

*На правах рукописи*



Попыванов Дмитрий Владимирович

**БИОАККУМУЛЯЦИЯ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ БАЗИДИОМИЦЕТАМИ  
В УСЛОВИЯХ УРБОЭКОСИСТЕМЫ**

**03.02.08 – Экология (биология)**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Киров – 2018 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Вятский государственный университет» (ВятГУ)

**Научный руководитель:** доктор биологических наук, старший научный сотрудник

**Широких Александр Анатольевич**

**Официальные оппоненты:** **Иванов Александр Иванович**

доктор биологических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный аграрный университет», профессор кафедры селекции, семеноводства и биологии растений

**Пукальчик Мария Алексеевна**

кандидат биологических наук, Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий», старший преподаватель Центра по научным и инженерным вычислительным технологиям для задач с большими массивами данных

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный университет»

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019г. в \_\_\_\_ ч. на заседании диссертационного совета Д 212.025.07 при ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, корп.1, ауд.335.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ВлГУ и на сайте <http://diss.vlsu.ru/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, можно присылать по адресу: 600000, г.Владимир, ул.Горького, 87, ВлГУ, кафедра биологии и экологии.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат биологических наук



Кулагина Екатерина Юрьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Города, являющиеся крупными промышленными центрами, включают в себя, как правило, достаточное количество рекреационных территорий, которые выполняют культурно-оздоровительные, санитарно-гигиенические, эстетические, почвозащитные и водоохраные функции. В тоже время, городская среда испытывает существенную нагрузку от промышленных предприятий, тепло - энергетического комплекса и ежегодно растущего числа автотранспорта. Возрастающая антропогенная нагрузка на урбоэкосистемы приводит к снижению их устойчивости и биоразнообразия. В связи с этими неутешительными тенденциями остро встает вопрос о способах оценки отдельных экосистемных компонентов с целью принятия управленческих решений для долгосрочного рационального природопользования.

Одними из наиболее опасных в городской среде загрязняющих веществ являются соединения тяжёлых металлов (ТМ), по причине их высокой токсичности, подвижности и способности к биоаккумуляции (de Miguel et al., 1997; Дабахов и др., 2005; Рэцце, Крыстя, 1986; Verti, Jacobs, 1996). Способностью обильно накапливать данные соединения характеризуются базидиальные макромицеты, в силу чего они могут представлять интерес для экологического мониторинга состояния среды (Костычев, 2009; Щеглов, 2002; Чураков, 2000; Цветнова, 2001).

Изучению сообществ базидиомицетов на территории парков и скверов промышленных городов уделено значительно меньшее внимание, чем на ненарушенных природных территориях. В литературе присутствуют лишь отрывочные сведения о видовом разнообразии базидиомицетов в городской среде (Шилкова, 2015; Химич, 2013; Дремова, 2014; Савельев, Кикеева, 2018; Кириллов, 2011), сведений о видах, аккумулирующих ТМ в условиях города, тоже недостаточно (Иванов и др., 2008; Костычев, 2012; Demirbaş, 2001; Yamaç et al., 2007). Структура базидиомицоты, содержание ТМ в плодовых телах

базидиомицетов, произрастающих на территории г. Кирова, ранее практически не изучались.

Целью работы являлось определение состава базидиомикоты в парках и скверах г. Кирова и выявление видов для использования в биоиндикации загрязнения городской среды ТМ.

Для достижения намеченной цели были поставлены следующие задачи:

1. Изучить таксономическую и эколого – трофическую структуру сообществ базидиомицетов в парках и скверах г. Кирова.
2. Дать сравнительную оценку состава базидиомикоты на урбанизированной и фоновой территории в характерных для подзоны южной тайги условиях (на примере г. Кирова).
3. Оценить накопление ТМ в базидиомах грибов в зависимости от их таксономического положения и эколого – трофической принадлежности.
4. Изучить особенности роста и процессов биосорбции ТМ из растворов мицелием гриба *Trametes versicolor* (L.).
5. Выяснить возможность использования отдельных видов базидиомицетов в целях биоиндикации состояния городской среды.

#### **Научная новизна.**

Впервые составлены видовые списки и охарактеризована эколого - трофическая структура базидиомикоты парков и скверов г. Кирова и прилегающего к городу природного лесного массива (п. Порошино). Установлено, что наибольшей частотой встречаемости в городских парках и скверах характеризуются базидиомицеты ксилотрофных видов, в то время как в лесном массиве подзоны южной тайги виды из разных эколого-трофических групп представлены практически в равном соотношении. Впервые получены сведения о биосорбции  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  в базидиомах грибов, собранных в 6 различных экотопах на территории г. Кирова. Показано, что представители группы микоризообразователей наиболее активно накапливают в плодовых телах цинк и свинец, тогда как подстилочные сапротрофы – медь. Впервые количественно описано влияние ТМ на рост мицелия гриба *T. versicolor* БИН

2263 в погруженной культуре. Выявлены морфологические особенности мицелиального роста гриба в присутствии металлов, заключающиеся в формировании пеллет различного размера и формы. Показана разница в степени извлечения  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  из растворов грибным мицелием.

**Теоретическая и практическая значимость.** По данным проведенного исследования составлен список видов базидиомицетов, произрастающих на территории парков и скверов г. Кирова. Выявлены виды, подходящие для биоиндикации и использования в экологическом мониторинге территории города: *Agaricus bisporus*, *Paxillus involutus* и *Tricholoma terreum*. Мицелий гриба *T. versicolor* БИН 2263, при выращивании в погруженной культуре, может быть использован в качестве природного сорбента ТМ из промышленных и бытовых сточных вод.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Эколого – трофическая структура сообществ базидиомицетов в городских условиях характеризуется преобладанием ксилотрофных видов.
2. В условиях урбоэкосистемы наиболее высокое накопление грибами цинка и свинца, в разрезе отдельных эколого – трофических групп, характерно для микоризообразователей, а накопление меди – для подстилочных сапротрофов.
3. Для ксилотрофных базидиомицетов в городской среде характерно в среднем меньшее суммарное накопление ТМ, чем для микоризообразователей и подстилочных сапротрофов.

**Обоснованность и достоверность научных результатов** обеспечивается использованием комплекса современных методов исследования: оптической микроскопии и высокоточной атомно-абсорбционной спектрофотометрии. Отбор проб осуществлен на репрезентативных участках в трехкратной биологической повторности, что позволило провести статистическую обработку данных в программном продукте Microsoft Excel и подтвердить достоверность выводов работы.

**Апробация работы.** Основные положения работы были представлены на: III Междунар. Микол. Форуме (Москва, 2015г.), XIII Всеросс. Научно-практ. конф. с междунар. уч. «Актуальные проблемы региональной экологии и биодиагностика живых систем» (Киров, 2015 г.), XXIII Всеросс. молодёжной науч. конф. «Актуальные проблемы биологии и экологии» (Сыктывкар, 2016 г.), Всеросс. научно-практ. конф. с междунар. уч. «Экология родного края: проблемы и пути решения» (Киров, 2016 г.), II Междунар. науч. конф. «Биология, систематика и экология грибов и лишайников в природных экосистемах и агрофитоценозах» (Минск, 2016 г.), XIV Всеросс. научно-практ. конф. с междунар. уч. «Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем» (Киров, 2016 г.), IV Съезде Микологов России (Москва, 2017 г.), XVIII Всеросс. научно-практ. конф. «Общество. Наука. Инновации» (Киров, 2018 г.), IV (XII) Междунар. ботанической конф. молодых ученых (Санкт-Петербург, 2018 г.).

**Публикация результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе две – в научных журналах, включенных в Перечень ВАК РФ.

**Личный вклад автора.** Диссертационная работа является результатом многолетних исследований (2014-2018 гг.), выполненных лично автором. Автору принадлежит планирование и проведение большей части камеральных и экспериментальных работ, а также обработка и интерпретация полученных данных. Автор принимал непосредственное участие в сборе и идентификация собранных образцов базидиомицетов, выполнял пробоподготовку и анализ на содержание ТМ на атомно-абсорбционном спектрофотометре. Анализ и обобщение данных, формулировка основных положений и выводов выполнены лично автором.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, включающего 231 источник, в том числе 109 на иностранном языке, и 2 приложений. Работа изложена на 115 страницах, проиллюстрирована 17 рисунками, содержит 12 таблиц.

# ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

## Глава 1 Литературный обзор

В главе рассмотрены особенности произрастания базидиомицетов в городской среде, адаптации грибов к антропогенным воздействиям, а также описана роль грибов в урбоэкосистеме (Горленко и др., 1980; Горовой, 1989). Представлен обзор зарубежных и отечественных работ по биосорбции ТМ базидиомицетами (Щеглов, 2002; Иванов, Блинохватов, 2003; Рязанов, 2003; Baldrian, 2003; Kalač et al., 2004; Svoboda et al., 2006; Tüzen et al., 2007; Yamaç et al., 2007).

## Глава 2 Объекты и методы исследований

**2.1 Сведения о районе проведения исследований.** Киров расположен на северо-востоке Русской равнины. Основная часть города расположена на левом крутом берегу Вятки, на семи крупных холмах. Климат Кировской области, по классификации Б.П. Алисова (1969), относится к континентальному умеренному, с продолжительной умеренно холодной и снежной зимой, затяжной весной, ранней осенью и умеренно теплым коротким летом. В почвенном покрове преобладают дерново-подзолистые почвы, сформированные, в основном, на покровных суглинках, а также на элювии пермских глин.

К числу основных загрязнителей окружающей среды в городе относятся соединения ТМ, источниками которых являются автотранспорт, сжигание органического топлива и отходов, химическая промышленность, гальваника и др. 17 предприятий города имеют гальванические цеха с линиями цинкования, кадмирования, никелирования, хромирования, меднения и др. (Ашихмина, Домрачева, 2012).

**2.2 Места сбора базидиомицетов.** Места сбора плодовых тел базидиомицетов, а также отбора почвы и древесины были привязаны к паркам и скверам города, как наиболее характерным местообитаниям грибов в городских условиях. Обследована территория транспортной, промышленной и рекреационной зон г. Кирова, общей площадью 79,8 га (рис. 1).

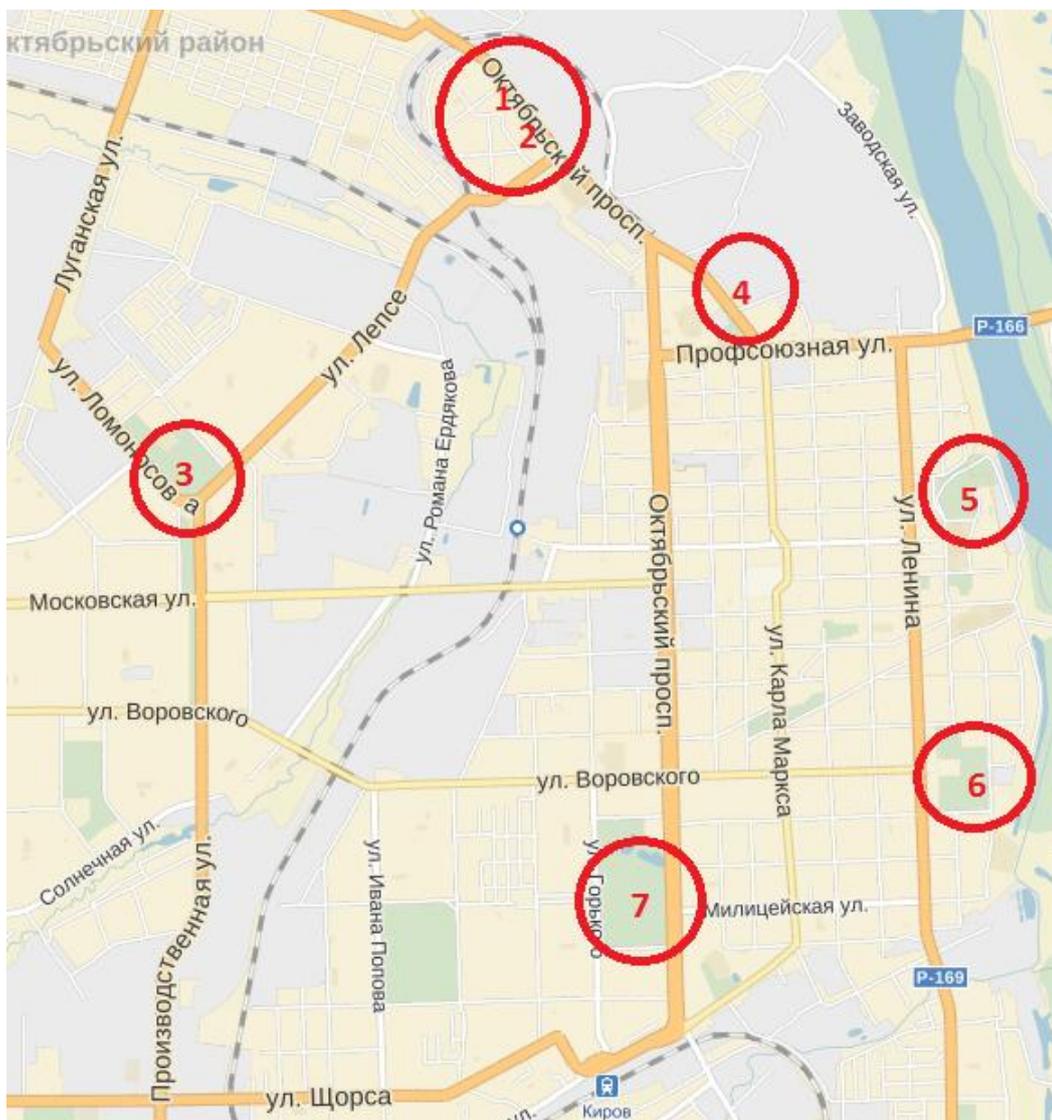


Рисунок 1 – Схема расположения сбора плодовых тел базидиомицетов, отбора почвы и древесины на территории г. Кирова: 1, 2 – сквер на площади Лепсе, 3 – парк Победы, 4 - сквер комбината «Искож», 5 - Александровский сад, 6 – парк им. Ю.А. Гагарина, 7 – парк им. С.М. Кирова

В составе древостоя городских экотопов в основном присутствуют лиственные породы: *Acer platanoides*, *Acer negundo*, *Tilia cordata*, *Quercus robur*, *Betula pendula*. В качестве фоновой выбрана территория лесного массива вблизи п. Порошино, на противоположном берегу р. Вятки, где древостой представлен хвойными породами: *Picea abies*, *Abies sibirica*.

При анализе загрязнения почвы ТМ между различными функциональными зонами города существенных различий не обнаружено (табл. 1). В то же время выявлена тенденция к увеличению суммарного ( $Zn+Cu+Pb$ ) содержания подвижных форм в направлении с юга и юго-запада на северо-восток, что можно объяснить особенностями рельефа и преобладающей

Таблица 1 – Содержание подвижных форм ТМ (мкг/г) в почве, 0-5 см

Экотоп	Подвижные формы, мкг/г			
	Cu <sup>2+</sup>	Pb <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Сумма (Zn+Cu+Pb)
Промышленная зона				
Аллея на площади Лепсе	2,1±0,2	0,7±0,2	16,5±0,4	19,3
Парк Победы	0	0	9,1±2,8	9,1
Рекреационная зона				
Александровский сад	0,5±0,2	3,1±0,6	27,1±0,4	30,8
Парк им. Ю.А. Гагарина	0,5±0,1	4,7±0,2	13,9±1,9	19,1
Транспортная зона				
Сквер комбината «ИСКОЖ»	0,1±0,1	11,0±2,1	14,5±0,1	25,6
Парк им. С.М. Кирова	0,7±0,2	2,7±0,6	13,1±2,7	16,5
Фоновая территория				
Лес в Порошино	0	0	4,8±2,1	4,8

на территории города розой ветров (Френкель, 1997). Лидирует по суммарному содержанию ТМ в почве Александровский сад (30,8 мкг/г). Суммарное содержание ТМ в почве фоновой территории в шесть раз меньше и составило лишь 4,8 мкг/г.

**2.3 Методы исследований.** Сбор образцов плодовых тел грибов осуществляли маршрутным методом, описание и фиксацию материала проводили по стандартной методике (Бондарцев, Зингер, 1950). Морфологические признаки изучали с помощью микроскопа Leica DM 2500 (Германия), с использованием стандартного набора реактивов. При идентификации видов макромицетов были использованы определители по различным таксонам отдела Basidiomycota: «Funga Nordica» (Knudsen, Vesterholtm, 2008), «Определитель грибов России. Порядок Афиллофоровые» вып.2 (Бондарцева, 1998), «East Asian Polypores» (Nunez, Ryvardeen, 2000), Трутовые грибы Финляндии и прилегающей территории России (Ниемеля, 2001), Грибы: Определитель (Лессо, 2003), Атлас грибов: Определитель видов (Кибби, 2009). Название обнаруженных видов грибов приведены в соответствии с базой данных международного проекта Index Fungorum (<http://www.indexfungorum.org>).

**Пробоподготовка и определение ТМ.** Собранные плодовые тела грибов высушивали при температуре 70°C до постоянного веса и размалывали до

однородной массы с помощью лабораторной мельницы. Полученные образцы хранили в zip-пакетах для предотвращения набора влаги. Пробы древесины отбирали при помощи сверла и аккумуляторной дрели, путем высверливания керна на глубину до 7 см. Пробы почвы отбирали из поверхностного слоя 0–5 см методом конверта с площади 100 кв. м. Навески каждого из субстратов, массой 1 г, помещали в муфельную печь при 450°C, для озоления. Валовое содержание  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  в плодовых телах грибов и древесине определяли на атомно-абсорбционном спектрометре Shimadzu-AA-6800, с предварительным растворением зольного остатка в 1 мл 1 М HCl (Отмахов и др., 2004). Пробы почвы анализировали тоже методом атомно-абсорбционной спектрометрии, предварительно экстрагируя воздушно-сухие образцы аммонийно-ацетатным буфером (рН 4,8) (Воробьева, 2006).

**Лабораторные опыты по абсорбции ТМ из растворов.** Мицелий гриба *T. versicolor* БИН 2263 выращивали в погруженной культуре на пивном сусле, разведённом до 4° Баллинга. В жидкую среду добавляли, в зависимости от варианта, различные концентрации солей меди (13–40 мг/л), цинка (10–70 мг/л) или свинца (20–200 мг/л) в пересчёте на катионы металла. Контролем служил вариант без добавления ТМ. Каждый вариант закладывали в трёх повторениях. Культивировали гриб на качалке (120 об./мин) в течение 7 сут при комнатной температуре. Биомассу гриба отделяли центрифугированием, трёхкратно промывали дистиллированной водой, высушивали при 70°C и измеряли гравиметрически. Содержание ТМ в мицелии определяли атомно-абсорбционным методом после озоления в муфельной печи с последующим растворением зольного остатка в 1М HCl. Учет и анализ данных вели при помощи электронного каталога, построенного на основе программы Microsoft Excel. Статистическую обработку результатов проводили стандартными методами с использованием возможностей программы (Лакин, 1990; Зайцев, 1973). При обработке полученных данных применяли одномерный анализ вариационных рядов (средние величины признака и их ошибки ( $M \pm m$ )). Рассчитывали коэффициенты накопления ( $K_n$ ) как отношение концентрации

ТМ в базидиомах грибов к концентрации его в субстрате (почве или древесине). Частоту встречаемости грибов определяли как отношение числа экотопов, в которых гриб обнаружен, к числу всех обследованных экотопов, %. Для определения степени сходства микобиоты различных экотопов использовали индекс Сьёренсена-Чекановского ( $K_s$ ), рассчитываемый по формуле  $K = \frac{2c}{a+b}$ , где  $a$  и  $b$  — число видов, обнаруженных в каждом из сравниваемых экотопов,  $c$  — число общих для них видов.

### Глава 3 Результаты исследований и их обсуждение

**3.1 Таксономический состав и эколого-трофическая структура сообществ базидиомицетов.** На территории парков и скверов г. Кирова обнаружено 56 видов базидиомицетов, принадлежащих к 4 порядкам (*Agaricales*, *Boletales*, *Polyporales*, *Russulales*), и 25 семействам (*Agaricaceae*, *Amanitaceae*, *Boletaceae*, *Bondarzewiaceae*, *Cortinariaceae*, *Entolomataceae*, *Fomitopsidaceae*, *Ganodermataceae*, *Hymenogastraceae*, *Inocybaceae*, *Marasmiaceae*, *Meripilaceae*, *Meruliaceae*, *Mycenaceae*, *Paxillaceae*, *Physalacriaceae*, *Pleurotaceae*, *Pluteaceae*, *Polyporaceae*, *Psathyrellaceae*, *Russulaceae*, *Sclerodermataceae*, *Strophariaceae*, *Suillaceae*, *Tricholomataceae*) (табл. 2).

Таблица 2 – Сравнительный анализ базидиомицоты в различных экотопах г. Кирова и фоновой территории

Сравниваемый показатель	Экотопы города						Суммарно в городе	Фон п. Порошино
	сквер комбината «ИСКОЖ»	парк им. Ю.А. Гагарина	парк Победы	Александровский сад	аллея на площади Лепсе	парк им. С.М. Кирова		
Количество порядков	4	2	4	3	4	4	4	4
Количество семейств	8	9	12	13	8	15	25	15
Количество родов	10	13	17	17	8	20	41	22
Количество видов	10	13	20	20	8	21	56	25

На фоновой территории (пос. Порошино) было обнаружено 25 видов базидиомицетов, принадлежащих к 4 порядкам (*Agaricales*, *Cantharellales*, *Polyporales*, *Russulales*) и 15 семействам (*Agaricaceae*, *Amanitaceae*,

*Entolomataceae, Fomitopsidaceae, Hydnaceae, Hydangiaceae, Hymenogastraceae, Marasmiaceae, Omphalotaceae, Polyporaceae, Physalacriaceae, Russulaceae, Strophariaceae, Stereaceae, Tricholomataceae*) (рис. 2).

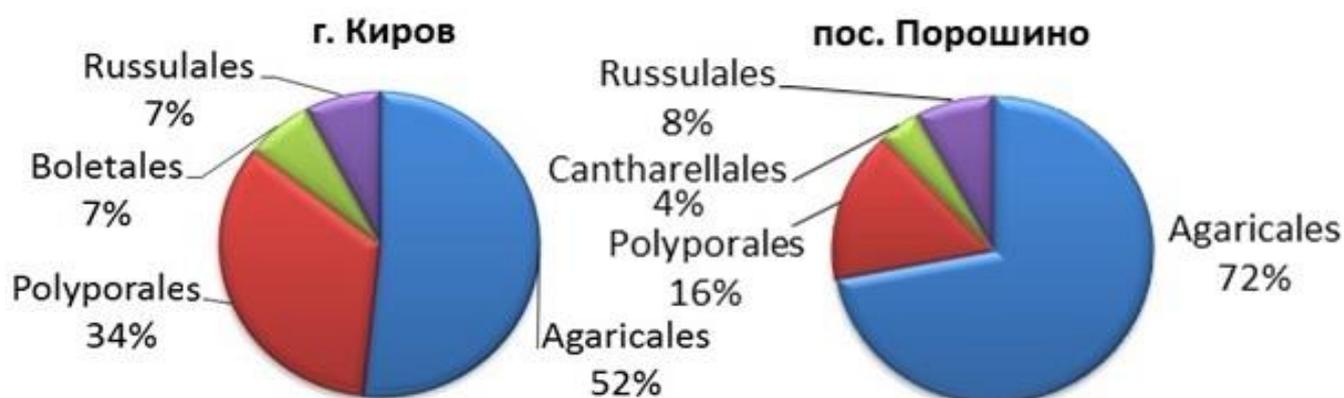


Рисунок 2 – Долевое соотношение представителей различных порядков в парках и скверах (г. Киров) и в загородном лесу фоновой территории (пос. Порошино)

Среди всех обнаруженных видов (73 вида базидиомицетов) только 8 видов встречались одновременно в городских экотопах и фоновой территории (лесного массива пос. Порошино). Наибольшее количество общих видов принадлежит порядку Agaricales (*Agaricus bisporus*, *Flammulina velutipes*, *Gymnopus dryophilus*, *Hebeloma mesophaeum*, *Megacollybia platyphylla*, *Pholiota aurivella*, *Tricholoma terreum*). Из представителей порядка Polyporales общим был вид *Daedaleopsis confragosa*. Биота базидиомицетов в городе характеризуется более богатым видовым разнообразием, чем биота фоновой территории. С наибольшей частотой в городе встречались микоризообразующие виды *T. terreum* (100%), *Paxillus involutus* (66%) и ксилотроф *Bjerkandera adusta* (83%).

Для оценки степени сходства между микобиотой в различных экотопах использовали индекс Сёренсена-Чекановского ( $K_s$ ). Установлена высокая специфичность таксономического состава базидиомицетов в каждом из экотопов.  $K_s$  имели низкие значения, изменяясь от 0,13 до 0,39 (табл. 3). Низкое сходство может объясняться разным возрастом древостоев в обследованных парках и скверах, который варьирует от 50 лет в парке им. С.М. Кирова до 200 лет в Александровском саду. Максимальные различия выявлены между

сообществами базидиомцетов фоновой территории и базидиомикотой парка им. Ю.А. Гагарина ( $K_s = 0,11$ ), а также сквера комбината «ИСКОЖ» ( $K_s = 0,11$ ).

Таблица 3 – Матрица степени сходства ( $K_s$ ) между базидиомикотой в различных экотопах города и базидиомикотой фоновой территории

	Сквер комбината «ИСКОЖ»	Парк им. Ю.А. Гагарина	Парк Победы	Александровский сад	Аллея на площади Лепсе	Парк им. С.М. Кирова	Пос. Порошино (ФОН)
Сквер комбината «ИСКОЖ»		0,19	0,20	0,13	0,22	0,39	0,11
Парк им. Ю.А. Гагарина	0,19		0,24	0,24	0,19	0,35	0,11
Парк Победы	0,20	0,24		0,30	0,29	0,29	0,13
Александровский сад	0,13	0,24	0,30		0,29	0,34	0,18
Аллея на площади Лепсе	0,22	0,19	0,29	0,29		0,28	0,12
Парк им. С.М. Кирова	0,39	0,35	0,29	0,34	0,28		0,22
Пос. Порошино (ФОН)	0,11	0,11	0,13	0,18	0,12	0,22	

В разрезе отдельных эколого-трофических групп, наиболее многочисленной по количеству видов в городской среде была группа ксилотрофов (59%) (рис. 3).

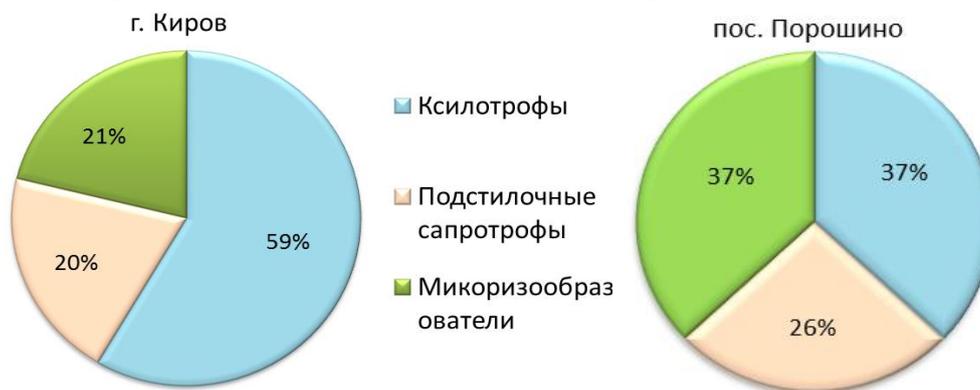


Рисунок 3 – Долевое соотношение видов из разных эколого – трофических групп в парках и скверах (г. Киров) и в загородном лесу фоновой территории (пос. Порошино)

В естественном лесу фоновой территории распределение видов по эколого-трофическим группам, напротив – относительно равномерное.

**3.2 Биоаккумуляция ТМ базидиомицетами.** Определение валового содержания  $Cu$ ,  $Zn$  и  $Pb$  в плодовых телах грибов, собранных на территории парков и скверов, показало, что величина сорбции варьирует в широких пределах в зависимости от

экотопа, вида гриба и от природы металла. Наиболее высоким содержанием ТМ (317,9 мкг/г) отличались плодовые тела грибов-микоризообразователей, собранных в промышленной зоне (аллея на пл. Лепсе) (табл. 4).

Таблица 4 – Средние значения суммарного накопления ТМ (мкг/г) в плодовых телах грибов из разных функциональных зон

Экотоп	Эколого-трофические группы		
	ксилотрофы	микоризообразователи	подстилочные сапротрофы
Промышленная зона			
Аллея на пл. Лепсе	118,7	317,9	н/о
Парк Победы	108,0	238,7	151,5
Рекреационная зона			
Александровский сад	105,0	233,0	112,2
Парк им. Ю.А. Гагарина	95,5	71,7	143,0
Транспортная зона			
Сквер комб. «ИСКОЖ»	269,7	281,4	303,8
Парк им. С.М. Кирова	111,5	196,9	153,0
Фоновая территория			
Пос. Порошино (ФОН)	78,2	152,3	214,8

Сопоставление данных по содержанию ТМ в плодовых телах грибов из различных эколого – трофических групп и субстрате (почве) (табл. 1) позволяет заключить, что суммарное накопление ТМ увеличивается в плодовых телах грибов всех эколого – трофических групп в направлении с юго-, юго-запада на северо-восток, аналогично ранее отмеченному для почв. Коэффициенты корреляции между содержанием ТМ в почве и их суммарным накоплением в базидиомах микоризообразователей и ксилотрофов составили соответственно 0,31 и 0,46, что говорит о наличии слабой положительной связи между этими величинами, тогда как для подстилочных сапротрофов такая связь не установлена ( $r = -0,04$ ). Уровень накопления ТМ в базидиомах, в первую очередь, зависел от природы металла. Так, для видов всех эколого-трофических групп наиболее высокие значения аккумуляции были отмечены в отношении цинка (рис. 4). В меньших количествах плодовые тела грибов сорбировали из городской среды Си и Рb. Данная закономерность наблюдалась во всех обследованных экотопах, в том числе, и на фоновой территории. Группа микоризообразователей характеризуется в среднем более высокими концентрациями Zn и Рb (163,7 и

18,1 мкг/г), чем ксилотрофы и подстилочные сапротрофы. Максимальные значения цинка отмечены у следующих микоризообразующих видов (мкг/г): *P. involutus* – до 293,3, *T. terreum* – до 286,0, *Hebeloma crustuliniforme* – 253,8;

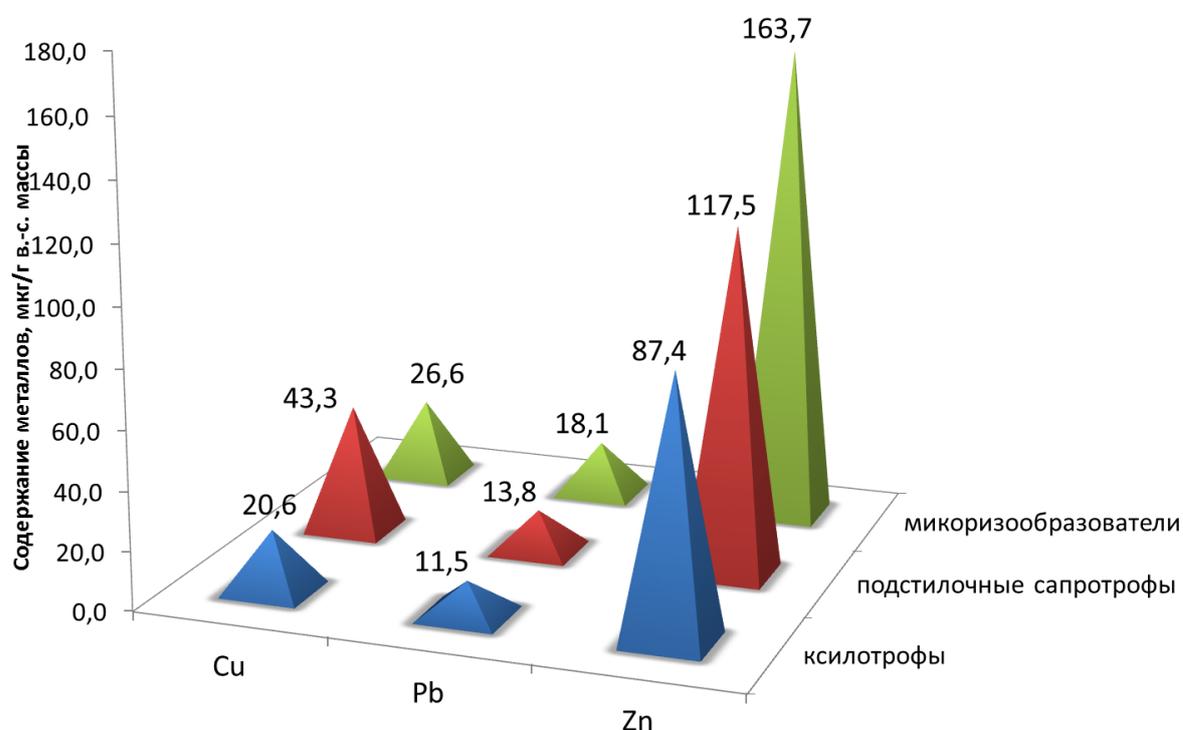


Рисунок 4 – Усредненные данные по биоаккумуляции ТМ базидиомицетами свинца: *T. terreum* – 147,8; *T. sciodes* – 60,2; меди: *Infundibulicybe geotropa* – 74,1, *P. involutus* – 71,6. Виды, накапливающие высокие концентрации цинка, из группы подстилочных сапротрофов (мкг/г): *Clitocybe rivulosa* – 276,1, *C. phyllophila* – 210,1, *A. bisporus* – 201,5. Подстилочные сапротрофы накапливали также наибольшие концентрации меди (мкг/г): *A. bisporus* – 173,8; *Lycoperdon perlatum* – 129,8. Свинец в максимальных концентрациях в группе был отмечен у вида *Melanoleuca polioleuca* – 121,1 мкг/г. Несмотря на то, что в среднем ксилотрофы уступали видам других эколого-трофических групп в накоплении цинка, среди них также встречались виды с высоким содержанием этого элемента в базидиомах (мкг/г): *B. adusta* – 247,6; *Heterobasidion annosum* – 243,5; свинца: *H. annosum* – 58,8; *Armillaria ostoyae* – 53,0; меди: *Trametes hirsuta* – 90,6; *Coprinellus disseminatus* – 72,5.

Расчет Кн металлов для представителей разных эколого-трофических групп показал, что все базидиомицеты в городской среде активнее всего

концентрируют из субстратов медь, затем цинк и, в последнюю очередь — свинец (рис. 5). В разрезе отдельных эколого-трофических групп ксилотрофы характеризовались меньшими значениями коэффициентов накопления ТМ (Кн от 2,8 до 9,2 в зависимости от металла), по сравнению с

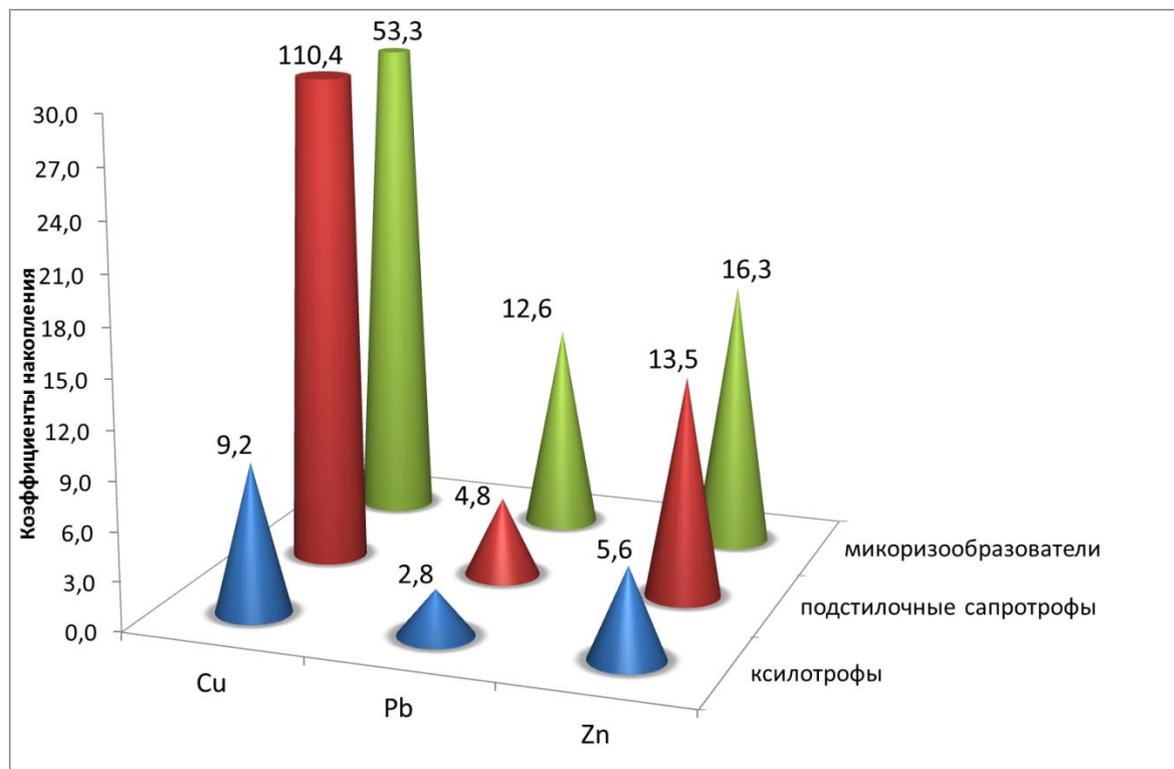


Рисунок 5 – Усредненные данные по коэффициентам накопления ТМ базидиомицетами из разных эколого – трофических групп

микоризообразователями (Кн от 12 до 53) и подстилочными сапротрофами (Кн от 5 до 110). При анализе Кн у микоризообразующих видов отмечали наибольшую способность к биоаккумуляции меди, несмотря на ее низкую, в сравнении с другими металлами, концентрацию в плодовых телах. Максимальные Кн меди имели виды: *P involutus* – 511,4; *T. terreum* – 148,3; *H. crustuliniforme* – 139,1. По способности сорбировать из субстратов цинк микоризообразователи (Кн 16) и подстилочные сапротрофы (Кн 13) в среднем различались несущественно. Наибольшие Кн цинка отмечены у видов: *T. fulvum* – 45,7; *H. mesophaeum* – 33,8; *T. album* – 33,8. Кроме того, микоризообразующие виды характеризовались, по сравнению с видами других эколого-трофических групп, в 2,5-4 раза более высокими Кн свинца: *T. terreum* – 97,2; *T. sciodes* – 84,8; *P. involutus* – 76,4. Подстилочные сапротрофы отличались от других эколого -

трофических групп базидиомицетов самыми высокими Кн меди (в среднем 110) (*A. bisporus* – 1241,7; *M. polioleuca* – 452,1; *Coprinus comatus* – 135,5 и *L. perlatum* – 129,8). Среди часто встречающихся в городской среде видов, максимальным содержанием меди отличался *A. bisporus* (173,8 мкг/г), свинца – *T. terreum* (147,7 мкг/г), цинка – *P. involutus* (293,3 мкг/г) (табл. 5).

Таблица 5 – Накопление ТМ в плодовых телах базидиомицетов, характеризующихся высокой ( $\geq 50\%$ ) частотой встречаемости в городских экотопах

Виды грибов	Содержание элементов, мкг/г в.-с. массы			Кн (среднее)		
	Cu	Pb	Zn	Cu	Pb	Zn
<i>Tricholoma terreum</i> (*М)	$\frac{17,3}{10,9 - 23,6}$	$\frac{35,0}{0,0 - 147,7}$	$\frac{185,3}{17,0 - 286,0}$	36,06	17,46	16,79
<i>Bjerkandera adusta</i> (*К)	$\frac{14,3}{1,2 - 36,0}$	$\frac{10,8}{0,0 - 23,7}$	$\frac{96,7}{23,1 - 247,6}$	2,98	1,48	6,04
<i>Paxillus involutus</i> (*М)	$\frac{40,3}{13,1 - 71,6}$	$\frac{18,8}{1,0 - 54,2}$	$\frac{224,1}{139,4 - 293,3}$	123,16	16,65	16,81
<i>Agaricus bisporus</i> (*П)	$\frac{79,5}{38,1 - 173,8}$	$\frac{15,2}{0,9 - 20,0}$	$\frac{116,1}{21,7 - 201,5}$	360,68	4,26	12,00
<i>Pholiota aurivella</i> (*К)	$\frac{23,1}{6,3 - 50,2}$	$\frac{17,3}{9,6 - 28,7}$	$\frac{43,9}{30,7 - 70,7}$	8,63	3,50	4,05
<i>Cerioporus squamosus</i> (*К)	$\frac{18,6}{7,4 - 41,0}$	$\frac{13,5}{3,4 - 22,0}$	$\frac{65,1}{10,8 - 192,3}$	2,56	0,55	3,19
<i>Heterobasidion annosum</i> (*К)	$\frac{23,0}{1,7 - 46,3}$	$\frac{16,4}{0,0 - 58,8}$	$\frac{130,5}{41,0 - 243,5}$	8,04	1,92	5,81
<i>Postia stiptica</i> (*К)	$\frac{8,9}{3,0 - 13,6}$	$\frac{13,0}{0,0 - 19,7}$	$\frac{54,9}{12,1 - 136,9}$	0,90	0,52	2,83
<i>Trametes gibbosa</i> (*К)	$\frac{15,9}{8,0 - 29,6}$	$\frac{7,3}{0,0 - 12,4}$	$\frac{46,0}{9,1 - 80,0}$	6,12	1,84	3,44
<i>Trametes versicolor</i> (*К)	$\frac{9,2}{2,5 - 12,7}$	$\frac{12,5}{0,0 - 30,2}$	$\frac{80,3}{62,8 - 97,7}$	3,58	3,30	6,26

Примечание: в числителе – среднее значение в плодовых телах (мкг/г), в знаменателе – минимум и максимум. \*М – микоризообразователь, \*К – ксилотроф, \*П – подстилочный сапротроф.

Установлена положительная корреляция между содержанием свинца в базидиомах из различных экотопов *T. terreum* ( $r=0,8$ ), а также цинка – в *P. involutus* ( $r=0,52$ ) и содержанием металлов в субстрате. Показана значимость эколого-трофической специализации базидиомицетов как фактора, способного влиять на состав элементов-загрязнителей в плодовых телах базидиомицетов (рис. 6).

Способность накапливать медь возрастала в ряду ксилотрофы – микоризообразователи – подстилочные сапротрофы.

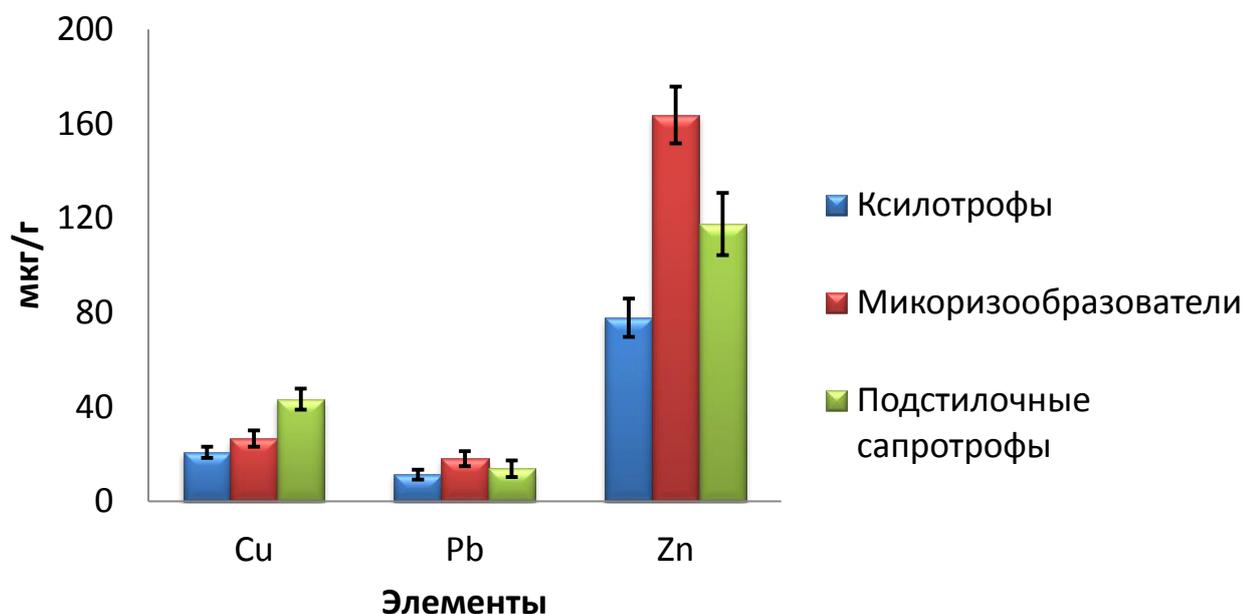


Рисунок 6 – Усредненные концентрации ТМ в плодовых телах базидиомицетов из разных эколого - трофических групп

Ксилотрофные виды базидиомицетов накапливают меньшее количество Cu, Pb и Zn чем представители других эколого-трофических групп. Микоризообразователи же, наоборот, способны накапливать Zn и Pb в бóльших количествах, чем другие виды.

**3.3 Особенности роста и извлечения ТМ мицелиальной культурой *Trametes versicolor*.** В условиях погружённой качалочной культуры у *T. versicolor* наблюдали формирование иного морфотипа мицелия, чем при росте на плотных средах. Культура, в отличие от гомогенной волокнистой формы роста на суслоагаре, в жидкой среде того же состава образовывала обильно опушённые округлые или продолговатые структуры – пеллеты. В присутствии свинца, цинка и меди морфология пеллет изменялась различным образом. При добавлении в среду  $Pb^{2+}$  образовывались пеллеты двух морфологических типов: сферические или яйцевидные, диаметр которых мог достигать 4–7 мм, и более крупные пеллеты сложного строения, состоящие из 5–8 субъединиц, заканчивающихся длинными периферическими отростками (рис. 7, Б). В присутствии  $Cu^{2+}$  и  $Zn^{2+}$  пеллеты становились гладкими с более плотной структурой и меньшими размерами (до 2–

3 мм в вариантах с медью, до 1–2 мм в вариантах с цинком) и были достаточно однородны по своему объёму (рис. 7, В и Г). Наряду с морфологией, в погруженной культуре под влиянием ТМ изменялись также темпы роста гриба.

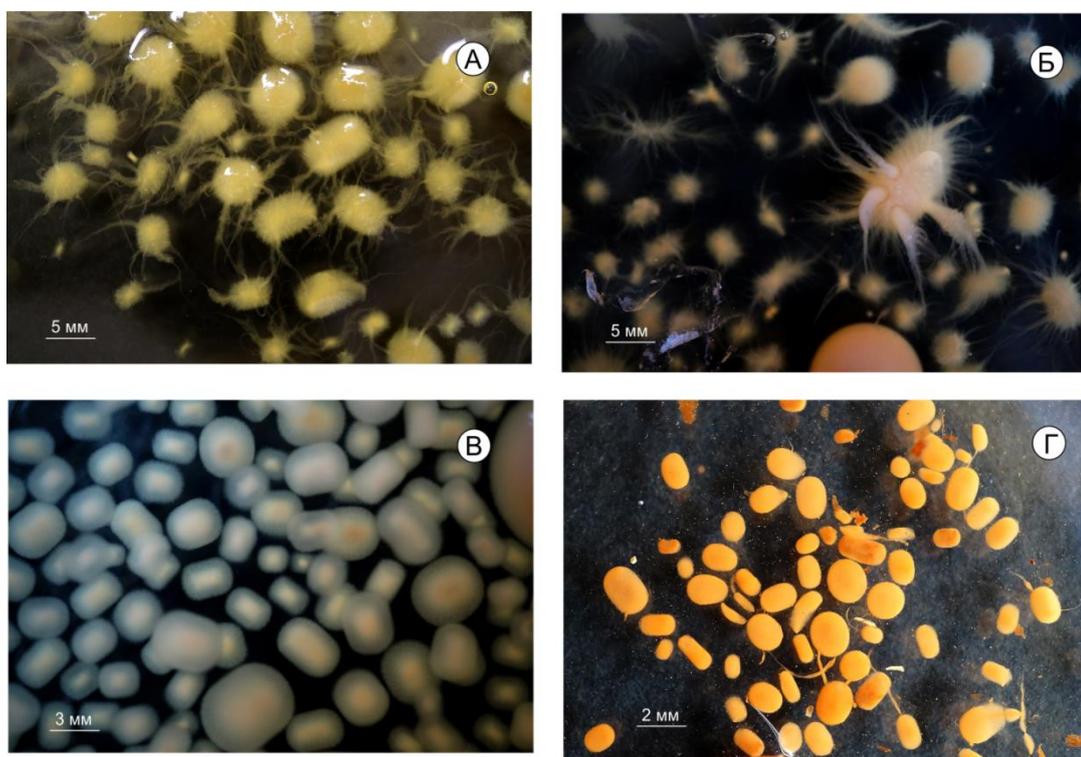


Рисунок 7 – Морфология мицелия *T. versicolor* в погружённой культуре в зависимости от наличия в среде ионов металлов: А – контроль, Б –  $Pb^{2+}$ , В –  $Cu^{2+}$ , Г –  $Zn^{2+}$

Количество формируемой грибом биомассы зависело от природы добавленного в питательную среду металла и его концентрации. Достоверное снижение в накоплении биомассы вызывало добавление в среду свинца в количестве 40 мг/л, меди – 40 мг/л, цинка – 70 мг/л (рис. 8, А, Б, В). Степень извлечения металлов из растворов была также различной, в зависимости от природы металла, и снижалась в порядке  $Pb^{2+} > Zn^{2+} > Cu^{2+}$ , составив для свинца 42%, для цинка и меди 14 и 10% соответственно. Это согласуется с представлениями о высокой избирательности грибов в связывании различных металлов. Между количеством сорбированных грибом металлов и величиной накопления мицелиальной биомассы зависимости не установлено. Сорбция грибным мицелием токсичных ионов увеличивалась параллельно увеличению исходной концентрации ионов металлов в жидкой среде. Полученные результаты дают основание рассматривать штамм *T. versicolor* БИН 2263 в качестве кандидата

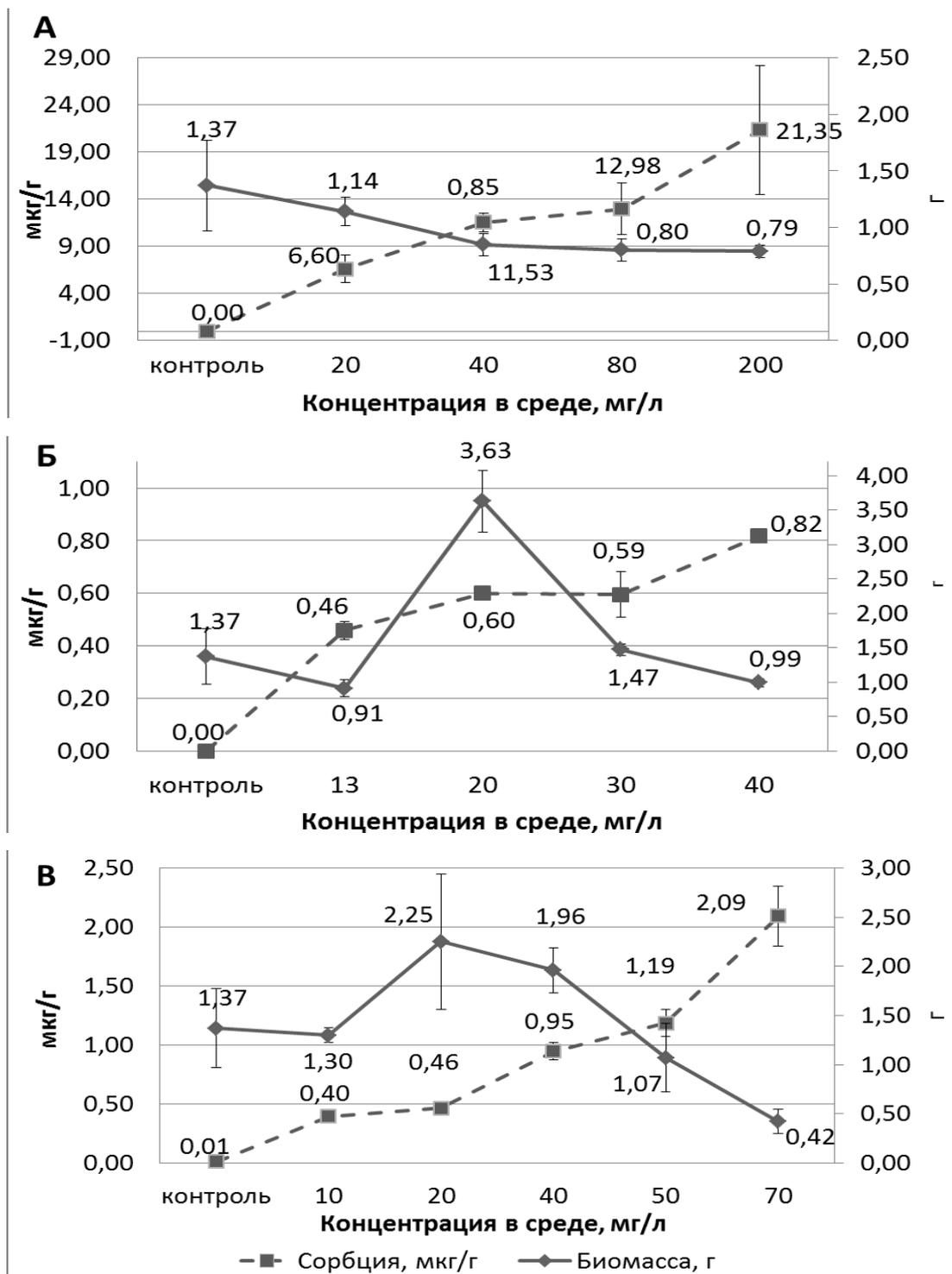


Рисунок 8 – Накопление биомассы и количество сорбированного металла грибом *T. versicolor* 2263 при выращивании в погруженной культуре с добавлением ионов  $Pb^{2+}$  – А,  $Cu^{2+}$  – Б и  $Zn^{2+}$  – В

на роль сорбента для селективного удаления ионов металлов (свинца в первую очередь) из загрязненных ими растворов. Склонность данного гриба к росту в погруженной культуре в форме пеллет обеспечивает ему дополнительные преимущества при сепарации мицелия, как перспективному биотехнологическому агенту.

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что в условиях подзоны южной тайги европейского северо-востока, биота базидиальных макромицетов в парках и скверах индустриально развитого города по таксономическому разнообразию превосходит биоту фоновой территории. В городских экотопах выявлено 56 видов из 25 семейств, относящихся к 4 порядкам, тогда как в удаленном на 10 км от города природном лесном массиве обнаружено лишь 25 видов из 15 семейств, также относящихся к 4 порядкам.

2. Показано, что в эколого-трофической структуре базидиомицетов в городской среде доминируют ксилотрофы (59 %), тогда как в структуре базидиомицоты фоновой территории ксилотрофы, подстилочные сапротрофы и микоризообразователи представлены приблизительно в равных долях (37, 26 и 37% соответственно).

3. Выявлено отсутствие четко выраженной связи между аккумуляцией тяжелых металлов (меди, цинка и свинца) плодовыми телами большинства базидиальных макромицетов (за исключением *Paxillus involutus*, *T. terreum*) и содержанием металла в субстрате. Проведенный корреляционный анализ между величиной накопления ТМ в плодовых телах, собранных в различных экотопах, и содержанием этих же металлов в субстрате, показал практически отсутствие связи ( $r = 0,12-0,17$ ) между этими показателями.

4. На основе расчета коэффициентов накопления выявлены виды-аккумуляторы меди (Кн): *A. bisporus* – 1241,67, *P. involutus* – 511,43, *M. polioleuca* – 452,14, *T. terreum* – 148,33, цинка *T. fulvum* – 45,73, *Clitocybe phyllophila* – 43,41, *Gymnopus dryophilus* – 37,24, *T. fulvum* – 45,73, *H. mesophaeum* – 33,82, *T. album* – 33,76 и свинца *T. terreum* – 97,21, *T. sciodes* – 84,75, *P. involutus* – 76,36, *Armillaria ostoyae* – 74,58, *Pholiota aurivella* – 40,42. Виды-аккумуляторы, имеющие высокую частоту встречаемости ( $\geq 50\%$ ) в условиях города: *T. terreum*, *P. involutus* и *A. bisporus* можно использовать в биоиндикации загрязнения урбоэкосистем ТМ.

5. Концентрация химических элементов в базидиомах зависела от природы самого химического элемента; медь (до 173,8 мкг/г) и цинк (до 293,3 мкг/г) накапливались в большем количестве, чем свинец (до 104,1 мкг/г), а также от биологических особенностей видов. Установлено, что максимальным суммарным содержанием металлов (424,3 мкг/г) в условиях города характеризуются базидиомы *T. terreum* –из группы микоризообразователей, а минимальным - *Trametes gibbosa* (29,5 мкг/г) из группы ксилотрофов.

6. Изучено влияние ТМ на рост гриба *T. versicolor* 2263 в погруженной качалочной культуре и проведено его тестирование на способность связывать ионы свинца, меди и цинка. Полученные результаты дают основание рассматривать штамм *T. versicolor* 2263 в качестве перспективного кандидата на роль сорбента для селективного удаления ионов металлов (свинца в первую очередь) из загрязненных ими растворов. Склонность данного гриба к росту в погруженной культуре в форме пеллет обеспечивает ему дополнительные преимущества при сепарации мицелия, как перспективному биотехнологическому агенту.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в научных журналах, включенных в перечень ВАК РФ*

1. **Попыванов Д.В.** Накопление свинца, меди и цинка базидиомицетами разных эколого-трофических групп в парках г. Кирова /Д.В. Попыванов, А.А. Широких //Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 2. С. 25-31.
2. Широких А.А. Биосорбция Pb(II), Zn(II) и Cu(II) из водных растворов мицелием *Trametes versicolor* / А.А. Широких, **Д.В. Попыванов**, И.Г. Широких // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 2. С. 98-105.

### *Статьи в других научных изданиях*

3. **Попыванов Д.В.** Накопление свинца, меди и цинка базидиомицетами разных эколого-трофических групп в парках г. Кирова /Д.В. Попыванов, А.А. Широких//Современная микология в России: Матер. III междунар. микологического форума. Том 4. (г. Москва, 14-15 апреля 2015 г.). М.: Национальная акад. микологии. 2015. С. 253-255.
4. **Попыванов Д.В.** Накопление свинца, меди и цинка ксилотрофными базидиомицетами в парках города Кирова / Д.В. Попыванов, А.А. Широких // Актуальные проблемы региональной экологии и биодиагностика живых систем:

- Материалы XIII Всерос. научн.-практ. конф. с междунар. участием. Книга 1. (г. Киров, 1-2 декабря 2015 г.). Киров: Изд-во ООО «Веси». 2015. С. 290-293.
5. **Попыванов Д.В.** Влияние тяжелых металлов на рост мицелия *Trametes versicolor in vitro* / Д.В. Попыванов, А.А. Широких // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: материалы XIV Всерос. научн.-практ. конф. с междунар. участием. Книга 2. (г. Киров, 5-8 декабря 2016 г.). Киров: Изд-во ООО «Радуга-ПРЕСС». 2016. С. 125-129.
  6. **Попыванов Д.В.** Накопление свинца, меди и цинка микоризообразующими базидиомицетами в парках г. Кирова / Д.В. Попыванов, А.А. Широких // Экология родного края: проблемы и пути их решения: Сб. материалов Всерос. научн.-практ. конф. с междунар. участием. Книга 1. (г. Киров 28–29 апреля 2016 г.). Киров: Изд-во ООО «Радуга-ПРЕСС». 2016. С. 164-166.
  7. Широких И.Г. Накопление тяжелых металлов базидиомицетами разных эколого-трофических групп в урбозкосистеме/И.Г. Широких, **Д.В. Попыванов**, А.А. Широких // Биология, систематика и экология грибов и лишайников в природных экосистемах и агрофитоценозах: Матер. II Междунар. науч. конф. (г. Минск, д. Каменюки 20-23 сентября 2016 г.). Минск: Изд-во «Колорград». 2016. С. 292-296.
  8. **Попыванов Д.В.** Накопление свинца, меди и цинка сапротрофными базидиомицетами в парках города Кирова / Д.В. Попыванов // Актуальные проблемы биологии и экологии: материалы докладов XXIII Всерос. молодежной научной конференции (с элементами научной школы). (г. Сыктывкар, 04-08 апреля 2016 г.). Сыктывкар: Изд-во Ин-та биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2016. С. 207-210.
  9. **Попыванов Д.В.** Особенности поглощения свинца, меди и цинка грибом *Trametes versicolor* из растворов /Д.В. Попыванов, А.А. Широких, И.Г. Широких //Современная микология в России: Матер.4-го Съезда микологов России. (г. Москва, 12-14 апреля 2017 г.). М.: Изд-во Общероссийской общественной организации "Общественная национальная академия микологии" (Москва). 2017. С. 237-239.
  10. **Попыванов Д.В.** Накопление тяжёлых металлов базидиомицетами макромицетов в урбозкосистеме г. Кирова /Д.В. Попыванов, А.А. Широких, И.Г. Широких // Матер. IV (XII) Междунар. ботанической конф. молодых учёных в Санкт-Петербурге 22–28 апреля 2018 года. СПб.: БИН РАН. 2018. С. 214-215.
  11. **Попыванов Д.В.** Видовое разнообразие ксилотрофных базидиомицетов в парках г. Кирова / Д.В. Попыванов, А.А. Широких, И.Г. Широких // Общество. Наука. Инновации (НПК-2018): сб. ст. XVIII Всерос. науч.-практ. конф. Том 1. (г. Киров, 2–28 апреля 2018 г.). Киров: Изд-во ВятГУ. 2018. С. 139-146.