

Комплексный биоэкологический мониторинг состояния Центрального парка города Воронеж

Астанин С. С., Свистова И. Д.

Воронежский государственный педагогический университет

Воронеж, Россия

microbyrafl@gmail.com, i.svistova55@mail.ru

Проведен комплексный биоэкологический мониторинг системы почва – микробное сообщество – растения, дана оценка рекреационной нагрузке, уровню загрязнения и экологической устойчивости компонентов Центрального парка города Воронежа. Почва парка относится к слабо загрязненной, но повышенная рекреационная нагрузка в регулярной части парка привела к возрастанию содержания нефтепродуктов, выраженному подщелачиванию и снижению содержания органических углеродных соединений. В то же время степень вытаптывания травяного покрова и повреждения древесного компонента выше в лесной части парка. Микобиоиндикация почвы выявила негативные тенденции: по мере возрастания рекреационной нагрузки наблюдается снижение численности и видового разнообразия микромицетов, перераспределение доминантов, уменьшение редких видов грибов, накопление токсигенных видов. Биотестирование почвы показало заметный рост антибиотической активности почвы (тест-объект *Azotobacter chroococcum*) и фитотоксической активности почвы (тест-объект семена редьки масличной). Вклад биотического фактора (накопления микотоксинов) продемонстрирован методом инициированного микробного сообщества на почвенных пластинах. Информативными параметрами для микробиомониторинга почвы могут служить выявленные нами индикаторные на рекреационную нагрузку виды микромицетов, диаметр колоний азотобактера и ингибирование роста корня проростка тест-растения.

Ключевые слова: рекреационная нагрузка, загрязнение и физико-химические свойства почвы, фитоиндикация, микобиоиндикация, биологические свойства почвы, биотестирование почвы.

ВВЕДЕНИЕ

Воронеж – крупный промышленный центр, столица Центрально-Черноземного региона обладает богатым разнообразием озелененных территорий. На 1 января 2024 года численность населения Воронежа составила 1 046 425 человек, что обуславливает высокую транспортную и рекреационную нагрузку на городские рекреационные зоны. Урбаногенное воздействие оказывает значительное влияние на экологическую обстановку и здоровье городского населения и требует комплексного подхода к благоустройству рекреационных зон для обеспечения полноценного отдыха, улучшения качества жизни и экологической устойчивости городской среды.

Центральный парк (координаты 51,4153° N, 39,1307° E) является наиболее крупным и посещаемым объектом озеленения в Воронеже. Парк расположен в северной части города, занимает сложную балочную территорию, окруженную селитебной зоной и городской застройкой. Общая площадь парка составляет 100,27 га, из которых 0,54 га входят в кластер охранной зоны по всему периметру. Почвенный покров парка достаточно разнообразен и представлен в северо-западной части парка поверхностно-преобразованными черноземами выщелоченными, в остальных частях – серые лесные почвы (Кругляк, 2012). Данный парк имеет две функциональные части – лесопарковую (лесную, неблагоустроенную) и регулярную (окультуренную, благоустроенную).

Высокая рекреационная нагрузка на Центральный парк обусловлена проведением массовых торжественных мероприятий, таких как День Победы, Платоновский фестиваль, День города, фестиваль «Город-сад» и другие. В соответствии с приказом № 3 Министерства природных ресурсов и экологии Воронежской области от 10.01.2025 года, парк имеет

природоохранный статус регионального (областного) значения и является памятником природы.

Однако, несмотря на его рекреационную и природную значимость, научные исследования, посвященные экологическому мониторингу данного парка, представлены в ограниченном объеме. В основном, исследования носили ботаническую направленность изучения типичной флоры в условиях рекреационной дигрессии (Щепилова, 2011; Григорьевская и др., 2012; Терехова, Зотова, 2015; Попова, 2021) или зоологическую направленность (Бережнова, Цуриков, 2012). Масштабные обследования древесного компонента проводились давно (Фирсова и др., 2007; Разинкова и др., 2013; Успенский, 2013). Есть единичные данные по оценке состояния воздуха методом лишеноиндикации (Моисеева, Телегина, 2019).

Геоэкологические исследования направлены на изучения функционального зонирования и рекреационного потенциала данной территории (Кругляк, 1998; Кругляк, 2012; Давыдова, Серикова, 2018; Каверина, Трофименко, 2021; Кулаков, Крюкова, 2023; Карташова, 2024). Комплексные исследования состояния почв носили единичный характер (Черепухина и др., 2024) и не предполагали оценку показателей биологической активности почвы.

Согласно основным положениям экологии почв, именно эта природная среда выполняет роль «памяти» экосистемы, так как накапливает поллютанты (тяжелые металлы, нефтепродукты, бенз(а)пирен и др.) и биологически-активные вещества растений и микроорганизмов (антибиотики, мико- и фитотоксины). Оценить реакцию живых организмов на городскую нагрузку, выявить синергическое действие нескольких поллютантов помогают методы микробиоиндикации и биотестирования почвы (Звягинцев и др., 2005).

Важно проводить регулярные биомониторинговые исследования в данном парке с целью своевременного выявления и прогнозирования негативных тенденций и отклонений в устойчивости всех компонентов экосистемы: почвы, травянистый, древесный ярусы. Кроме того, в почвах, испытывающих регулярные антропогенные воздействия, появляются отклонения в устойчивости микробного сообщества (МСО), которые способны дать интегральную оценку состояния почвенного покрова и экосистемы в целом. Антропогенный прессинг приводит к накоплению оппортунистических (потенциально патогенных, опасных) видов микроскопических грибов (микромикетов), выигрывавшие конкурентную борьбу с другими участниками МСО. Данные микромикеты в городской среде повышают риск заболеваний жителей вторичными микозами или аллергическими реакциями (Аак, 2005). Поэтому, изучение биоразнообразия и структурного комплекса почвенных грибов – важный и валидный показатель биоиндикации состояния городской почвы, особенно в крупных рекреациях.

Цель работы – провести комплексные биоиндикационные исследования, оценить современное состояние и выявить опасные отклонения в устойчивости разных компонентов биоты (травянистого и древесного покрова, почвенного микробного сообщества) Центрального парка города Воронеж.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Комплексный анализ компонентов экосистемы Центрального парка Воронежа (координаты 51,4153° N, 39,1307° E) (рис. 1) проводили во второй декаде июля 2023 и 2024 года. Гидротермические условия соответствовали климатической норме.

Оценку рекреационной и транспортной нагрузки, степени вытаптывания территории, проективного общего травянистого покрытия по шкале Браун-Бланке, фауности древостоя, Is-индекса состояния древесных насаждений проводили по ранее проведенным опубликованным методикам (Астанин, 2025).

Для химического анализа и микробиоиндикации почвы в июне 2023 и 2024 годов были отобраны пробы из слоя 0–20 см (ГОСТ 17.4.4.02-2017) в проекции кроны основных древесных ценозообразователей – *Acer platanoides* L., *Quercus robur* L., *Tilia cordata* Mill.

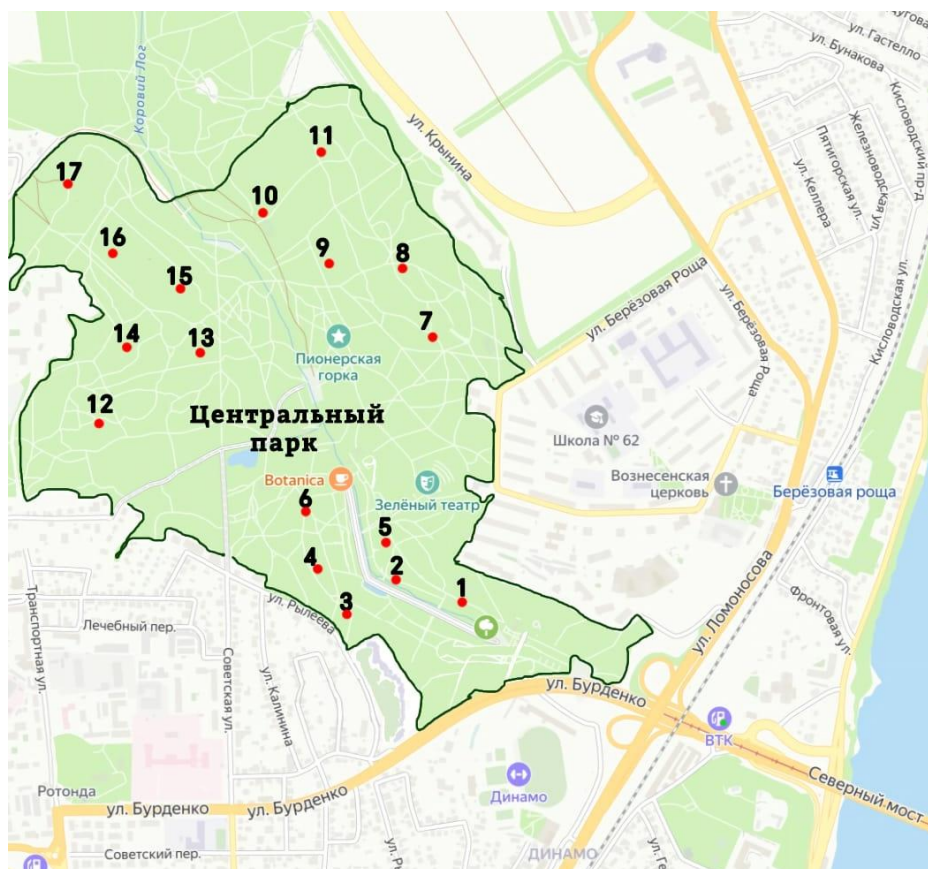


Рис. 1. Территориальные границы Центрального парка Воронежа
Точки отбора почвенных образцов: 1–7 – окультуренная часть; 8–17 – лесопарковая часть.

Актуальную и обменную кислотность почвы определяли потенциометрическим методом. Гидролитическую кислотность (смоль/кг) определяли по методу Каппена в модификации ЦИНАО. Определение содержания органического углерода ($C_{орг.}$) почвы проводили по методу Тюрина в модификации ЦИНАО (с фотометрическим окончанием) и выражали в процентах.

В почвенных образцах определяли содержание бенз(а)пирена методом высокоэффективной жидкостной хроматографии («Флюорат-02-2М»), нефтепродукты методом хлороформгексановой экстракции, содержание четырех тяжелых металлов (Pb, Cu, Zn, Ni) (валовые и подвижные формы) на атомно-абсорбционном спектрометре «СПЕКТР-5-4» согласно нормативным документам (М-МВИ-80-2008, Санкт-Петербург, 2008).

Микробиоиндикацию состояния почвы проводили по комплексу микромицетов, Микромицеты выделяли на среде Чапека, видовой состав почвенной микобиоты определяли по культурально-морфологическим признакам (Билай, 1982). Названия таксонов были унифицированы с привлечением базы данных Index Fungorum (Индекс названия грибов..., 2023). Анализ структуры комплекса микромицетов проводили по показателям частоты встречаемости и плотности видов (Мирчинк, 1988). Типичными считали виды грибов с частотами встречаемости более 30 %, остальные виды – случайные. К рангу доминантов I порядка относили виды с плотностью более 20 %; доминантов II порядка – более 10 %, остальные виды – редкие. Для выявления токсигенных грибов использовали известные списки видов и результаты собственных исследований (Свистова и др., 2004). Видовое разнообразие микромицетов оценивали по индексу Шеннона.

Биотестирование почвы проводили с использованием тест-объектов: бактерий *Azotobacter chroococcum* и семян редьки масличной. Содержание азотобактера оценивали

методом обрастания почвенных комочков на безазотистой среде Эшби (Теппер и др., 2010), результаты подсчитывали на 10 сутки роста. Рассчитали индекс токсичности почвы по Р. Р. Кабирову (1997) по двум параметрам: распространению (% обрастания) и развитию (диаметр колонии) азотобактера.

Фитотоксическую активность почвы определяли с использованием тест-объекта семян редьки масличной по ингибированию роста корня проростка (в %) контактный методом на почвенных пластинках. Использовали два варианта метода: нативную почву (Теппер и др., 2010) для оценки абиотических и биотических факторов фитотоксикоза, и метод иницированного микробного сообщества (ИМС) путем напыления амилодекстрина (растворимого крахмала) на поверхность почвенной пластинки, иницируя микробную сукцессию и усиливая вклад микробного фитотоксикоза (Методы..., 1980).

В качестве регионального фона использовали серые лесные супесчаные почвы под осоко-снытьевой дубравой Воронежского государственного природного биосферного заповедника имени В. М. Пескова (487 квадрат), расположенного на расстоянии 47 км от границы Воронежа.

Все микробиологические анализы проведены в 3-х биологических повторях. Статистическую обработку результатов проводили при помощи программы Statistica 12 (StatSoftInc, США). Достоверность различия с фоном проверяли при помощи критерия Манна-Уитни (при уровне значимости 0,05), корреляционный анализ проводили по коэффициенту Спирмена.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рекреационная нагрузка в лесной части парка была заметно ниже, чем в окультуренной части, заметно возрастающая в выходные дни (табл. 1). Пики посещения наблюдали с 13 до 14 часов по выходным, и с 9 по 10 часов в будни. Степень вытаптывания территории в регулярной части парка невысокая (2 балла), а в лесной части повышенная (3 балла). Это объясняется тем, что в регулярной части ведется своевременный уход коммунальными службами и хорошо продумано функциональное зонирование территории после глобальной реконструкции парка в 2017 году.

В лесной части много неконтролируемых входов, часто наблюдаются отдыхающие целыми семьями и на автотранспорте, там проходят регулярные тренировки и соревнования по спортивному ориентированию, а также активно ведется выгул собак. Лесная часть парка обладает недостаточной оснащенностью специальной дорожно-тропиночной сетью. Рекреационная нагрузка, в сравнении с последними масштабными и комплексными исследованиями Центрального парка (Терехова, 2001) возросла в три раза. Следовательно, Центральный парк подвержен повышенной рекреационной нагрузке, которая не регулируется и не контролируется в лесной части.

Общее травянистое проективное покрытие по шкале Браун-Бланке оказалась высоким (4 балла) в регулярной части, и пониженной в лесной части (3 балла). В лесной части наблюдается нарушение или недостаточное количество дорожно-тропиночной сети, наблюдается большое количество непредусмотренных вытоптанных тропинок. Поэтому, для снижения действия антропогенной нагрузки на почвенно-травянистый покров в лесной части парка нужна срочная экореновация и улучшение инфраструктуры, как это провели с регулярной частью.

В лесной части парка почва имела слабокислую реакцию, что связано с процессами разложения лесной подстилки и характерно для серой лесной почвы (табл. 2). Обнаружено подщелачивание почвы в регулярной части парка: как актуальной кислотности (возрастал на 1,3 ед.), так и обменной кислотности (возрастал на 1,2 ед.). Центральный парк проходил крупную реконструкцию в 2014–2017 годах, поэтому, возможно, обнаруженное подщелачивание почвы связано с загрязнением почвы техногенными материалами

Таблица 1

Оценка рекреационной (R) и транспортной нагрузки и степени вытаптывания травяного покрова в Центральном парке

Точки наблюдения	Общая площадь, га	R _{фактическая} , человек/га/час		СВТ, баллы	ТН, баллы
		будни	выходные		
Лесная часть	89,7	9	17	3	1
Регулярная часть	10,5	220	488	2	2

Примечание к таблице. СВТ – степень вытаптывания территории, ТН – транспортная нагрузка.

(кальцийсодержащий строительный мусор, пыль, цементная крошка). Высвобождение кальция под действием осадков снижает кислотность почвы. Кроме этого, регулярная часть парка находится в низине, и ее окружают со всех сторон массивные жилые зоны, в которых еще ведется застройка. Вблизи регулярной части находится большая зона парковки и крупная транспортная развязка, пыль с которых, может вызывать подщелачивание почвы (Середа, Яблонских, Куролап, 2015).

Содержание как валовых, так и подвижных форм тяжелых металлов (ТМ) в почве Центрального парка превышало региональный фон, что указывает на влияние городской нагрузки, однако ни в одной почвенной пробе не обнаружено превышения соответствующих значений ПДК. При этом, в регулярной части парка показатели загрязнения ТМ были выше, чем в лесной части, что подтверждает вклад рекреационной нагрузки (табл. 2) и требует дальнейшего мониторинга и мер по снижению загрязнения почвы в городских рекреациях.

Содержание органических углеродных соединений в почве увеличивалось на 9,7 % в лесной части и на 29,5 % в регулярной части парка относительно фоновых уровней, что обусловлено, в основном, природными факторами почвообразования (в лесной части), а также поступлением органического мусора, аэрозольных частиц, продуктов неполного сгорания твердого и жидкого топлива с ближайшей автодороги или жилых зон (в регулярной части). Напротив, содержание нефтепродуктов в сравнении с фоном возрастало в почве лесной части парка на 67 %, а в регулярной части на 94 %, однако превышения по ОДК не обнаружили ни в одной исследованной почвенной пробе (табл. 2). Содержание бенз(а)пирена в почве оказалось крайне низким (не превышало 0,005 мг/кг) при ПДК 0,02 мг/кг.

Видовой состав древесного компонента Центрального парка показан на рисунке 2. Основными ценозообразователями являются дуб черешчатый, ясень обыкновенный, клен остролистный, липа мелколистная.

Содержание органических углеродных соединений в почве увеличивалось на 9,7 % в лесной части и на 29,5 % в регулярной части парка относительно фоновых уровней, что

Таблица 2

Физико-химические свойства и загрязнение почвы Центрального парка Воронежа

Точки отбора проб	Кислотность почвы			Сорг., %	Нефтепродукты (min-max)	Тяжелые металлы, мг/кг (валовые формы)				Тяжелые металлы, мг/кг (подвижные формы)			
	pH H ₂ O	pH KCl	Hr			Cu	Pb	Zn	Ni	Cu	Pb	Zn	Ni
Фон	5,47	5,18	2,99	3,82	48–61	8,2	6,7	19,7	8,4	0,6	2,4	6,0	2,9
Лесная часть	6,19	4,60	1,67	4,23	85–97	9,8	12,3	22,5	12,3	2,4	3,9	10,1	3,7
Регулярная часть	6,90	6,19	3,96	5,42	104–117	14,8	15,1	24,8	11,9	3,6	6,9	12,4	3,9

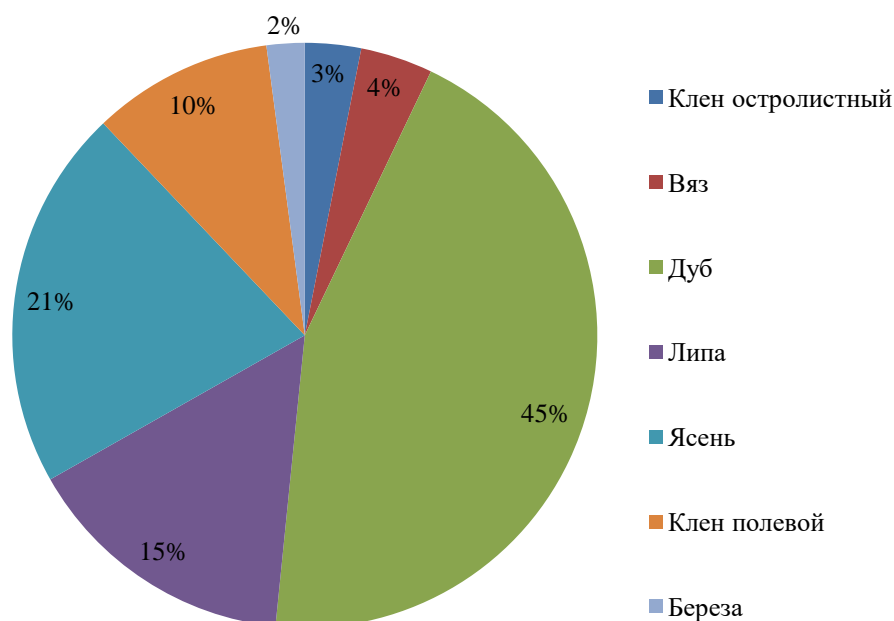


Рис. 2. Видовой состав древесных растений Центрального парка

обусловлено, в основном, природными факторами почвообразования (в лесной части), а также поступлением органического мусора, аэрозольных частиц, продуктов неполного сгорания твёрдого и жидкого топлива с ближайшей автодороги или селитебных зон (в регулярной части). Напротив, содержание нефтепродуктов в сравнении с фоном возрастало в почве лесной части парка на 67 %, а в регулярной части на 94 %, однако превышения по ОДК не обнаружили ни в одной исследованной почвенной пробе (табл. 2). Содержание бенз(а)пирена в почве оказалось крайне низким (не превышало 0,005 мг/кг) при ПДК 0,02 мг/кг.

Видовой состав древесного компонента Центрального парка показан на рис. 2. Основными ценозообразователями являются дуб черешчатый, ясень обыкновенный, клен остролистный, липа мелколистная.

По показателям глазомерной фаутиности древостоя можно заметить серьезные отклонения в устойчивости в лесной части парка (фаутиность равна 50 %) (табл. 3). В регулярной части парка этот показатель санитарного состояния пока не достигает критических значений из-за проводимых мероприятий по уходу за древесными насаждениями, и принятыми мерами по снижению рекреационной нагрузки на них.

Основной вклад в фаутиность древостоя в лесной части парка вносят энтомологические факторы – непарный древесинник (около 25 %), галловый клещ на листьях клена (около 45 %),

Таблица 3

Оценка повреждения древесного компонента в Центральном парке

Зоны Центрального парка	Общее количество изучаемых насаждений	МиЭВ	МП	МРЗБ	Фаутиность древостоя, %
Лесная часть	1250	496	78	54	50,24
Регулярная часть	350	28	66	37	37,43

Примечание к таблице. МиЭВ – Микологические и энтомологические вредители, МП – механические повреждения, МРЗБ – морозобоины.

орехотворки на листьях дуба (около 30 %) и микологические факторы – грибы-ксилофаги (около 45 %), гриб *Rhytisma acerinum* – возбудитель черной пятнистости листьев клена (около 55 %). В регулярной части парка основной фактор – механические повреждения деревьев, что можно объяснить большой рекреационной нагрузкой данной зоны.

Интегральный показатель состояния древесных насаждений (Is-индекс), учитывающий степень высыхания (Мозолевская, 2003), был достаточно высоким (7,90), поэтому Центральный парк все еще обладает большим запасом прочности по отношению к рекреационной нагрузке (рис. 3), однако отмечается снижение Is-индекса на 4 % по сравнению с последними опубликованными данными (Успенский, 2013).

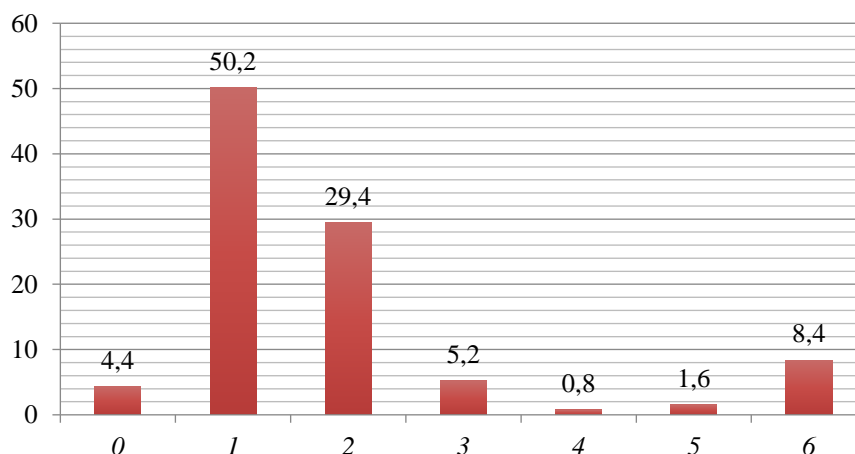


Рис. 3. Распределение древесных насаждений Центрального парка по категориям состояния. По оси абсцисс – категории состояния древесных насаждений; по оси ординат – доля растений, имеющих соответствующее состояние, от общего числа изученных деревьев (%).

Микологический анализ почвы позволил оценить влияние городской и рекреационной нагрузки на почву Центрального парка. Численность почвенных микромицетов достоверно прогрессивно снижалась в ряду региональный фон → лесная часть парка → регулярная часть парка (табл. 4) по мере возрастания городской и рекреационной нагрузки.

Таблица 4

Численность почвенных микромицетов, тыс КОЕ/г

Точки отбора проб	Численность (min-max)	M±SE	CI 95%	p
Региональный фон	143,0–174,5	0,0±9,7	[-41,7; 41,7]	–
Лесная часть Центрального парка	76,0–264,0	11,4±57,6	[-259,3; 236,4]	0,7
Регулярная часть Центрального парка	33,0–77,5	-104,1±7,4	[-124,6; -83,6]	0,036

Примечание к таблице. КОЕ – колониеобразующие единицы; M±SE – среднее разности между опытом и контролем (фоном) и ошибка среднего; CI 95 % – доверительный интервал; p – критерий Манна-Уитни.

Выявлено снижение видового разнообразия комплекса микромицетов в почве, подверженной антропогенной нагрузке: если в лесной части парка идентифицированы 22 вида грибов, то в регулярной части парка – только 14 видов (табл. 5). При этом количество и суммарная плотность доминантов практически не менялись – не наблюдали «концентрации доминирования», но заметно снижалось количество редких видов, что подтверждается расчетом индекса видового разнообразия Шеннона.

Определение видовой структуры комплекса почвенных микромицетов позволила выявить направленность сукцессии грибов под влиянием городской и рекреационной

Таблица 5

Видовое разнообразие комплекса почвенных микромицетов Центрального парка
под разными древесными растениями

Растения	Всего видов	Из них доминантов	Плотность доминантов	Индекс Шеннона	Плотность токсигенных видов, %
Региональный фон					
Липа мелколистная (<i>Tilia cordata</i> Mill.)	15	4	66,0	3,92	21,4
Клен остролистный (<i>Acer platanoides</i> L.)	17	2	44,5	3,87	22,9
Дуб черешчатый (<i>Quercus robur</i> L.)	17	4	74,5	3,55	16,3
Лесная часть Центрального парка					
Липа мелколистная (<i>Tilia cordata</i> Mill.)	18	3	55,5	3,40	25,1
Клен остролистный (<i>Acer platanoides</i> L.)	22	4	73,0	3,09	26,6
Регулярная часть Центрального парка					
Липа мелколистная (<i>Tilia cordata</i> Mill.)	14	2	46,0	2,56	31,5
Тополь черный (<i>Populus nigra</i> L.)	10	3	64,0	2,47	40,0
Клен ясенелистный (<i>Acer negundo</i> L.)	12	3	47,0	2,87	37,5
Клен остролистный (<i>Acer platanoides</i> L.)	10	4	69,5	2,67	32,3
Робиния ложноакациевая (<i>Robinia pseudoacacia</i> L.)	9	2	47,0	2,87	38,5

нагрузки (табл. 6). В лесной части Центрального парка наблюдали некоторое перераспределение видов грибов по степени доминирования по сравнению с региональным фоном. По критериям (Звягинцев и др., 2005) такие изменения соответствуют адаптивной зоне «стресса», вероятно, подобное влияние оказывает общегородская нагрузка на почвенную микофлору. В регулярной части парка изменения комплекса микромицетов выражены более значительно: изменение видового состава доминантов, резкое снижение количества редких видов грибов соответствует адаптивной зоне «резистентности» под влиянием интенсивной рекреационной нагрузки.

Мы разделили виды почвенных грибов по их реакции на антропогенную нагрузку на три группы. Чувствительными считали виды, которые снижали степень доминирования или вообще не выделялись из почвы, подверженной рекреационной нагрузке, устойчивыми считали виды, плотность которых не менялась. Виды грибов, которые выделялись только в антропогенно-преобразованной почве или повышали свой ранг доминирования, относили к группе индикаторных видов (табл. 7).

В комплексе микромицетов почвы регулярной части Центрального парка исчезали или резко снижали плотность виды грибов, активно разрушающие легкодоступные компоненты растительных остатков (*Mucor hiemalis*, *Rhizopus stolonifer*), целлюлозу (*Humicola grisea*, *Stachybotrys chartarum*, *Chaetomium piluliferum*), характерные для остепненных черноземных почв виды (*Penicillium lilacinum*, *P. tardum*, *P. simplicissimus*, *Aspergillus candidum*, *A. alliaceus*, *A. niger*, *A. fisheri*).

В ранг доминантов переходили некоторые виды грибов, которые в контроле были редкими или случайными, а также новые виды, нехарактерные для ненарушенных почв. Обращает на себя внимание тот факт, что практически все устойчивые и индикаторные на общегородскую и рекреационную нагрузку виды грибов относятся к токсигенным

(*Trichoderma harzianum*, *Fusarium solani*, *A. fumigatus*, *A. wentii*, *P. notatum*, *P. daleae*, *P. rugulosum*, *P. viridicatum*, *P. canescens*, *P. velutinum*). Вероятно, синтез микотоксинов разного биологического спектра действия (фунгицидного, антибиотического, фитотоксического) способствует выигрышу данных видов в конкурентной борьбе, обостряющейся в условиях антропогенного загрязнения и уплотнения почвы (Свистова, 2004).

Таблица 6

Структура комплекса типичных микромицетов Центрального парка Воронежа

Ранг видов	Виды микромицетов
Региональный фон	
Доминанты I порядка	<i>Penicillium tardum</i> , <i>P. simplicissimus</i>
Доминанты II порядка	<i>P. lilacinum</i>
Редкие	<i>P. lanosum</i> , <i>P. notatum</i> , <i>Aspergillus candidum</i> , <i>A. niger</i> , <i>A. fisheri</i> , <i>A. fumigatus</i> , <i>A. alliaceus</i> , <i>Rhizopus stolonifer</i> , <i>Trichoderma harzianum</i> , <i>Humicola grisea</i> , <i>Mycelia sterilia</i> , <i>Stachybotrys chartarum</i> , <i>Talaromyces flavus</i> , <i>Chaetomium piluliferum</i>
Лесная часть Центрального парка	
Доминанты I порядка	<i>P. tardum</i>
Доминанты II порядка	<i>P. simplicissimus</i> , <i>P. daleae</i>
Редкие	<i>P. lilacinum</i> , <i>P. notatum</i> , <i>P. rugulosum</i> , <i>P. funiculosum</i> , <i>A. fisheri</i> , <i>P. canescens</i> , <i>Aspergillus wentii</i> , <i>A. niger</i> , <i>A. fumigatus</i> , <i>Rhizopus stolonifer</i> , <i>Trichoderma harzianum</i> , <i>Mucor hiemalis</i> , <i>Fusarium solani</i> , <i>Humicola grisea</i> , <i>Stachybotrys chartarum</i> , <i>Chaetomium piluliferum</i>
Регулярная часть Центрального парка	
Доминанты I порядка	<i>P. daleae</i> , <i>P. notatum</i>
Доминанты II порядка	<i>P. simplicissimus</i> , <i>P. tardum</i> , <i>P. viridicatum</i> , <i>P. rugulosum</i>
Редкие	<i>P. lilacinum</i> , <i>P. canescens</i> , <i>P. velutinum</i> , <i>Aspergillus wentii</i> , <i>A. fumigatus</i> , <i>Trichoderma harzianum</i> , <i>Fusarium solani</i>

Таблица 7

Реакция почвенных микромицетов на рекреационную нагрузку

Группы микромицетов	Виды микромицетов
Чувствительные	<i>Penicillium lilacinum</i> , <i>Mucor hiemalis</i> , <i>Rhizopus stolonifer</i> , <i>Humicola grisea</i> , <i>Stachybotrys chartarum</i> , <i>Chaetomium piluliferum</i> , <i>Aspergillus candidum</i> , <i>A. alliaceus</i> , <i>A. niger</i> , <i>A. fisheri</i>
Устойчивые	<i>P. tardum</i> , <i>P. simplicissimus</i> , <i>Trichoderma harzianum</i> *, <i>Fusarium solani</i> *, <i>A. fumigatus</i> *
Индикаторные	<i>P. notatum</i> *, <i>P. daleae</i> *, <i>P. rugulosum</i> *, <i>P. viridicatum</i> *, <i>P. canescens</i> *, <i>P. velutinum</i> *, <i>A. wentii</i> *

Примечание к таблице. * – токсигенные виды.

Результаты микобиоиндикации указывают на опасные тенденции в нарушении комплекса микромицетов почвы Центрального парка в его регулярной части, снижающие его видовое разнообразие и устойчивость. Накопление токсигенных грибов может вызвать изменение биологической активности почвы, подверженной антропогенной нагрузке.

Для проверки этого предположения нами были определены показатели биологической активности почвы. Биотестирование почвы было проведено по двум показателям: антибиотической активности с тест-объектом *Azotobacter chroococcum* (основной свободноживущий азотфиксатор чернозема) и фитотоксической активности почвы.

Содержание азотобактера в лесной и регулярной частях Центрального парка ниже в сравнении с региональным фоном в среднем на 17–19 % (табл. 8). Известно, что снижение содержания азотобактера в промышленной и транспортной части Воронежа выражено

значительно сильнее, чем это обнаружено для рекреационной зоны (Назаренко, Свистова, 2013). Однако нами обнаружена выраженная тенденция к снижению диаметра колоний азотобактера на 16–17 % в почве лесной части и на 26–35 % в регулярной части парка.

Таблица 8

Биотестирование почвы Центрального парка с помощью *Azotobacter chroococcum*

Точки отбора проб	Показатель	M±SE	CI 95%	p	Индекс токсичности
% обрастания почвенных комочков					
Региональный фон	100	–	–	–	–
Лесная часть Центрального парка	79–83	–19,0±1,2	–21,26; –16,74	0,064	0,81
Окультуренная часть Центрального парка	80–85	–17,5±1,4	–20,33; –14,67	0,064	0,83
Диаметр колоний (минимальные–максимальные значения), мм					
Региональный фон	6,1–7,5	–	–1,25; 1,25	–	–
Лесная часть Центрального парка	5,7–6,3	–1,0±0,5	–1,92; –0,02	0,268	0,90
Окультуренная часть Центрального парка	4,5–4,9	–2,3±0,5	–3,21; –1,39	0,100	0,67

Примечание к таблице: M±SE – среднее разностей и ошибка среднего между опытом и контролем (фоном); CI (95%) – доверительный интервал; p – критерий Манна-Уитни.

Следовательно, токсический антибиотический эффект почвы в рекреационных зонах города проявляется не столько в снижении содержания, сколько в ингибировании роста колоний азотобактера.

Фитотоксическая активность почвы Центрального парка не превышала порогового значения (20 % по ГОСТу), но прогрессивно возрастала в 2 и 2,5 раза в ряду региональный фон → лесная часть парка → регулярная часть парка (табл. 9).

Стимуляция развития микроорганизмов (метод ИМС) вызвала более значительный рост фитотоксической активности почвы (в 2,7 и 3 раза соответственно по сравнению с фоном). Полученные данные указывают на вклад как абиотических факторов (загрязнение и уплотнение почвы), так и биотических факторов в развитие почвенного фитотоксикоза. Одним из биотических факторов может быть рост доли токсигенных видов микромицетов (табл. 5).

Таблица 9

Фитотоксическая активность почвы Центрального парка Воронежа

Точки отбора проб	Доля ингибирования (%)	M ± SE	CI 95%	p	Индекс токсичности
Нативная почва					
Региональный фон	6,6–7,7	–	–0,89; 0,89	1,0	–
Лесная часть Центрального парка	11,7–14,0	5,9±0,4	4,42; 7,38	0,1	0,56
Окультуренная часть Центрального парка	15,4–16,3	8,8±0,1	7,98; 9,62	0,1	0,45
Инициированное микробное сообщество (ИМС)					
Региональный фон	9,2–10,2	–	–0,8; 0,8	1,0	–
Лесная часть Центрального парка	24,3–27,8	16,4±0,7	14,31; 18,43	0,1	0,37
Окультуренная часть Центрального парка	28,9–30,0	19,8±0,1	18,95; 20,65	0,1	0,33

Примечание к таблице: M±SE – среднее разностей между опытом и контролем (фоном) и ошибка средней; CI (95 %) – доверительный интервал; p – критерий Манна-Уитни.

Корреляционный анализ с использованием коэффициента Спирмена позволил выявить роль факторов среды на показатели микробиоиндикации почвы (рис. 4).

Среди абиотических факторов для содержания нефтепродуктов обнаружена сильная положительная связь с развитием фитотоксикоза почвы ($r=+0,83$) и сильная отрицательная связь с диаметром колоний азотобактера ($r=-0,89$). Показатели кислотности почвы не оказали достоверного влияния на биологическую активность почвы. Из биотических факторов наиболее выраженное влияние оказывает содержание токсигенных видов грибов на фитотоксическую активность почвы ($r=+0,88$) и антибиотическую активность с азотобактером ($r=-0,83$), что подтверждает больший вклад именно биогенного фактора в токсичность почв Центрального парка.

Выявленные зависимости полностью коррелируют с введённым нами показателем – градиентом рекреационной нагрузки (фон < лесная часть парка < регулярная часть парка), что обосновывает наше предположение о роли рекреационной нагрузки в нарушении микробного сообщества почвы данной территории.

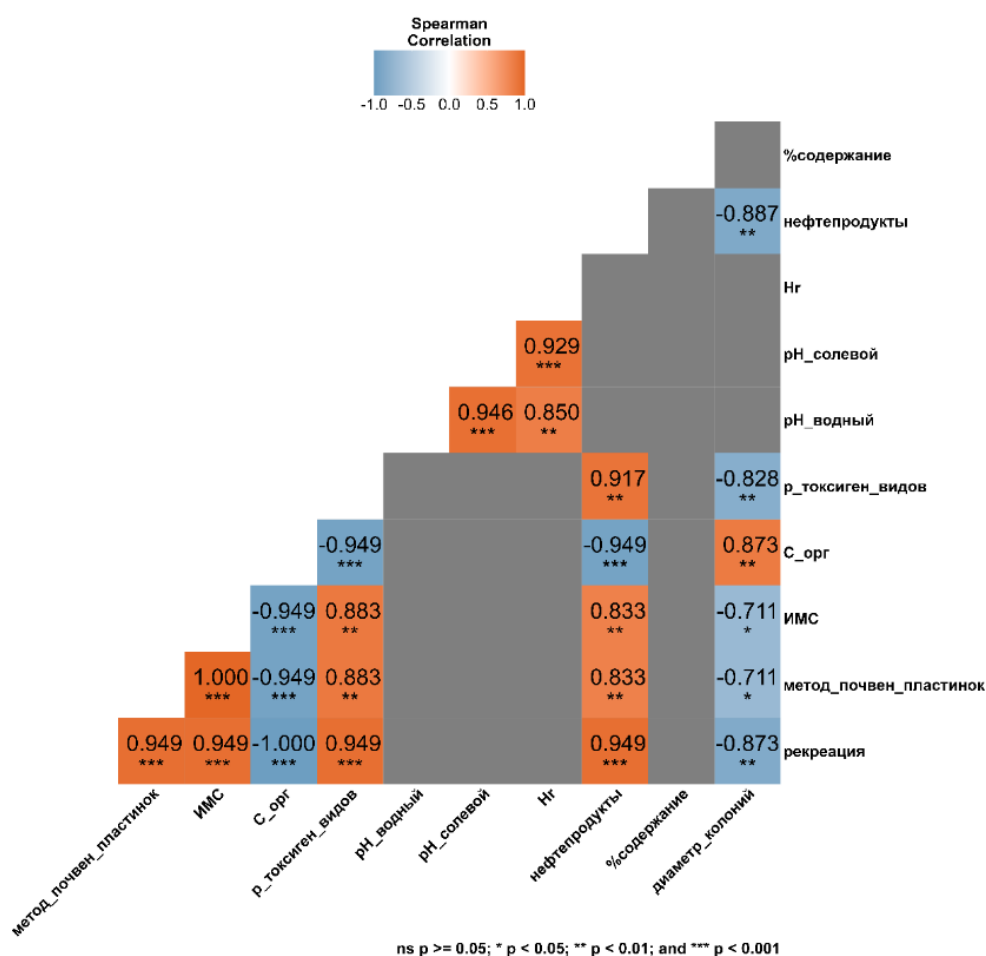


Рис. 4. Корреляционная матрица (коэффициенты Спирмена) между показателями загрязнённости почвы и токсичности почвы

Цветовая шкала отражает направление и силу корреляции: от сильной отрицательной (синий) до сильной положительной (оранжевый). Звёздочки обозначают уровень статистической значимости: * — $p < 0.05$, ** — $p < 0.01$, *** — $p < 0.001$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный комплексный биоэкологический мониторинг позволил оценить рекреационную нагрузку, уровень загрязнения и экологическую устойчивость компонентов Центрального парка города Воронеж. Почва парка относится к слабо загрязненной, но повышенная рекреационная нагрузка в регулярной части парка привела к возрастанию содержания нефтепродуктов, выраженному подщелачиванию и снижению содержания органических углеродных соединений. В то же время степень вытаптывания травяного покрова и повреждения древесного компонента оказалась выше в лесной части парка.

Микобиоиндикация почвы выявила негативные тенденции: по мере возрастания рекреационной нагрузки наблюдается снижение численности и видового разнообразия микромицетов, перераспределение доминантов, уменьшение редких видов грибов, накопление токсигенных (оппортунистических) видов. Синтез микотоксинов, наряду с накоплением нефтепродуктов в почве, обуславливает развитие токсикоза почвы. Биотестирование почвы показало заметный рост антибиотической активности почвы (тест-объект *Azotobacter chroococcum*) и фитотоксической активности почвы (тест-объект семена редьки масличной). Информативными параметрами для микробиомониторинга почвы служат выявленные нами индикаторные виды грибов, диаметр колоний азотобактера и ингибирование роста корня проростка тест-растения.

Комплексный биоэкомониторинг компонентов системы почва – микробное сообщество – растения Центрального парка города Воронеж поможет разработать мероприятия по управлению, экореновации и улучшению инфраструктуры, сохранить его экологическую устойчивость и создать комфортные условия для отдыха горожан.

Список литературы

- Аак О. В. Аллергены грибов. Особенности микогенной сенсibilизации // Проблемы медицинской микологии. – 2005. – № 7 (2). – С. 12–16.
- Астанин С. С. Оценка антропогенной нагрузки и экологического состояния разных категорий рекреаций города Воронеж // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. – 2025. – № 1. – С. 9–18. DOI: 10.5281/zenodo.15004151.
- Бережнова О. Н., Цуриков М. Н. Состав и структура населения герпетобионтных жесткокрылых Центрального парка культуры и отдыха города Воронежа // XXVI Любищевские чтения. Современные проблемы эволюции и экологии (Ульяновск, 5–7 апреля 2012 года). – Ульяновск: Ульяновский ГПУ им. И. Н. Ульянова, 2012. – С. 191–196.
- Григорьевская А. Я., Лепешкина Л. А., Зелепукин Д. С. Флора Воронежского городского округа г. Воронеж: биогеографический, ландшафтно-экологический, исторический аспекты // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. – 2012. – Т. 21, № 1. – С. 5–158.
- Давыдова Н. С., Серикова В. И. Рекомендации по восстановлению естественной водной экосистемы малого искусственного водоема воронежского центрального парка г. Воронеж // Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии (Санкт-Петербург, 28–30 марта 2018 года). – Санкт-Петербург: Научное издание, 2018. – С. 343–346.
- Звягинцев Д. Г., Бабьева И. П., Зенова Г. М. Биология почв. – Москва: МГУ, 2005. – 445 с.
- Каверина Н. В., Трофимено А. А. Современное состояние малых городских водоемов города Воронежа на примере пруда Воронежского Центрального парка // Оценка экологических рисков водопользования на территории крупного урбанизированного региона. – Воронеж: Цифровая полиграфия, 2021. – С. 116–128.
- Карташова Н. П., Мануковская А. В., Шатилова В. А. Архитектурно-ландшафтная организация территории пруда в Центральном парке г. Воронежа // Ландшафтная архитектура - от истока к инновациям: материалы Всероссийской национальной конференции, посвященной 20-летию кафедры ландшафтной архитектуры и почвоведения (Воронеж, 22 мая 2024 года). – Воронеж: ВГЛУ им. Г. Ф. Морозова, 2024. – С. 62–65. DOI: 10.58168/LANDSCAPE2024_62-65.
- Кругляк В. В. Функциональное зонирование территории муниципального предприятия Центральный парк города Воронежа // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров оборудования и систем управления лесного комплекса. – Воронеж: ВГЛУ, 1998. – С. 234–237.
- Кругляк П. В. Инновации и инвестиции в объекты ландшафтной архитектуры г. Воронежа (на примере ЦПКиО) // Лесотехнический журнал. – 2012. – № 4 (8). – С. 163–167.
- Кулаков Е. Е., Крюкова С. А. Оценка рекреационного потенциала территории парка «Динамо» // Ростовский научный вестник. – 2023. – № 7. – С. 26–29.
- Методы почвенной биохимии и микробиологии / [Ред. Д. Г. Звягинцев]. – Москва: МГУ, 1980. – 240 с.

- Мирчинк Т. Г. Почвенная микология. – Москва: МГУ, 1988. – 220 с.
- Мозолевская Е. Г. Некоторые результаты применения индекса состояния насаждений при мониторинге // Лесной вестник. – 2003. – №2. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-rezultaty-primeneniya-indekса-sostoyaniya-nasazhdeniy-pri-monitoringe> (просмотрено 10.05.2024).
- Моисеева Е. В., Телегина О. О. Лихеноиндикация как способ мониторинга состояния рекреационных городских зон (на примере г. Воронежа) // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2019. – Т. 7, № 3 (46). – С. 301–306.
- Назаренко Н. Н., Свистова И. Д. Микробиологическая индикация почв урболандшафтов. – Воронеж: ВГАУ, 2013. – 135 с.
- Охрименко Ю. В., Негрбов О. П., Маслова О. О., Негрбов С. О. Изучение лесопатологического состояния парков города Воронежа // Зеленая инфраструктура городской среды: современное состояние и перспективы развития: Сборник статей III международной научно-практической конференции (Воронеж, 4-5 сентября 2019 года). – Воронеж: КОНВЕРТ, 2019. – С. 124–127.
- Попова Н. Н. Бриофлора охраняемых садово-парковых ландшафтов города Воронежа // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. – 2021. – № 20–1. – С. 357–361. DOI: 10.14258/pbssm.2021072.
- Приказ министерства природных ресурсов и экологии Воронежской области от 10.01.2025 № 3 «Об утверждении перечня особо охраняемых природных территорий областного и местного значения на территории Воронежской области по состоянию на 01.01.2025». – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.govvm.ru/sites/default/files/2025-01/Приказ_0.pdf?download (просмотрено 09.01.2025).
- Разинкова А. К., Царалунга В. В., Дарковская А. С. Особенности патологии местных и интродуцированных лиственных пород в пределах центрального района г. Воронежа // Лесотехнический журнал. – 2013. – № 3 (11). – С. 22–27.
- Свистова И. Д., Щербаков А. П., Фролова Л. О. Токсины микромицетов чернозема: спектр антибиотического действия и роль в формировании микробного сообщества // Почвоведение. – 2004. – № 10. – С. 1220–1227.
- Середа Л. О. Яблонских Л. А., Куролап С. А. Оценка эколого-геохимического состояния почвенного покрова городского округа город Воронеж // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. – 2015. – № 4 – С. 59–65.
- Теплер З. Е., Шильникова, Г. И., Переверзева В. К. Методы почвенной микробиологии. – Москва: Колос, 2010. – 234 с.
- Терехова Н. А. Биоэкологическая оценка состояния растительного компонента рекреационно-парковых ландшафтов города Воронежа и его оптимизация: дис. ... канд. биол. наук: спец. 03.00.05 Ботаника. – Воронеж: ВГУ, 2001. – 242 с.
- Терехова Н. А., Зотова Т. Е. Состояние ценопопуляции пролески сибирской при развитии рекреационной дигрессии в дубраве Центрального парка города Воронежа // Биоразнообразие и рациональное использование природных ресурсов: материалы докладов III Всероссийской заочной научно-практической конференции с международным участием (Махачкала, 27 марта 2015 года). – Махачкала: 2015. – С. 213–215.
- Успенский К. В. Лесопатологические исследования зеленых насаждений города Воронежа // Известия ВГПУ. – 2013. – № 1 (260). – С. 245–250.
- Фирсова Н. В., Негрбов О. П., Побединский Г. Д. Ландшафтно-экологическая организация природного комплекса общегородского центра // Вестник Воронежского ГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. – 2007. – № 1. – С. 100–107.
- Черепухина И. В., Мазнев В. Ю., Фролкин Г. В., Девятова Т. А. Микробиологическая активность почв рекреационных территорий г. Воронеж // АгроЭкоИнфо. – 2024. – № 2 (62). – DOI: 10.51419/202142215.
- Щепилова О. Н. Состояние природных популяций *Flapendula ulmaria* (L.) maxim на территории Центрального парка культуры и отдыха г. Воронежа // Экологические проблемы города Воронежа и перспективы их решения: Материалы VII научно-практической конференции (Воронеж, 19 мая 2011 года). – Воронеж: Управление по охране окружающей среды департамента общественной безопасности, 2011. – С. 116–117.
- Индекс названия грибов. 2023. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://indexfungorum.org/> (просмотрено 09.06.2023).

Astanin S. S., Svistova I. D. Integrated Bioecological Monitoring of the Central Park Condition in Voronezh // Ekosistemy. 2025. Iss. 43. P. 112–125.

The integrated bioecological monitoring of the system *soil - microbial community - plants* was conducted to assess the recreational load, pollution level and environmental sustainability within Central Park in Voronezh. The soil of the park was classified as slightly polluted, but the increased recreational load in the regular part of the park led to an increase in concentration of petroleum products, significant alkalisation and a decrease in the content of organic carbon compounds. At the same time, the degree of trampling of grass cover and damage to the tree component is higher in the forest part of the park. Soil mycobioindication revealed negative trends associated with increasing recreational pressure: decreased fungal abundance and species diversity, shifts in dominant species composition, reduction of rare fungal species, accumulation of toxigenic species. Soil biotesting revealed a significant increase in soil antibiotic activity (using *Azotobacter chroococcum* for testing) and soil phytotoxic activity (using oilseed radish seeds for testing). The contribution of biotic factor (accumulation of mycotoxins) was demonstrated by the method of initiated microbial community on soil plates. Informative parameters for soil microbiomonitoring include microbial species sensitive to recreational load, diameter of *Azotobacter* colonies and inhibition of root growth of test-plant seedlings.

Key words: recreational load, soil pollution and physico-chemical properties, phytoindication, mycobioindication, biological soil properties, soil biotesting.

Поступила в редакцию 06.06.25

Принята к печати 12.09.25