медико-экологический атлас Воронежской области: монография. Воронеж: ГУП ВО «Воронежская областная типография – издательство им. Е. А. Болховитинова», 2010. 167 с.
12. Методические рекомендации МР 2.6.1/2.3.7.0216-20 «Радиохимическое определение удельной активности природных РН в пробах пищевой продукции, почвы, других объектов окружающей среды и биопробах». Москва, 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74835247/> (Дата обращения: 17.09.2025).
13. Мингареева Е. В., Анапин Б. Ф., Сухачева Е. Ю. Радионуклиды ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs в почвах на звонцовых и ленточных глинах // Биосфера. 2018. Т. 10, № 3. С. 207–217.
14. Рожко Т. В., Колесник О. В., Сачкова А. С., Романова Н. Ю., Стом Д. И., Кудряшева Н. С. Воздействие тория-232 на биOLUMИнесцентную ферментативную систему и радиопротекторная активность гуминовых веществ // Биофизика. 2024. Т. 69. № 3. С. 444–454. DOI: 10.31857/S0006302924030034.
15. Санаров Е. М., Баландович Б. А., Кузьмин Э. В., Корниенко М. Г. Экологическая оценка радионуклидного загрязнения лекарственного сырья в Алтайском крае и проблема регламентирования // Химия растительного сырья. 1998. № 1. С. 19–24.
16. Терешкина О. И., Рудакова И. П., Самылина И. А. Оценка риска радионуклидного загрязнения лекарственного растительного сырья // Фармация. 2011. № 7. С. 3–6.
17. Управление Роспотребнадзора по Воронежской области. [Электронный ресурс]. URL: <http://36.rosпотребнадзор.ru/key-areas/sanitary/14645> (дата обращения: 26.11.2025).
18. Dyakova N., Gaponov S., Slivkin Al., Chupandina El. Accumulation of artificial and natural radionuclides in medicinal plant material in the Central Black Soil Region of Russia // Advances in Biological Sciences Research. 2019. Vol. 7. P. 94–96. DOI:10.2991/isils-19.2019.22.
19. Dyakova N. A., Lyubashevsky D. E., Chupandina E. E., Pisklyukov A. A. Study of Natural and Artificial Radionuclides Accumulation by Medicinal Plant Raw Materials on the Example of Nettle Leaves of *Urtica dioica* // Biological Trace Element Research, 2025, No 7. DOI: 10.1007/s12011-025-04702-1
20. Hampton C. R., Broadley M. R., White P. J. Short review: The mechanisms of radiocaesium uptake by Arabidopsis roots // Nukleonika 2005. Vol. 50. S3–S8.

References

1. Balykin, D. N., Puzanov, A. V., Balykin, S. N., Saltykov, A. V., & Rozhdestvenskaya, T. A. (2019). Radionuklidy ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs v pochvakh i donnykh otlozheniyakh territorii kosmodroma «Vostochnyy» (Amurskaya oblast) [Radionuclides ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs in soils and bottom sediments of the Vostochny cosmodrome territory (Amur region)]. *Izvestiya Altayskogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 3(54), 98–104. (In Russian).
2. Bekman, I. N. (2018). *Radioekologiya i ekologicheskaya radiokhimiya* [Radioecology and environmental radiochemistry]. Izdatel Markhotin P. Yu., 400 p. (In Russian).
3. Vershinin, I. M., Manakhov, D. V., Lipatov, D. N., Agapkina, G. I., & Shcheglov, A. I. (2025). Formy nakhozhdeniya radiya-226, urana-238 i toriya-232 v dornovo-podzolisto-gleevoy pochve i v ortshteynakh ee elyuvialnogo gorizonta [Forms of radium-226, uranium-238 and thorium-232 in soddy-podzolic-gley soil and in ortsteins of its eluvial horizon]. *Pochvovedenie*, 7, 913–931. <https://doi.org/10.31857/S0032180X25070031>. (In Russian).
4. Gosudarstvennaya farmakopeya Rossiyskoy Federatsii [State Pharmacopoeia of the Russian Federation]. (n.d.). (15th ed.). Retrieved from: <https://pharmacopoeia.regmed.ru/pharmacopoeia/izdanie-15> (date of application: 17.09.2025). (In Russian).

5. Dyakova, N. A. (2022). Izuchenie nakopleniya radionuklidov lekarstvennym rastitelnym syrem Tsentralnogo Chernozemya [Study of radionuclide accumulation by medicinal plant raw materials of the Central Black Earth Region]. *Vestnik Smolenskoy Gosudarstvennoy Meditsinskoy Akademii*, 21(3), 171–176. <https://doi.org/10.37903/vsgma.2022.3.22>. (In Russian).
6. Dyakova, N. A., Slivkin, A. I., & Gaponov, S. P. (2019). Kontrol radiatsionnoy bezopasnosti i kachestva lekarstvennogo rastitelnogo syrya Voronezhskoy oblasti na primere korney lopukha obyknovennogo [Control of radiation safety and quality of medicinal plant raw materials in the Voronezh region on the example of burdock roots]. *Razrabotka i registratsiya lekarstvennykh sredstv*, 8(1), 73–77. <https://doi.org/10.33380/2305-2066-2019-8-1-73-77>. (In Russian).
7. Dyakova, N. A., Slivkin, A. I., & Gaponov, S. P. (2020). Otsenka sodержaniya radionuklidov v lekarstvennom rastitel'nom syre Tsentralnogo Chernozemya i ikh vliyaniya na nakoplenie biologicheskii aktivnykh veshchestv [Assessment of radionuclide content in medicinal plant raw materials of the Central Black Earth Region and their effect on the accumulation of biologically active substances]. *Khimiko-farmatsevticheskii zhurnal*, 54(6), 68–72. <https://doi.org/10.30906/0023-1134-2020-54-6-49-53>. (In Russian).
8. Dyakova, N. A., Slivkin, A. I., & Trineeva, O. V. (2022). Ot otsenki radionuklidnogo zagryazneniya lekarstvennogo rastitelnogo syrya Voronezhskoy oblasti k voprosam normirovaniya prirodnykh radionuklidov [From assessing radionuclide contamination of medicinal plant raw materials in the Voronezh region to the issues of natural radionuclide regulation]. *Khimiko-farmatsevticheskii zhurnal*, 56(8), 47–51. <https://doi.org/10.30906/0023-1134-2022-56-8-47-51>. (In Russian).
9. Egorova, I. A., Kislitsina, Yu. V., & Puzanov, A. V. (2012). Radionuklidy v pochvakh severo-zapadnogo Altaya [Radionuclides in soils of the northwestern Altai]. *Geografiya i prirodnye resursy*, (3), 31–35. (In Russian).
10. Korsun, E. V., Saevich, M. A., & Avkhukova, M. A. (2011). Radionuklidy v lekarstvennykh rasteniyakh i gribakh (obzor) [Radionuclides in medicinal plants and mushrooms (review)]. *Prakticheskaya fitoterapiya*, (3-4), 42–52. (In Russian).
11. Kurolap, S. A., Mamchik, N. P., & Klepikov, O. V. (2010). *Mediko-ekologicheskii atlas Voronezhskoy oblasti* [Medical-ecological atlas of the Voronezh region]. GUP VO «Voronezhskaya oblastnaya tipografiya – izdatel'stvo im. E. A. Bolkhovitinova», 167 p. (In Russian).
12. Metodicheskie rekomendatsii MR 2.6.1/2.3.7.0216-20 «Radiokhimicheskoe opredelenie udel'noy aktivnosti prirodnykh RN v probakh pishchevoy produktsii, pochvy, drugikh obektov okruzhayushchey sredy i bioprobakh» [Guidelines MR 2.6.1/2.3.7.0216-20 «Radiochemical determination of specific activity of natural radionuclides in samples of food products, soil, other environmental objects and biosamples»]. (2020). Retrieved from: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74835247/> (date of application: 17.09.2025). (In Russian).
13. Mingareeva, E. V., Aparin, B. F., & Sukhacheva, E. Yu. (2018). Radionuklidy ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs v pochvakh na zvonstovykh i lentochnykh glinakh [Radionuclides ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs in soils on zvonstovye and banded clays]. *Biosfera*, 10(3), 207–217. (In Russian).
14. Rozhko, T. V., Kolesnik, O. V., Sachkova, A. S., Romanova, N. Yu., Stom, D. I., & Kudryasheva, N. S. (2024). Vozdeystvie toriya-232 na bioluminestsentnuyu fermentativnuyu sistemu i radioprotekornaya aktivnost guminovykh veshchestv [Effect of thorium-232 on the bioluminescent enzymatic system and radioprotective activity of humic substances]. *Biofizika*, 69(3), 444–454. <https://doi.org/10.31857/S0006302924030034>. (In Russian).
15. Sanarov, E. M., Balandovich, B. A., Kuzmin, E. V., & Kornienko, M. G. (1998). Ekologicheskaya otsenka radionuklidnogo zagryazneniya lekarstvennogo syrya v Altayskom krae i problema reglamentirovaniya [Ecological assessment of radionuclide contamination of medicinal raw materials in the Altai Territory and the problem of regulation]. *Khimiya rastitelnogo syrya*, 1, 19–24. (In Russian).

16. Tereshkina, O. I., Rudakova, I. P., & Samylina, I. A. (2011). Otsenka riska radionuklidnogo zagryazneniya lekarstvennogo rastitelnogo syrya [Risk assessment of radionuclide contamination of medicinal plant raw materials]. *Farmatsiya*, 7, 3–6. (In Russian).
17. Upravlenie Rospotrebnadzora po Voronezhskoy oblasti [Office of Rospotrebnadzor for the Voronezh Region]. (n.d.). Retrieved from: <http://36.rospotrebnadzor.ru/key-areas/sanitary/14645> (date of application: 26.11.2026). (In Russian).
18. Dyakova, N., Gaponov, S., Slivkin, Al., & Chupandina, El. (2019). Accumulation of artificial and natural radionuclides in medicinal plant material in the Central Black Soil Region of Russia. *Advances in Biological Sciences Research*, 7, 94–96. <https://doi.org/10.2991/isils-19.2019.22> (In English).
19. Dyakova, N. A., Lyubashevsky, D. E., Chupandina, E. E., & Pisklyukov, A. A. (2025). Study of natural and artificial radionuclides accumulation by medicinal plant raw materials on the example of nettle leaves of *Urtica dioica*. *Biological Trace Element Research*, 7. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s12011-025-04702-1>. (In English).
20. Hampton, C. R., Broadley, M. R., & White, P. J. (2005). Short review: The mechanisms of radiocaesium uptake by *Arabidopsis* roots. *Nukleonika*, 50, S3–S8. (In English).

Поступила в редакцию 02.12.2025 г.

Dyakova N. A. Accumulation of thorium-232 in medicinal plant raw materials of the Voronezh region. – The article presents the results of the study of accumulations in medicinal plants of thorium-232 on the example of the Voronezh region. With the greatest efficiency, thorium-232 accumulates in roots and leaves. The specific activity of thorium-232 in soil and plants is characterized by relative uniformity of distribution in the areas of the workpiece and a noticeable relationship between these indicators, which confirms the predominant transposable contamination of the flora with thorium-232.

Keywords: Voronezh region, thorium-232, *Polygonum aviculare* L., *Artemisia absinthium* L., *Achillea millefolium* L., *Leonurus quinquelobatus* Gilib., *Plantago major* L., *Urtica dioica* L., *Tilia cordata* Mill., *Tanacetum vulgare* L., *Taraxacum officinale* F. H. Wigg, *Arctium lappa* L.

Дьякова Нина Алексеевна

доктор фармацевтических наук, доцент,
доцент кафедры фармацевтической технологии
фармацевтического факультета
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
университет», г. Воронеж, РФ.
E-mail: ninotchka_v89@mail.ru
ORCID: 0000-0002-0766-3881
SPIN-код: 3477-0510
AuthorID: 684554

Dyakova Nina Alekseevna

Doctor of Pharmaceutical Sciences, Docent,
Associate Professor of Department of Pharmaceutical
Technology, Faculty of Pharmacy,
Voronezh State University,
Voronezh, Russian Federation.

© Д. А. Усик

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ПЛАСТИЧНОСТЬ СТЕБЛЯ ТРАВЯНИСТЫХ РАСТЕНИЙ ПРИ ГРАДИЕНТЕ ОСВЕЩЕННОСТИ

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Россия, 450076, Приволжский федеральный округ, Республика Башкортостан, г. Уфа,
ул. Заки Валиди, дом 32

Усик Д. А. Структурно-функциональная пластичность стебля травянистых растений при градиенте освещенности. – Стебель обеспечивает механическую опору, транспорт воды и ассимилятов, а также участвует в регуляции архитектоники побега и приспособительной пластичности растения. В работе экспериментально проверено, как изменение интенсивности освещения влияет на морфометрию стебля и показатель лигнификации у *Brassica rapa* L. var. *rapa*, rapid-cycling line Wisconsin Fast Plants – быстрорастущей модельной линии травянистого двудольного растения, удобной для воспроизводимых 28-суточных лабораторных опытов.

Проведен однофакторный лабораторный опыт ($n = 90$) с тремя уровнями фотосинтетически активного фотонного потока PPFD: 60, 180 и 420 мкмоль·м⁻²·с⁻¹. Во всех группах поддерживали одинаковые температуру, влажность, фотопериод, режим полива и минерального питания; спектральный состав LED-панелей был стандартизирован и описан в разделе «Материалы и методы». Измерения выполнены на 28-е сутки выращивания; различия проверены дисперсионным анализом с предварительной оценкой нормальности остатков и гомогенности дисперсий. Показано, что при повышении освещенности высота стебля снижалась, тогда как диаметр и доля лигнина возрастали (ANOVA: $F(2,87) = 79,44; 44,11; 33,96; p < 0,001$). Пост-хок сравнения подтвердили градиентные различия между всеми парами уровней света. Дополнительный анализ выявил отрицательную связь высоты с диаметром и лигнификацией и положительную связь диаметра с лигнином. Результаты интерпретируются как адаптивный сдвиг от стратегии вытягивания к стратегии укрепления побега.

Ключевые слова: стебель, первичное и вторичное строение, ксилема, флоэма, камбий, лигнин, фотоморфогенез, механическая устойчивость, пластичность.

Введение

Стебель (*caulis*) – центральный осевой орган побега, который объединяет функции опоры, транспорта и интеграции роста. В отличие от листа, специализирующегося на фотосинтезе и газообмене, стебель выполняет «инфраструктурную» роль: формирует каркас побега, связывает фотосинтетические и корневые органы, обеспечивает распределение потоков воды и органических веществ и поддерживает размещение листьев и соцветий в пространстве.

Функции стебля удобно рассматривать на трех уровнях: (1) геометрия органа (высота, число и длина междоузлий, диаметр), (2) тканевая организация (механические ткани, проводящая система, паренхима), (3) микроструктура клеточных стенок (соотношение целлюлозы, гемицеллюлоз и лигнина). Экологический фактор может изменять параметры всех уровней, формируя фенотипическую пластичность и обеспечивая адаптацию [15].

Морфологически стебель состоит из узлов и междоузлий. Узлы включают листовые следы и точки ветвления, поэтому часто отличаются повышенной «инженерной сложностью»: здесь сочетаются проводящие пути, механические элементы и меристематические структуры (почки). Междоузлия, напротив, являются участками, где особенно выражены процессы удлинения и утолщения и где наиболее удобно проводить сравнимые морфометрические измерения [7].

Первичное строение стебля формируется за счет деятельности апикальной меристемы. Снаружи располагается эпидерма, часто покрытая кутикулой и выполняющая барьерную функцию. Под эпидермой может располагаться колленхима – механическая ткань из живых клеток с неравномерно утолщенными первичными стенками, обеспечивающая гибкую опору

молодым участкам побега. Глубже располагается паренхима первичной коры, выполняющая запасающие и метаболические функции [5].

Центральный цилиндр включает проводящие пучки. У большинства травянистых двудольных пучки расположены кольцом и являются коллатеральными: ксилема обращена к центру, флоэма – к периферии. Между ними может сохраняться камбий – латеральная меристема, обеспечивающая вторичное утолщение. Вторичное утолщение сопровождается образованием вторичной ксилемы (древесины) и вторичной флоэмы (луба), что увеличивает диаметр стебля, меняет его механические свойства и проводящую способность [7].

У однодольных растений часто наблюдается рассеянное расположение пучков и отсутствие типичного камбия; поэтому их утолщение происходит иными путями (например, за счет первичного утолщения или особых меристем), а реакция на факторы среды может отличаться. В данной работе акцент сделан на модельном двудольном травянистом типе, где связи между освещенностью, диаметром и лигнификацией проявляются наиболее наглядно.

Лигнин – фенольный полимер вторичной клеточной стенки, который повышает жесткость, снижает водопроницаемость и стабилизирует архитектуру стенки. Лигнификация критична для ксилемы: сосудистые элементы и трахеиды должны сохранять просвет при отрицательном давлении водного столба, не схлопываясь и не деформируясь. Лигнифицированные волокна склеренхимы усиливают опорную функцию, распределяя нагрузки вдоль оси стебля [8, 11].

С биомеханической точки зрения устойчивость стебля определяется не только высотой и диаметром, но и физико-механическими свойствами тканей. В классической трактовке К. Дж. Никласа сопротивление изгибу описывается через флексурную жесткость EI , где E отражает материал – модуль упругости тканей, а I отражает геометрию поперечного сечения. Поэтому один и тот же прирост диаметра может иметь разный функциональный эффект в зависимости от плотности, степени лигнификации, пространственного расположения проводящих пучков и механических волокон [6, 13].

Свет выступает одновременно энергетическим ресурсом и информационным сигналом. Изменение интенсивности и спектра освещения воспринимается фоточувствительными системами и транслируется в ростовые реакции через гормональную регуляцию и экспрессию генов клеточной стенки. При недостатке света активируется программа «выхода к свету», часто включающая ускорение роста междоузлий за счет растяжения клеток. Это повышает высоту побега, но может снижать долю структурных «инвестиций» в стенку [6, 9].

При достаточном световом обеспечении потребность в компенсаторном вытягивании уменьшается, а избыточные ассимиляты могут направляться на утолщение, дифференцировку проводящей системы и отложение лигнина. В результате формируется компактный, механически более устойчивый побег [10, 14].

Цель исследования – количественно оценить, как градиент интенсивности LED-освещения влияет на морфометрию и лигнификацию стебля модельного быстрорастущего травянистого двудольного растения, а также интерпретировать полученные эффекты с учетом фотоморфогенеза, вторичного роста и биомеханики растительных стеблей.

Гипотезы исследования: Н1 – повышение интенсивности освещения приведет к снижению высоты стебля; Н2 – диаметр стебля возрастет; Н3 – доля лигнина в абсолютно сухом веществе стебля увеличится; Н4 – высота будет отрицательно связана с признаками структурного укрепления, а диаметр – положительно связан с лигнификацией.

Материал и методы исследования

Объектом исследования служили растения *Brassica rapa* L. var. *rapa*, rapid-cycling line Wisconsin Fast Plants. В тексте далее используется сокращенное обозначение *B. rapa* WFP. Материал выбран по трем причинам. Во-первых, это травянистое двудольное растение с коротким жизненным циклом, позволяющее получить выраженный надземный побег и провести измерения в пределах 28-суточного лабораторного опыта. Во-вторых, линия широко используется как учебно-исследовательская модель, поскольку дает синхронные

всходы, хорошо переносит выращивание в малом объеме субстрата и демонстрирует воспроизводимую реакцию на условия освещения. В-третьих, у данного объекта выражена фенотипическая пластичность побега: при дефиците света усиливается вытягивание, а при достаточном световом ресурсе формируется более компактный и механически укрепленный стебель.

Семена одной партии высевали в торфяной субстрат pH 6,0–6,5. После появления всходов растения выращивали до стадии развернутых семядолей и первого настоящего листа, затем рандомизировали по световым режимам. На момент начала экспериментальной экспозиции растения находились в ранней вегетативной стадии; к 28-м суткам у большинства растений был сформирован главный осевой побег, пригодный для стандартизированных морфометрических и химико-анатомических измерений.

Исследование выполнено по однофакторному межгрупповому дизайну. Независимая переменная – интенсивность освещенности в трех уровнях: 60, 180 и 420 мкмоль·м⁻²·с⁻¹. Зависимые переменные: высота стебля, диаметр стебля и массовая доля лигнина в сухом веществе. Объем выборки составил 90 растений (по 30 на уровень). Рандомизацию обеспечивали распределением контейнеров по зонам освещения и ежедневной перестановкой внутри зоны, что снижало систематические ошибки, связанные с локальными различиями светового поля.

Контейнеры объемом 0,25 л заполняли торфяным субстратом (pH 6,0–6,5). Температуру поддерживали на уровне 23 ± 1 °C днем и 20 ± 1 °C ночью, влажность 55–65 %, фотопериод 16/8. Полив осуществляли одинаково: 35 мл через день. Чтобы исключить дефицит питания как конкурентный фактор, раз в неделю вносили стандартный раствор минеральных солей (½ концентрации). Плотность размещения контейнеров во всех зонах была одинаковой, чтобы избежать эффекта взаимного затенения.

Экспериментальная экспозиция продолжалась 28 суток от посева до финального измерения. Отдельного периода темновой адаптации перед морфометрией не проводили, поскольку целью было оценить интегральный эффект длительного светового режима на формирование побега. Все измерения выполняли в один и тот же интервал дня – через 3–5 ч после включения освещения, что снижало влияние суточных колебаний тургора.

Освещение создавали LED-панелями полного спектра с доминированием красной и синей областей. Фотосинтетически активный фотонный поток (PPFD) измеряли квантовым датчиком на уровне верхушек растений в пяти точках каждой зоны (центр и четыре угла) с последующим усреднением (табл. 1). Отклонение фактического PPFD от целевых значений не превышало ± 7 %. Спектральный состав источников контролировали по паспортным данным панели и выборочной проверке портативным спектрометром; поскольку во всех группах применяли один тип светильников, менялась преимущественно интенсивность, а не спектральное соотношение.

Таблица 1

Стандартизированные параметры световых режимов в эксперименте

Параметр	Низкая освещенность	Средняя освещенность	Высокая освещенность
PPFD, мкмоль·м ⁻² ·с ⁻¹	60 ± 4	180 ± 10	420 ± 25
Фотопериод	16 ч свет / 8 ч темнота	16 ч свет / 8 ч темнота	16 ч свет / 8 ч темнота
Синий свет, 400–500 нм	18 % общего PPFD	18 % общего PPFD	18 % общего PPFD
Зелено-желтая область, 500–600 нм	16 % общего PPFD	16 % общего PPFD	16 % общего PPFD
Красный свет, 600–700 нм	62 % общего PPFD	62 % общего PPFD	62 % общего PPFD
Дальний красный, 700–750 нм	4 % общего PPFD	4 % общего PPFD	4 % общего PPFD
Отношение R:FR	15,5:1	15,5:1	15,5:1

Таким образом, фактор «освещенность» был задан через PPFD при сохранении сопоставимого спектра. Это принципиально важно для интерпретации результатов, поскольку синий, красный и дальний красный свет по-разному вовлечены в фотоморфогенез, регуляцию вытягивания и формирование компактного фенотипа.

Высоту стебля измеряли на 28-е сутки от поверхности субстрата до верхней точки главного осевого побега, исключая листовые пластинки и цветочные элементы. Измерение выполняли металлической линейкой с ценой деления 1 мм; результат фиксировали в сантиметрах с точностью до 0,1 см. Если побег был слегка изогнут, измеряли длину проекции вдоль оси побега без растягивания ткани (табл. 2).

Таблица 2

Проверка предпосылок дисперсионного анализа

Показатель	Шапиро–Уилк W	p	Левене F	p	Вывод
Высота стебля	0,982	0,27	1,42	0,247	предпосылки ANOVA не нарушены
Диаметр стебля	0,976	0,12	2,03	0,137	предпосылки ANOVA не нарушены
Лигнин	0,971	0,08	1,88	0,158	предпосылки ANOVA не нарушены

Диаметр определяли электронным штангенциркулем с ценой деления 0,01 мм в средней трети главного побега, на уровне 50 % его высоты, избегая узлов и участков прикрепления листьев. Для каждого растения выполняли два измерения в перпендикулярных направлениях; в анализ включали среднее значение. Такой подход снижает ошибку, связанную с овальностью поперечного сечения и локальным утолщением в зоне узлов.

Для стандартизации точки измерения диаметр фиксировали на расстоянии 50 % от длины стебля (по линейке), избегая узлов, где утолщение может быть локально повышенным из-за ветвления проводящих пучков.

Массовую долю лигнина определяли кислотно-детергентным методом по схеме acid detergent lignin (ADL) в модификации Van Soest. Предварительно высушенные образцы стеблей измельчали, доводили до постоянной массы при 105 °C и последовательно обрабатывали кислотно-детергентным раствором для получения кислотно-детергентного волокна, затем 72 % H₂SO₄ для удаления целлюлозной фракции. Остаток после промывки, высушивания и прокалывания использовали для расчета ADL. Результат выражали как процент лигнина от абсолютно сухого вещества стебля (% мас./мас.).

Флороглюцин-HCl использовали только как качественный гистохимический тест для подтверждения локализации лигнифицированных стенок, а не как количественную меру лигнина. Поперечные срезы средней трети побега окрашивали 1–2 мин, анализировали при увеличении $\times 40$ – $\times 100$ и описывали интенсивность окраски ксилемы, выраженность склеренхимных волокон и относительную толщину стенок проводящих элементов.

Статистический анализ включал расчет описательных статистик (M, SD), однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA), величину эффекта η^2 , попарные сравнения t-критерием Уэлча с поправкой Бонферрони и корреляции Пирсона. Перед ANOVA проверяли предпосылки: нормальность остатков по тесту Шапиро–Уилка и гомогенность дисперсий по тесту Левене. При $p > 0,05$ предпосылку считали статистически не отвергнутой. Выбросы контролировали по правилу 1,5 IQR; исключений на этом основании не потребовалось.

Поправка Бонферрони применялась с учетом трех попарных сравнений для каждого зависимого показателя: низкая–средняя, низкая–высокая и средняя–высокая освещенность. Уровень статистической значимости принят равным $\alpha = 0,05$.

Результаты и обсуждение

Описательные статистики по трем режимам освещенности представлены в таблице 1. При низкой освещенности растения демонстрировали максимальную высоту стебля, что соответствует фенотипу вытягивания. При высокой освещенности стебель был короче, но существенно толще. Массовая доля лигнина увеличивалась от низкой к высокой освещенности, что указывает на усиление процессов формирования вторичных стенок и/или рост доли лигнифицированных тканей.

Тренды отражают перестройку функциональной организации стебля: дефицит света стимулирует рост междоузлий, тогда как высокий свет поддерживает утолщение и укрепление тканей (табл. 3).

Таблица 3

Описательные статистики морфометрии стебля и показателя лигнификации по группам освещенности

Показатель	Освещенность ($M \pm SD$, $n = 30$)			Тренд
	Низкая	Средняя	Высокая	
Высота стебля, см	$18,32 \pm 1,87$	$14,93 \pm 2,32$	$11,80 \pm 1,79$	↓
Диаметр стебля, мм	$2,18 \pm 0,20$	$2,58 \pm 0,30$	$2,96 \pm 0,42$	↑
Лигнин, % (мас./мас.)	$9,85 \pm 1,59$	$12,07 \pm 1,24$	$13,30 \pm 2,01$	↑

Все три зависимые переменные демонстрируют значимое влияние освещенности. Высокие η^2 указывают, что фактор света объясняет существенную долю общей вариативности параметров стебля. С учетом результатов тестов Шапиро–Уилка и Левене применение ANOVA в данной выборке является статистически обоснованным (табл. 4).

Таблица 4

Результаты однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) влияния освещенности на параметры стебля

Показатель	F	df1	df2	p	η^2
Высота стебля	79,44	2	87	< 0,001	0,65
Диаметр стебля	44,11	2	87	< 0,001	0,50
Лигнин (%)	33,96	2	87	< 0,001	0,44

Структура связей согласуется с моделью «вытягивание ↔ укрепление» и помогает интерпретировать изменения как системные, а не случайные (табл. 5).

Таблица 5

Корреляции (r Пирсона) между высотой, диаметром стебля и долей лигнина ($n = 90$)

Показатель	Высота	Диаметр	Лигнин
Высота	1,00	−0,58	−0,50
Диаметр	−0,58	1,00	0,45
Лигнин	−0,50	0,45	1,00

Попарные сравнения между уровнями освещенности (табл. 4) показали, что различия сохраняются для каждой пары групп после поправки Бонферрони. Это подтверждает дозозависимую реакцию стебля на интенсивность света, а не эффект «порога».

Поправка Бонферрони является строгой; сохранение значимости после нее поддерживает устойчивость вывода о различиях между уровнями освещенности (табл. 6).

Таблица 6

**Попарные сравнения (t Уэлча) между уровнями освещенности
с поправкой Бонферрони (p_{adj})**

Показатель	Сравнение	t	df	p _{adj}
Высота	Низкая и Средняя	6,25	55,4	< 0,001
	Низкая и Высокая	13,83	57,9	< 0,001
	Средняя и Высокая	5,85	54,5	< 0,001
Диаметр	Низкая и Средняя	-6,13	51,5	< 0,001
	Низкая и Высокая	-9,09	42,1	< 0,001
	Средняя и Высокая	-3,94	52,3	< 0,001
Лигнин	Низкая и Средняя	-6,02	54,8	< 0,001
	Низкая и Высокая	-7,38	55,0	< 0,001
	Средняя и Высокая	-2,87	48,3	0,018

Структура связей согласуется с моделью «вытягивание ↔ укрепление»: высота отрицательно связана с диаметром и лигнификацией, тогда как диаметр положительно связан с долей лигнина. Следовательно, исследованные признаки образуют не случайный набор параметров, а согласованный морфофункциональный комплекс (табл. 7).

Таблица 7

Корреляции Пирсона между высотой, диаметром стебля и долей лигнина (n = 90)

Показатель	Высота	Диаметр	Лигнин
Высота	1,00	-0,58	-0,50
Диаметр	-0,58	1,00	0,45
Лигнин	-0,50	0,45	1,00

Качественные наблюдения по окрашиванию флороглюцин-HCl соответствовали количественным данным: при высокой освещенности окраска лигнифицированных элементов ксилемы была интенсивнее, а механические элементы визуально выражены сильнее. При низкой освещенности окраска была слабее и более локальной. Этот результат не использовался как количественное подтверждение процента лигнина, но служил анатомической верификацией направления изменений.

По всей выборке выявлены корреляции: высота отрицательно связана с диаметром и лигнификацией, а диаметр положительно связан с лигнином. Эти связи отражают функциональный компромисс между ростом в длину и укреплением побега.

Интерпретируя полученные эффекты, важно разделять два разных, но взаимосвязанных процесса: (а) регуляцию роста в длину за счет деления и растяжения клеток междоузлий и (б) «капитальные вложения» в поперечную организацию и вторичную стенку. Первый процесс позволяет быстро менять геометрию побега в ответ на сигнал о дефиците света; второй процесс медленнее и ресурсозатратнее, но обеспечивает долговременную механическую устойчивость и надежность транспорта.

Снижение высоты при высоком свете может быть связано не только с уменьшением растяжения клеток, но и с изменением числа междоузлий и их относительной длины. В прикладных исследованиях эту гипотезу проверяют раздельным измерением длины каждого междоузлия и оценкой «архитектоники» побега. В учебном эксперименте достаточно фиксировать суммарную высоту, но важно помнить, что один и тот же итоговый показатель может иметь разные анатомические механизмы.

Рост диаметра стебля может отражать несколько вкладов: увеличение объема паренхимы, усиление колленхимы в коре, увеличение числа и размера проводящих элементов и/или активность камбия (у двудольных). Чтобы различить эти варианты, проводят морфометрию срезов: измеряют площадь ксилемы, флоэмы, коры, отношение площади

механических тканей к общей площади и число сосудов. Эти измерения можно выполнить даже на простом световом микроскопе с использованием шкалы окуляр-микрометра или цифровых изображений.

Показатель лигнификации, полученный химическим методом, интегрирует вклад разных тканей. Он особенно чувствителен к вкладу вторичной ксилемы и склеренхимных волокон. Однако лигнин может откладываться и в ряде других клеток (например, в стенках некоторых паренхимных элементов при стрессовых воздействиях). Поэтому оптимальная стратегия интерпретации – совмещать химический показатель с анатомическими наблюдениями (окраска флороглюцином, визуальная оценка толщины стенок сосудов, выраженность волокон).

Связь диаметра и лигнина, выявленная в корреляционном анализе, логична функционально: утолщение стебля увеличивает долю тканей с вторичными стенками, а лигнин является маркером этих стенок. Отрицательная связь высоты с лигнификацией также типична: ускорение вытягивания часто сопровождается «экономией» на вторичных стенках, поскольку приоритетом становится рост в длину. В результате формируется более высокий, но менее укрепленный побег.

Результаты демонстрируют, что освещенность одновременно влияет на геометрию стебля и на показатель укрепления стенок. Снижение высоты при росте освещенности является ожидаемым компонентом фотоморфогенеза: при достаточном световом ресурсе растение меньше «нуждается» в ускоренном вытягивании междоузлий. Одновременно рост диаметра и лигнификации указывает на перераспределение ресурсов в пользу опорной и проводящей эффективности [4, 12].

Механистически такой переход можно связать с взаимодействием световых сигналов и гормональной регуляции. При дефиците света активируются реакции, сходные с программой избегания затенения: усиливается рост междоузлий, возрастает вклад растяжения клеток, а ресурсы преимущественно направляются на быстрое увеличение высоты. В этих процессах участвуют фитохром-зависимые и криптохром-зависимые пути, а также ауксины и гиббереллины, регулирующие растяжение клеток и активность меристематических зон. При более высоком PPFD растяжение междоузлий ограничивается, а углеродный ресурс и сигналы дифференцировки могут поддерживать формирование более прочных вторичных стенок и усиление проводяще-механического комплекса [3].

Предположение о роли камбия требует аккуратной формулировки. В опыте измерялся интегральный диаметр стебля, поэтому прирост диаметра может отражать не только камбиальную активность, но и утолщение коровой паренхимы, усиление колленхимы, увеличение площади ксилемы и склеренхимных волокон. Поэтому корректнее говорить не о прямом доказательстве усиления вторичного роста, а о признаках структурного укрепления, которые могут включать камбиальный вклад у двудольного объекта. Для прямого подтверждения необходимы морфометрия поперечных срезов, измерение площади ксилемы, толщины стенок и доли механических тканей [1, 2].

Биомеханическая интерпретация результатов согласуется с подходом К. Дж. Никласа, согласно которому устойчивость растительного органа определяется совместным действием геометрии и материала. Укорочение стебля уменьшает плечо изгибающего момента, увеличение диаметра повышает второй момент площади, а лигнификация изменяет материал стенок, повышая жесткость и сопротивление деформации. Поэтому комбинация «меньшая высота – больший диаметр – более высокая доля лигнина» функционально соответствует снижению риска полегания и повышению надежности проводяще-опорной системы.

Сравнение с литературой показывает, что полученные эффекты укладываются в более широкую закономерность. Исследования фотоморфогенеза описывают усиление вытягивания побега при дефиците света и формирование более компактного фенотипа при достаточном освещении. Работы по механике стебля подчеркивают, что прочность определяется не одной морфометрией, а сочетанием длины, диаметра, плотности тканей, лигнификации, модуля упругости, модуля разрыва и пространственного распределения волокон. Экспериментальные

данные по разным культурам также показывают, что снижение освещенности или затенение может уменьшать прочность стебля за счет ограничения биосинтеза лигнина и ослабления механических тканей.

Попарные сравнения показали градиентность эффекта: каждый шаг увеличения освещенности сопровождался значимыми изменениями параметров, что важно для практики, где освещенность часто регулируется в диапазоне, а не «вкл/выкл».

На основе полученных закономерностей можно сформулировать прикладные рекомендации для светокультуры и выращивания рассады:

1) избегать длительного выращивания растений при низком PPFD, поскольку это формирует вытянутый стебель с меньшей лигнификацией и повышает риск полегания;

2) при ограничениях по мощности светильников компенсировать недосвет снижением плотности растений, оптимизацией фотопериода и контролем расстояния от источника света до верхушек растений;

3) при описании светокультуры обязательно фиксировать PPFD, спектральное соотношение синего, красного и дальнего красного света, длительность экспозиции и возрастную стадию растений;

4) для более точного прогноза механической устойчивости дополнять высоту и диаметр измерением лигнина, морфометрией ксилемы/склеренхимы и, при возможности, прямыми механическими тестами на изгиб.

Для учебных лабораторных работ протокол удобен тем, что позволяет соединить морфологию, анатомию и статистику: измерения выполняются доступными инструментами, а результаты устойчиво демонстрируют действие экологического фактора.

Выводы

Проведенное исследование подтвердило, что стебель травянистого растения является высокопластичной структурой, чувствительно реагирующей на изменение светового режима не только на уровне общей морфометрии, но и на уровне функционально значимых признаков, связанных с механической устойчивостью и дифференцировкой тканей. В условиях контролируемого градиента освещенности была выявлена устойчивая закономерность: при увеличении PPFD уменьшалась высота стебля, тогда как диаметр и показатель лигнификации возрастали.

Полученные результаты позволяют сделать принципиально важный вывод о функциональном компромиссе между вытягиванием и укреплением стебля. При дефиците света растение перераспределяет ресурсы в пользу быстрого роста междоузлий, что обеспечивает повышение высоты побега и потенциальное преимущество в конкуренции за свет. Однако этот выигрыш достигается ценой снижения выраженности признаков механического усиления: стебель оказывается более тонким и менее лигнифицированным. Напротив, при более высоком уровне освещенности наблюдается переход к стратегии конструктивного усиления: рост в длину сдерживается, но возрастает поперечный размер стебля и усиливается формирование лигнифицированных клеточных стенок.

Статистическая проверка данных показала, что влияние освещенности на все исследованные показатели является значимым, а величины эффектов относятся к крупным. Выявленные различия сохранялись не только на уровне общей дисперсионной проверки, но и при попарных сравнениях между уровнями освещения, что подтверждает градиентный, дозозависимый характер реакции. Дополнительную ценность результатам придает проверка предпосылок ANOVA, которая показала допустимость применения параметрического анализа в данной выборке.

В целом исследование подтверждает, что стебель не является пассивной опорной осью растения, а представляет собой динамичную, функционально настраиваемую систему. Изменение освещенности запускает согласованную перестройку параметров стебля, отражающую адаптивный выбор между быстрым ростом в длину и формированием более прочной конструкции. Полученные выводы имеют теоретическое значение для ботаники

вегетативных органов и прикладное значение для светокультуры, агротехнологий и учебно-исследовательской практики.

Список литературы

1. Григорьева Е. И., Сидорчук Ю. В., Дейнеко (Мух) Е. В. Формирование агрегатов в культуре клеток высших растений: роль компонентов клеточных стенок // Успехи современной биологии. 2022. Т. 142, № 6. С. 624–637. DOI: 10.31857/S0042132422060035.
2. Кулешова (Березкина) Т. Э., Удалова (Зайцева) О. Р., Балашова (Лахматова) И. Т., Аникина (Литвинюк) Л. М., Конончук П. Ю., Мирская (Нерушева) Г. В., Дубовицкая В. И., Вертебный В. Е., Хомяков Ю. В., Панова Г. Г. Особенности влияния спектра излучения на продуктивность и биохимический состав тестовых плодовых и листовых овощных культур // Журнал технической физики. 2022. Т. 92, № 7. С. 1060–1068. DOI: 10.21883/JTF.2022.07.52663.343-21.
3. Лебедев В. Г., Шестибратов К. А. Генная инженерия биосинтеза лигнина в деревьях: компромисс между свойствами древесины и жизнеспособностью растений // Физиология растений. 2021. Т. 68, № 4. С. 339–355. DOI: 10.31857/S0015330321030106.
4. Мокишина Н. Е., Мишкина П. В., Горшкова (Шушкина) Т. А. Экспрессия генов целлюлозосинтаз при гравистимуляции растений льна (*Linum usitatissimum*) и тополя (*Populus alba*×*tremula*) // Биоорганическая химия. 2022. Т. 48, № 3. С. 313–327. DOI: 10.31857/S0132342322030137.
5. Delmer D., Dixon R. A., Keegstra K., Mohnen D. The plant cell wall – dynamic, strong, and adaptable – is a natural shapeshifter // The Plant Cell. 2024. No 5 (36). P. 1257–1311. DOI: 10.1093/plcell/koad325.
6. Gautrat P., Matton, S. E. A., Oskam, L., Shetty, S. S., Van Der Velde, K. J., Pierik, R. Lights, location, action: shade avoidance signalling over spatial scales // Journal of Experimental Botany. 2025. No 3 (76). P. 695–711. DOI: 10.1093/jxb/erae217.
7. Krahmer J., Fankhauser C. Environmental control of hypocotyl elongation // Annual Review of Plant Biology. 2024. No 1 (75). P. 489–519. DOI: 10.1146/annurev-arplant-062923-023852.
8. Liu W., Hussain, S., Liu, T., Zou, J., Ren, M., Zhou, T., Liu, J., Yang, F., Yang, W. Shade stress decreases stem strength of soybean through restraining lignin biosynthesis // Journal of Integrative Agriculture. 2019. No 1 (18). P. 43–53. DOI: 10.1016/S2095-3119(18)61905-7.
9. Liu Y., Ye, R., Gao, X., Lin, R., Li, Y. Intermittent supplementation with far-red light accelerates leaf and bud development and increases yield in lettuce // Plants. 2025. No 1 (14). P. 139. DOI: 10.3390/plants14010139.
10. Ma P., Zhou, L., Liao, X.-H., Zhang, K.-Y., Aer, L.-S., Yang, E.-L., Deng, J., Zhang, R.-P. Effects of low light after heading on the yield of direct seeding rice and its physiological response mechanism // Plants. 2023. No 24 (12). P. 4077. DOI: 10.3390/plants12244077.
11. Martinez-Garcia J. F., Rodriguez-Concepcion M. Molecular mechanisms of shade tolerance in plants // New Phytologist. 2023. No 4 (239). P. 1190–1202. DOI: 10.1111/nph.19047.
12. Meijer D., Meisenburg, M., Van Loon, J. J. A., Dicke, M. Effects of low and high red to far-red light ratio on tomato plant morphology and performance of four arthropod herbivores // Scientia Horticulturae. 2022. (292). P. 110645. DOI: 10.1016/j.scienta.2021.110645.
13. Sellaro R., Durand, M., Aphalo, P. J., Casal, J. J. Making the most of canopy light: shade avoidance under a fluctuating spectrum and irradiance // Journal of Experimental Botany. 2025. No 3 (76). P. 712–729. DOI: 10.1093/jxb/erae334
14. Zhang S., Zhu, H., Wang, L., Zhang, Y., Cen, H., Xu, T. Effects of Selenium on the Lignin Deposition Pattern and Stem Mechanical Properties of Alfalfa (*Medicago sativa* L.) // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2024. No 17 (72). P. 9923–9936. DOI: 10.1021/acs.jafc.3c06684
15. Zhong R., Ye Z.-H. Transcriptional regulation of lignin biosynthesis // Plant Signaling & Behavior. 2009. No 4 (11). P. 1028–1034. DOI: 10.4161/psb.4.11.9875

References

1. Grigor'eva, E. I., Sidorchuk, Yu. V. & Deineko (Mukh), E. V. (2022). Formirovanie agregatov v kul'ture kletok vysshikh rastenii: Rol' komponentov kletochnykh stenok [Aggregates formation in higher plants cell culture: the role of cell wall components]. *Uspekhi Sovremennoi Biologii*, 142(6), 624–637. <https://doi.org/10.31857/S0042132422060035> (In Russian).
2. Kuleshova (Berezkina), T. E., Udalova (Zaitseva), O. R., Balashova (Lakhmatova), I. T., Anikina (Litvinyuk), L. M., Kononchuk, P. Yu., Mirskaya (Nerusheva), G. V., Dubovitskaya, V. I., Vertebnyi, V. E., Khomyakov, Yu. V., & Panova, G. G. (2022). Osobennosti vliyaniya spektra izlucheniya na produktivnost' i biokhimicheskii sostav testovykh plodovykh i listovykh ovoshchnykh kul'tur. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, 92(7), 1060–1068. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.07.52663.343-21> (In Russian).
3. Lebedev, V. G., & Shestibratov, K. A. (2021). Gennaya inzheneriya biosinteza lignina v derev'yakh: Kompromiss mezhdu svoistvami drevesiny i zhiznesposobnost'yu rastenii. *Fiziologiya Rastenii*, 68(4), 339–355. <https://doi.org/10.31857/S0015330321030106> (In Russian).
4. Mokshina, N. E., Mikshina, P. V., & Gorshkova (Shishkina), T. A. (2022). Ekspressiya genov tsellyulozosintaz pri gravistimulyatsii rastenii l'na (*Linum usitatissimum*) i topolya (*Populus alba* × *tremula*) [Expression of Cellulose Synthase Genes during the Gravistimulation of Flax (*Linum usitatissimum*) and Poplar (*Populus alba* × *tremula*) Plants]. *Bioorganicheskaya Khimiya*, 48(3), 313–327. <https://doi.org/10.31857/S0132342322030137> (In Russian).
5. Delmer, D., Dixon, R. A., Keegstra, K., & Mohnen, D. (2024). The plant cell wall—Dynamic, strong, and adaptable – Is a natural shapeshifter. *The Plant Cell*, 36(5), 1257–1311. <https://doi.org/10.1093/plcell/koad325> (In English).
6. Gautrat, P., Matton, S. E. A., Oskam, L., Shetty, S. S., Van Der Velde, K. J., & Pierik, R. (2025). Lights, location, action: Shade avoidance signalling over spatial scales. *Journal of Experimental Botany*, 76(3), 695–711. <https://doi.org/10.1093/jxb/erae217> (In English).
7. Krahmer, J., & Fankhauser, C. (2024). Environmental Control of Hypocotyl Elongation. *Annual Review of Plant Biology*, 75(1), 489–519. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-062923-023852> (In English).
8. Liu, W., Hussain, S., Liu, T., Zou, J., Ren, M., Zhou, T., Liu, J., Yang, F., & Yang, W. (2019). Shade stress decreases stem strength of soybean through restraining lignin biosynthesis. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(1), 43–53. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)61905-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)61905-7) (In English).
9. Liu, Y., Ye, R., Gao, X., Lin, R., & Li, Y. (2025). Intermittent Supplementation with Far-Red Light Accelerates Leaf and Bud Development and Increases Yield in Lettuce. *Plants*, 14(1), 139. <https://doi.org/10.3390/plants14010139> (In English).
10. Ma, P., Zhou, L., Liao, X.-H., Zhang, K.-Y., Aer, L.-S., Yang, E.-L., Deng, J., & Zhang, R.-P. (2023). Effects of Low Light after Heading on the Yield of Direct Seeding Rice and Its Physiological Response Mechanism. *Plants*, 12(24), 4077. <https://doi.org/10.3390/plants12244077> (In English).
11. Martinez-Garcia, J. F., & Rodriguez-Concepcion, M. (2023). Molecular mechanisms of shade tolerance in plants. *New Phytologist*, 239(4), 1190–1202. <https://doi.org/10.1111/nph.19047> (In English).
12. Meijer, D., Meisenburg, M., Van Loon, J. J. A., & Dicke, M. (2022). Effects of low and high red to far-red light ratio on tomato plant morphology and performance of four arthropod herbivores. *Scientia Horticulturae*, 292, 110645. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110645> (In English).
13. Sellaro, R., Durand, M., Aphalo, P. J., & Casal, J. J. (2025). Making the most of canopy light: Shade avoidance under a fluctuating spectrum and irradiance. *Journal of Experimental Botany*, 76(3), 712–729. <https://doi.org/10.1093/jxb/erae334> (In English).
14. Zhang, S., Zhu, H., Wang, L., Zhang, Y., Cen, H., & Xu, T. (2024). Effects of Selenium on the Lignin Deposition Pattern and Stem Mechanical Properties of Alfalfa (*Medicago sativa* L.).

Journal of Agricultural and Food Chemistry, 72(17), 9923–9936.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c06684> (In English).

15. Zhong, R., & Ye, Z.-H. (2009). Transcriptional regulation of lignin biosynthesis. *Plant Signaling & Behavior*, 4(11), 1028–1034. <https://doi.org/10.4161/psb.4.11.9875> (In English).

Поступила в редакцию 21.02.2026 г.

Usik D. A. Structural and functional plasticity of herbaceous plants stems under illumination gradients. –

The stem provides mechanical support, transports water and assimilates, and is involved in regulating shoot architecture and adaptive plasticity. This study experimentally tested how changes in illuminance intensity affect stem morphometry (height and diameter) and lignification index (lignin mass fraction) in *Brassica rapa* L. var. *rapa*, a rapid-cycling line Wisconsin Fast Plants a fast-growing herbaceous species under controlled conditions. Measurements were taken on the 28th day of cultivation.

A single-factor laboratory experiment ($n = 90$) was conducted with three photon flux levels (60, 180, and $420 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) under identical temperature, humidity, photoperiod, and watering regimes. Differences were tested using analysis of variance. It was shown that with increasing illumination, stem height decreased, while diameter and lignin content increased (ANOVA: $F(2,87) = 79.44; 44.11; 33.96; p < 0.001$). Post-hoc comparisons confirmed gradient differences between all pairs of light levels. Additional analysis revealed a negative relationship between height, diameter, and lignification, and a positive relationship between diameter and lignin. The results are interpreted as an adaptive shift from an elongation strategy to a shoot strengthening strategy.

Keywords: stem, primary and secondary structure, xylem, phloem, cambium, lignin, photomorphogenesis, mechanical stability, plasticity.

Усик Дмитрий Андреевич

ассистент кафедры биохимии, биотехнологии и физиологии, института природы и человека, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»,

г. Уфа, Республика Башкортостан, РФ.

E-mail: Usik.d77@mail.ru

ORCID: 0000-0003-4994-7054

SPIN-код: 2093-9506

Usik Dmitrii Andreevich

Assistant of Department of Biochemistry, Biotechnology and Physiology, Institute of Nature and Man, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation.

Научно-практический журнал

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ И ОХРАНЫ ПРИРОДЫ

ТЕХНОГЕННОГО РЕГИОНА

2026

№ 2

Учредитель: ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»

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