

На правах рукописи



АНДРЕЕВА Маргарита Исааковна

**СОДЕРЖАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ КАДМИЯ В ПОЧВАХ
И БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ
ПРИВОЛЖСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ
В ПРЕДЕЛАХ ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ**

Специальность 03.02.08 – Экология (биология)

**А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук**

ПЕНЗА – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пензенский государственный университет» на кафедре «Техносферная безопасность»

Научный руководитель – доктор биологических наук, профессор
Иванов Александр Иванович

Официальные оппоненты: **Надежкина Елена Валентиновна**,
доктор биологических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Московский
авиационный институт
(национальный исследовательский
университет)», профессор кафедры
«Управление эксплуатацией
ракетно-космических систем»;

Скугорева Татьяна Геннадьевна,
кандидат биологических наук, доцент,
ФГБУН Институт биологии Коми
научного центра Уральского отделения
РАН, научный сотрудник лаборатории
биомониторинга

Ведущая организация – ФГБУН «Институт экологии
растений и животных
Уральского отделения РАН»,
г. Екатеринбург

Защита состоится 29 декабря 2020 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 999.222.03 на базе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва», ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского» по адресу: 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» и на сайте <https://dissov.pnzgu.ru/ecspertiza/biology/andreeva>

Автореферат разослан «_____» 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Леонова Наталья Алексеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Изучение биогеохимических циклов химических элементов является одной из важнейших проблем системной экологии. Особенно актуальны подобные исследования в отношении тяжелых металлов, обладающих сильной токсичностью, в частности, кадмия, соединение которого даже в ультрамалых концентрациях могут оказывать негативное воздействие на биологические объекты, включая человека. В результате загрязнения окружающей среды этим металлом изменяются его концентрации в природных средах и биологических объектах. Для того чтобы это фиксировать, необходимо опираться на фоновые количественные показатели содержания кадмия в окружающей среде, которые в настоящее время определены не для всех регионов России. Одним из них является Пензенская область и сопредельные регионы. Имеющиеся публикации касаются только почв, сельскохозяйственных угодий и продукции растениеводства (Вихрева и др., 2015). В связи с тем, что содержание кадмия в природных средах и биологических объектах различных геохимических провинций неодинаково, изучение этой проблемы в региональном аспекте представляет собой важную научную задачу теоретической и прикладной экологии.

Цель и задачи исследования. Целью работы было изучение фонового содержания кадмия в почвах и биологических объектах в условиях лесных экосистем Приволжской возвышенности в пределах Пензенской области.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Изучить содержание кадмия в серых лесных почвах, находящихся под лесной растительностью.
2. Дать количественную оценку содержания кадмия в грибах агарикомицетах, лишайниках, мхах, сосудистых растениях и изучить особенности накопления рассматриваемого элемента представителями различных экологических групп и жизненных форм этих организмов.
3. Оценить влияние использования лесных ресурсов на содержание кадмия в лесных экосистемах.
4. Определить содержание кадмия в основных видах съедобных грибов, дикорастущих лекарственных и пищевых растениях лесных экосистем.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Результаты изучения содержания кадмия в различных разновидностях серых лесных почв, находящихся под лесной растительностью, и закономерности его распределения по почвенным горизонтам.
2. Количественная оценка содержания кадмия в грибах агарикомицетах, лишайниках, мхах, сосудистых растениях и особенности накопления рассматриваемого элемента представителями различных экологических групп и жизненных форм этих организмов.
3. Характер влияния использования лесных ресурсов на содержание кадмия в лесных экосистемах.

Научная новизна. В результате выполненных работ впервые для лесных экосистем района исследований определены фоновые концентрации кадмия в различных разновидностях серых лесных почв, находящихся под лесной растительностью. Впервые исследован характер накопления этого элемента грибами агарикомицетами, лишайниками, мхами и сосудистыми растениями в условиях лесных экосистем Приволжской возвышенности, а также дана количественная оценка влияния использования лесных ресурсов на баланс кадмия в лесных экосистемах.

Теоретическое и практическое значение. Работа вносит определенный вклад в системную экологию. В ней рассматривается проблема содержания кадмия в почвах и различных компонентах биоты лесных экосистем, что является первым этапом изучения биогеохимического цикла этого токсичного элемента. Практическое значение диссертации заключается в том, что в результате исследований было установлено, что в почве, съедобных грибах, пищевых и лекарственных растениях лесных экосистем района исследований содержание кадмия не превышает принятых в России нормативов (ПДК, ОДК). Полученные данные о содержании кадмия могут быть использованы как базовые для организации систем экологического мониторинга. Результаты исследований используются в учебном процессе в Пензенском государственном университете и Пензенском государственном аграрном университете.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных методов исследования на поверенном оборудовании в лаборатории, имеющей аттестат государственной аккредитации (№ РОСС СОБ 7.00029.2017), а также результатами статистической обработки полученных данных с использованием программы *MicrosoftExcel* и при помощи статистического пакета *Past 3* (Hammer et al., 2001).

Личный вклад автора. Соискатель принимал активное участие в разработке программы исследований, самостоятельно осуществлял отбор проб, выполнил необходимый объем лабораторных исследований. Провел теоретическое обобщение экспериментальных материалов и сделал аргументированные выводы. Обобщил и проанализировал полученные результаты, которые опубликовал в статьях и представлял в виде докладов на научных конференциях.

Апробация работы. Основные результаты исследований доложены и опубликованы в материалах научных конференций «Экология родного края: проблемы и пути их решения» (Киров, 2015), «Биоразнообразие и экология грибов и грибоподобных организмов северной Евразии» (Екатеринбург, 2015), «Актуальные проблемы региональной экологии и биодиагностика живых систем» (Киров, 2015, 2017).

Публикация результатов исследований. По материалам исследований опубликовано 14 статей, в том числе 6 – в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК.

Характеристика работы. Диссертация изложена на 144 листах компьютерного текста, состоит из введения, трех глав, выводов, списка литературы, включающего 208 источников (из них 49 – на иностранных языках), и приложения. Работа иллюстрирована 24 рисунками и 51 таблицей.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Обзор литературы

В данной главе рассматривается состояние изученности токсичности кадмия, путей его попадания в природные среды и биологические объекты, а также характер его накопления в живых организмах различных систематических и экологических групп. Кроме того, в этой главе дается характеристика природных условий района исследований.

2. Объекты и методы исследований

Объектами исследований являлись лесные экосистемы Пензенской области. Содержание кадмия определялось в следующих их компонентах: почве, грибах агарикомицетах, сосудистых растениях, мхах и лишайниках. Исследования проводились с сентября 2015 по декабрь 2019 г. В качестве района исследований была выбрана восточная часть Пензенской области, на территории которой представлен весь спектр разновидностей серых лесных почв и сосредоточено максимальное биологическое разнообразие, свойственное лесным экосистемам Приволжской возвышенности (рисунок 1).

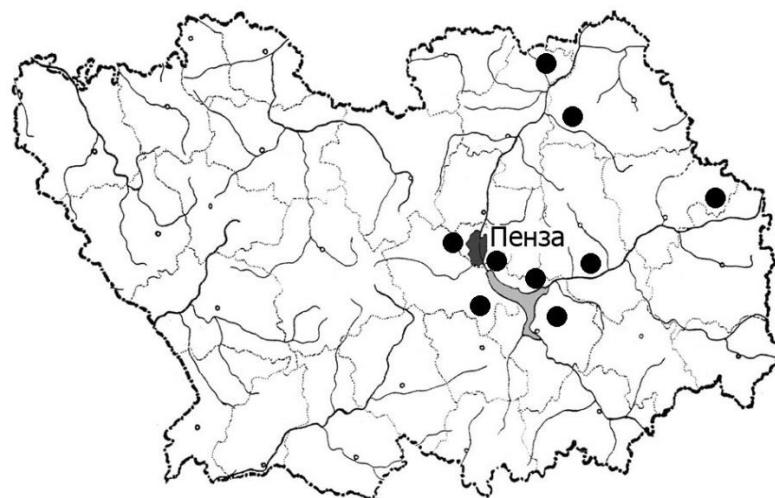


Рисунок 1 – Места отбора проб почвы и биоматериала
в различных районах Пензенской области

Анализ образцов почв и биоматериала выполнялся на атомно-адсорбционном спектрометре МГА-915 МД. Лабораторные исследования осуществляли на базе научно-исследовательской лаборатории филиала ФБУ «Федеральное управление по безопасному хранению и уничтожению химиче-

ского оружия при Министерстве промышленности и торговли РФ» (войсковая часть 70855) – 1206 объекта по хранению и уничтожению химического оружия (войсковая часть 21222).

Для количественной оценки способности накапливать кадмий нами производился расчет такого показателя, как коэффициент накопления (КН). Он представляет собой отношение содержания элемента в организме к его содержанию в почве или другом питающем субстрате.

Для сравнительной оценки данных по накоплению кадмия в биологических объектах и их субстратах проводили вычисления среднеарифметических значений (M), их стандартной ошибки (SE) и стандартного отклонения, или дисперсии (SD). Для выявления особенностей накопления кадмия в пределах жизненных форм и таксономических групп живых организмов выборки разных видов объединяли по их принадлежности к соответствующей группе. Поскольку числовые данные всех исходных выборок были различны, а вновь образующиеся выборочные совокупности оказались неоднородными, при их описании использовали значения медианы (Me), процентили (25, 75 %) и показатели *min–max*.

Для установления уровня сходства между разными типами почв применяли иерархический кластерный анализ с использованием алгоритма невзвешенного попарного сравнения на основе арифметического среднего (*UPGMA*) и дистанции Эвклида. В качестве меры репрезентативности, показывающей, насколько точно дендрограмма сохраняет попарные расстояния между исходными немоделированными точками данных, рассчитывали копенетическую корреляцию (*Rcoph*).

План наших исследований включал сравнения большого числа групп, поэтому был использован однофакторный дисперсионный анализ (*ANOVA*). Исходя из того, что данный анализ позволяет проверить лишь гипотезу о равенстве всех сравниваемых средних, для дальнейшего выяснения, где именно лежат различия, т.е. какие именно группы отличаются друг от друга, нами производился анализ множественного сравнения при использовании параметрического критерия Тьюки (*HSD*) и непараметрического критерия Краскела – Уоллиса (*KW-H*). Для возможности применения критерия Тьюки проводили проверку данных на однородность групповых дисперсий с помощью индекса Левинса. Критерий Тьюки считался применимым, если групповые дисперсии были однородны ($p > 0.05$).

Во всех случаях уровень различий считали значимым при пороге $p \leq 0.05$. Все расчеты осуществляли в программе *MicrosoftExcel* и при помощи статистического пакета *Past3* (Hammer et al., 2001).

3. Результаты исследований

3.1. Содержание кадмия в серых лесных почвах

Почва играет важнейшую роль в трансформации химических элементов в экосистемах. Именно она обеспечивает обмен атомами между неживым и

живым веществом экотопа и биоты. Среднее содержание кадмия для изученных в ходе исследований почв было низким и составило 153,3 мкг/кг. Оно оказывается в 3,3 раза ниже, чем в почвах мира; в 2,8 раза – чем в западных районах европейской части России и в 2,5 раза ниже, чем в почвах Семипалатинского Прииртышья (Виноградов, 1950; Пильгук, 2005; Лукин, Авраменко, 2008). Главной причиной этого является то, что рассматриваемые почвы формируются на осадочных породах, которые бедны кадмием. Как показали результаты измерений, в песчаных породах содержание данного металла в районе исследований было ниже среднего показателя для песчаников в 1,9 раза, а в бескарбонатных глинах ниже среднего показателя для глин в 7,7 раз (Виноградов, 1962; Кривитский, 1988; Протасова, Щербаков, 2004; Григорьева, 2007). Невысокий естественный фон содержания кадмия в почвах и подстилающих их породах следует считать особенностью геохимии района исследований.

Как показали результаты измерений, содержание кадмия в пробах почвы всех изученных районов выражалось близкими значениями. Исключение составил Бессоновский район, где содержание рассматриваемого элемента было несколько большим в связи с тем, что он находится на границе с той частью г. Пензы, где сосредоточены основные промышленные объекты с подветренной стороны, а также городской полигон ТБО.

В ходе исследований нами изучался характер распределения кадмия по почвенным горизонтам. Как показал анализ образцов, отобранных из горизонтов А различных разновидностей серых лесных почв, содержание в них кадмия в 4–5 раз ниже установленных ОДК. По валовому содержанию данного металла рассматриваемые почвенные разновидности отличаются друг от друга. Группу бедных кадмием образуют почвенные разновидности песчаного и супесчаного гранулометрического состава, относительно богатых – суглинистые и глинистые почвы.

Распределение кадмия по почвенным горизонтам в большинстве изученных разновидностей серых лесных почв имело один и тот же характер (рисунок 2). В легких светло-серых лесных почвах наблюдаются два типа распределения кадмия по почвенным горизонтам, которое зависит от мощности горизонта А и содержания в нем гумуса. В светло-серых лесных маломощных песчаных почвах, у которых мощность горизонта А не превышает 5 см, а содержание гумуса менее 1 % (Иванов, Кузин, 2017), концентрация рассматриваемого элемента была несколько выше в горизонте В. Это связано с тем, что горизонт А в данной почвенной разновидности обладает очень низкой поглотительной способностью, и кадмий свободно мигрирует вниз по почвенному профилю, задерживаясь за счет фиброзных прослоек глины в горизонте В. В светло-серых лесных супесчаных маломощных и среднемощных почвах мощность горизонта А составляет 8–15 см, а содержание гумуса – 1–1,5 %. Максимальное содержание кадмия в них наблюдается в горизонте А.

Такой же тип распределения рассматриваемого элемента характерен для су-глинистых и глинистых серых лесных почв.

Как показали результаты измерений, содержание рассматриваемого элемента в горизонте С во всех изученных почвенных разновидностях было значительно ниже, чем в горизонтах А и В, и выражалось близкими значениями.

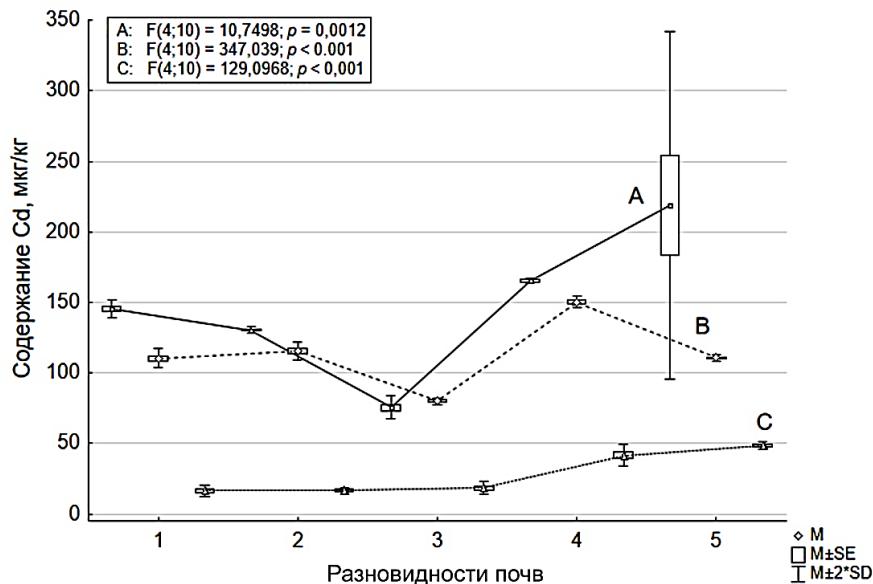


Рисунок 2 – Диаграмма размаха изменчивости содержания кадмия в различных разновидностях серых лесных почв по почвенным горизонтам (А, В, С) и результаты общего дисперсионного анализа.

Разновидности серых лесных почв: 1 – светло-серая лесная супесчаная

среднемоющая; 2 – светло-серая лесная супесчаная маломоющая;

3 – светло-серая лесная песчаная маломоющая; 4 – серая лесная легко суглинистая среднемоющая; 5 – серая лесная тяжелосуглинистая среднемоющая

3.2. Содержание кадмия в биологических объектах

Вовлечение соединений кадмия в биогенный круговорот в лесных экосистемах идет двумя путями. Первый – основной, происходит через микоризообразующие грибы, передающие рассматриваемый элемент через симбиотические структуры в растения, а также через активные корневые окончания последних. Второй путь связан с непосредственным поглощением кадмия из атмосферных выпадений лишайниками и мхами, не имеющими корневых систем и трофически не связанными с почвой.

Изученные представители различных систематических групп живых организмов существенно отличаются друг от друга по содержанию кадмия. Максимальные концентрации были зафиксированы для лишайников. Грибы агарикомицеты несколько уступали им по данному показателю. Достаточно высоким было содержание рассматриваемого элемента в талломах мхов. Сосудистые растения содержали кадмий в меньших концентрациях. При этом наибольший размах изменчивости медианных показателей был отмечен для грибов агарикомицетов (рисунок 3).

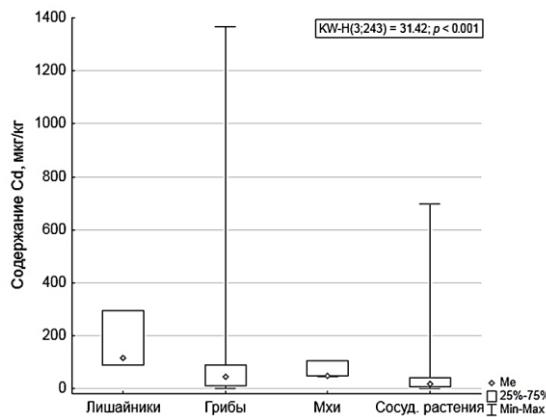


Рисунок 3 – Содержание кадмия (медиана, квартили и *min–max*) в биоматериале различных групп живых организмов и тест Краскела – Уолиса на различие между значениями медиан

3.2.1. Накопление кадмия грибами агарикомицетами

Поступление тяжелых металлов из почвы в биологические объекты в лесных экосистемах теснейшим образом связано с жизнедеятельностью грибов. По своей функциональной роли в лесных экосистемах их подразделяют на ряд эколого-трофических групп (Бурова, 1986). Для изучения закономерностей накопления кадмия грибами класса агарикомицетов (*Agaricomycetes*) было взято по десять наиболее распространенных видов, относящихся к эколого-трофическим группам, симбиотрофов, напочвенных сапротрофов и ксилотрофов.

Как показали результаты измерений, средний показатель содержания кадмия в плодовых телах наиболее распространенных видов агарикомицетов составил 119,6 мкг/кг. Однако в накоплении кадмия представителями различных эколого-трофических групп имеются некоторые особенности. Наиболее высокое значение содержания рассматриваемого элемента было определено для симбиотрофов, самое низкое – для ксилотрофов. Напочвенные сапротрофы по этому показателю заняли среднее положение (рисунок 4).

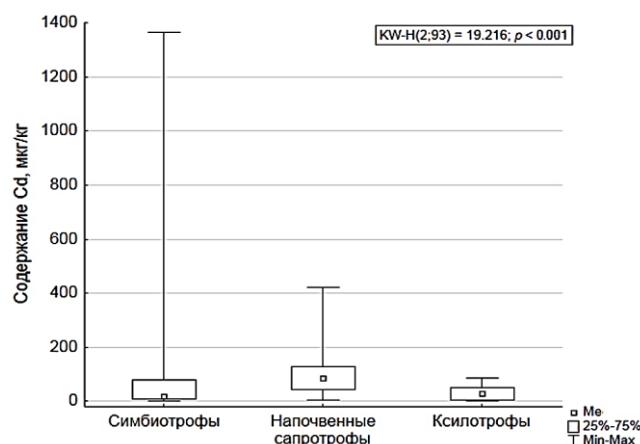


Рисунок 4 – Содержание кадмия (медиана, квартили и *min–max*) в плодовых телах грибов различных трофических групп и тест Краскела – Уолиса на различие между значениями медиан

В биогеохимических циклах химических элементов в лесных экосистемах умеренного пояса агарикомицеты, относящиеся к трофической группе симбиотрофов, играют особую роль. Это связано с тем, что большинству видов деревьев лесной и лесостепной зон Евразии свойственен микотрофный способ питания, и основной объем поступающих в растения микроэлементов идет через микоризы (Селиванов, 1981; Шубин, 1973).

В результате измерений было установлено, что среднее содержание кадмия в плодовых телах симбиотрофов в 1,6 раза превышает средний показатель для грибов агарикомицетов и составляет 193,8 мкг/кг. Однако различные виды накапливают рассматриваемый элемент в плодовых телах неодинаково. Согласно проведенному анализу сравнения, выявленные различия значений содержания кадмия в плодовых телах у большинства видов симбиотрофов оказались статистически значимыми (рисунок 5).

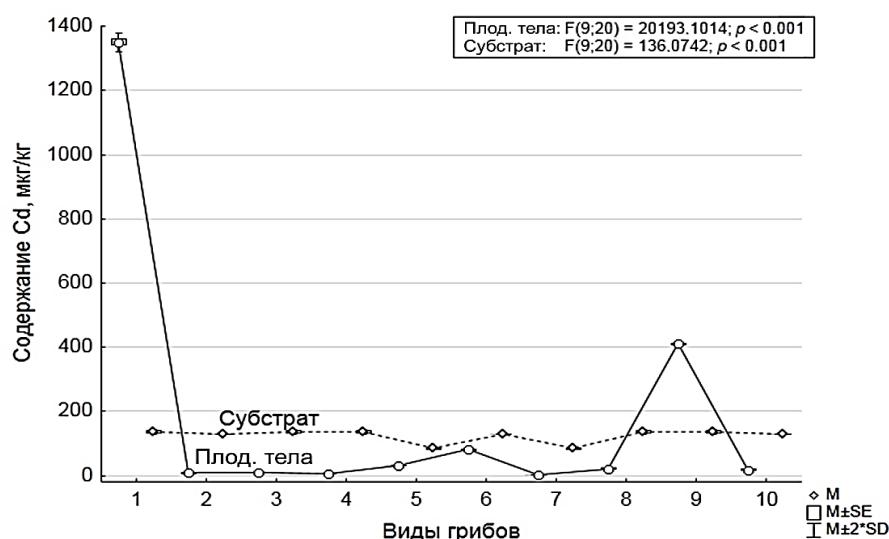


Рисунок 5 – Диаграмма средних значений содержания кадмия в плодовых телах симбиотрофов, их субстратах и результаты дисперсионного анализа. Виды грибов: 1 – *Amanitamuscaria*, 2 – *Lactariuspubescens*, 3 – *Leccinumaurantiacum*, 4 – *Paxillusobscurisporus*, 5 – *Royoporusbadius*, 6 – *Russulafoetens*, 7 – *Suillusbovinus*, 8 – *S. granulatus*, 9 – *Xerocomellusporosporus*, 10 – *Xerocomussubtomentosus*

Наиболее высокое содержание кадмия было зафиксировано для *Amanitamuscaria* – 1350 мкг/кг, минимальное – 3 мкг/кг для *Suillusbovinus*, т.е. максимальный показатель превысил минимальный в 450 раз. Коэффициент вариации концентраций кадмия в плодовых телах симбиотрофов составил 208 %. Это подтверждает то, что характер накопления кадмия в плодовых телях агарикомицетов имеет ярко выраженную видовую специфичность.

Накопление рассматриваемого элемента в первую очередь зависит от биологических особенностей отдельных видов, а не от его содержания в почве. Между содержанием кадмия в плодовых телях и их субстратах наблюдается слабая отрицательная корреляция, имеющая хорошую статистическую значимость.

Изученные виды симбиотрофов отличаются не только по содержанию кадмия, но и по активности его накопления. Суперконценратором кадмия является *Amanitamuscaria*. Определенный для этого вида КН составил 9,93. Это самый высокий показатель не только для симбиотрофов, но и для всех изученных нами грибов агарикомицетов. Накопителями кадмия являются также *Russulafoetens* и *Xerocomellusporosporus*. Для первого КН составил 1,38, для второго – 3,01. Остальные изученные виды симбиотрофов не являются биоконцентраторами кадмия, так как имеют КН менее 1.

Грибы-сапротрофы в качестве источника питания используют лигноцеллюлозные комплексы листового опада и древесного отпада. Они оказывают существенное влияние на подвижность и биодоступность химических элементов. С одной стороны они повышают ее путем их высвобождения из состава органического вещества при его разложении, с другой – снижают ее благодаря сорбции на поверхности мицелия, внутриклеточному поглощению и связыванию с экзометаболитами.

В результате измерений было установлено, что среднее содержание кадмия в плодовых телах напочвенных сапротрофов было в 1,1 раза выше среднего для грибов агарикомицетов показателя и составило 130,6 мкг/кг. Различные виды этих грибов накапливают рассматриваемый элемент в плодовых телах неодинаково. Выявленные различия значений для большинства видов напочвенных сапротрофов оказались статистически значимыми (см. рисунок 5).

Наиболее высокое содержание кадмия было зафиксировано для *Marasmiusscorodonius* – 420 мкг/кг, минимальное – 29 мкг/кг для *Agaricusarvensis*. Видовая специфичность в плане накопления рассматриваемого элемента у напочвенных сапротрофов менее выражена, чем у симбиотрофов. Коэффициент вариации концентраций кадмия в плодовых телах изученных видов составил 97 %, т.е. он был в 2,1 раза ниже, чем у микоризообразующих грибов.

Изученные виды напочвенных сапротрофов отличаются не только по содержанию кадмия, но и по активности его накопления. Наиболее высокие КН имеют *Gymnopusperonatus* и *Marasmiusscorodonius*. Им свойственны КН более 5. Такие виды, как *Agaricusarvensis*, *A. campestris*, *Clitocybebegibba*, *Macrolepiotaprocer* накапливают кадмий менее активно. Определенные для них в результате измерений КН составляют от 1,5 до 3,2. Остальные изученные виды напочвенных сапротрофов не являются биоконцентраторами кадмия, так как имеют КН менее 1.

В результате измерений было установлено, что по содержанию кадмия в плодовых телах ксилотрофы существенно уступают представителям рассмотренных выше трофических групп. Среднее содержание кадмия в биоматериале изученных видов было в 3,7 раза ниже среднего показателя для грибов агарикомицетов и составляет 34,6 мкг/кг. Однако различные виды грибов рассматриваемой экологической группы накапливают рассматриваемый элемент в плодовых телах неодинаково. Наиболее высокое содержание кадмия было зафиксировано для *Flammulinavelutipes* – 84,1 мкг/кг, минималь-

ное – 2,4 мкг/кг для *Fistulina hepatica*. Коэффициент вариации концентраций кадмия в плодовых телах изученных видов составил 95 %, т.е. он был близок к таковому у напочвенных сапротрофов.

Характер накопления кадмия в плодовых телах ксилотрофов имеет видовую специфичность. Это значит, что накопление рассматриваемого элемента в первую очередь зависит от биологических особенностей отдельных видов, а не от его содержания в питающем субстрате. Между содержанием кадмия в плодовых телах и их субстратах наблюдается слабая отрицательная корреляция (см. рисунок 4).

Изученные виды грибов ксилотрофов отличаются не только по содержанию кадмия, но и по активности его накопления. Наиболее высокие КН имеют *Flammulina velutipes* и *Fomes fomentarius*. Им свойственны КН более 2. Такие виды, как *Ganoderma applanatum*, *Pleurotus ostreatus* и *Trichaptum bidentatum* накапливают кадмий менее активно. Определенные для них КН находятся в интервале от 1,2 до 1,7. Остальные изученные виды дереворазрушающих грибов не являются биоконцентраторами кадмия, так как имеют КН менее 1.

3.2.2. Содержание кадмия в растениях

В ходе исследований нами изучалось содержание кадмия в вегетативных и репродуктивных органах растений различных жизненных форм: деревьев, кустарников и многолетних трав. В результате измерений было установлено, что наиболее активно кадмий накапливают деревья, наименее – травы. Кустарники по этому показателю занимают среднее положение. При этом деревьям свойственен наибольший диапазон изменчивости медианных показателей (рисунок 6).

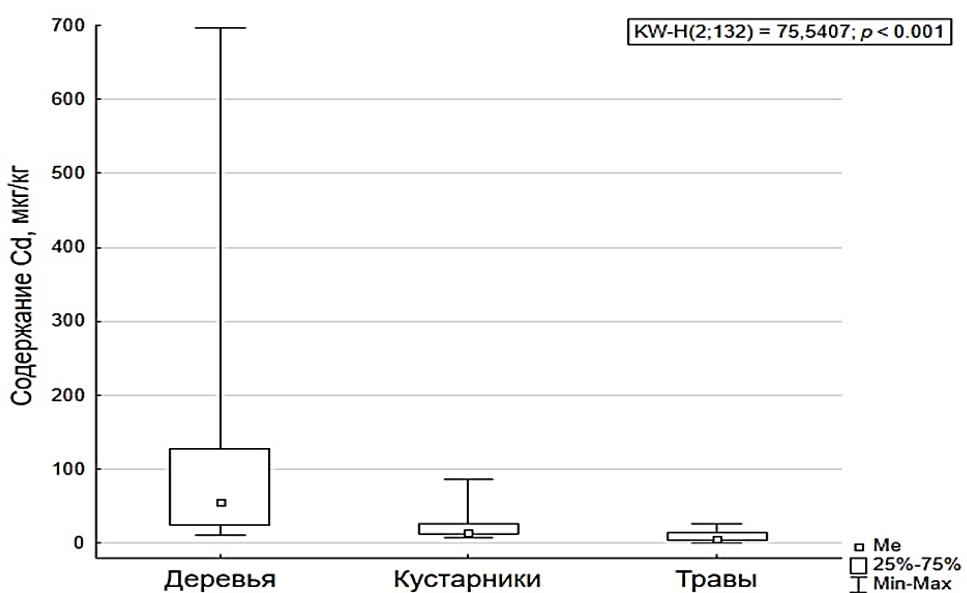


Рисунок 6 – Содержание кадмия в вегетативных органах сосудистых растений различных жизненных форм и тест Краскела – Уолиса на различие между значениями медиан

Содержание кадмия в вегетативных органах растений характеризуется видовой специфичностью. Согласно проведенному анализу сравнения, выявленные различия значений содержание кадмия в вегетативных органах разных видов оказались статистически значимыми. По содержанию рассматриваемого элемента в вегетативных органах деревья распределились в следующей последовательности: *Betulapendula* – 118,4 мкг/кг, *Pinussylvestris* – 112,0 мкг/кг, *Tiliacordata* – 92,0 мкг/кг, *Quercusróbur* – 74,2 мкг/кг.

Наиболее ясную картину сходства и различий между разными видами деревьев и кустарников дает кластерный анализ, который позволяет оценить выборки по целому ряду переменных. Кустарники характеризуются меньшим содержанием рассматриваемого элемента, которое выражается близкими значениями для исследованных видов, в связи с чем на дендрограмме они образуют обособленную группу. Среди деревьев наибольшее сходство демонстрируют *T. cordata* и *P. sylvestris*. У *Q. róbur* в корке содержание кадмия ненамного больше, чем у кустарников, поэтому он образует с ними сестринскую ветвь. Обособленную от всех остальных видов ветвь с максимальным отличием в содержании рассматриваемого элемента формирует *B. pendula* (рисунок 7).

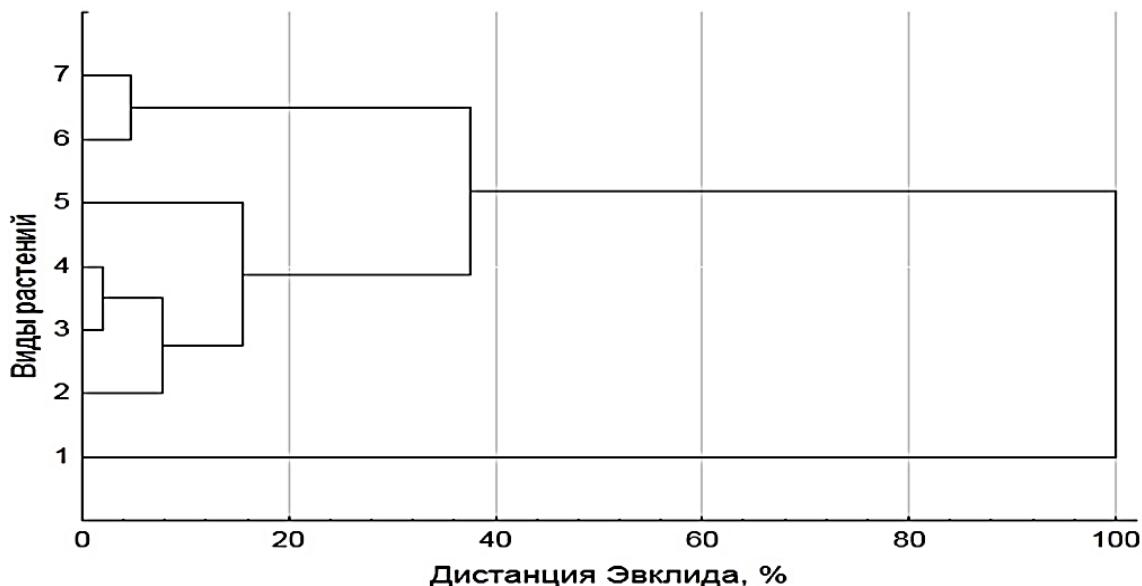


Рисунок 7 – Дендрограмма сходства видов древесных растений по содержанию кадмия в их вегетативных органах: 1 – *Betulapendula*, 2 – *Corylusavellana*, 3 – *Euonymusverrucosus*, 4 – *Loniceraxylosteum*, 5 – *Quercusróbur*, 6 – *Tiliacordata*, 7 – *Pinussylvestris* ($R_{coph} = 0,96$)

Как показали результаты измерений, содержание кадмия в различных тканях и органах древесных растений неодинаково. Для всех изученных видов наблюдается одна и та же закономерность. Минимальное содержание кадмия наблюдается в корнях и древесине ствола, среднее – в листьях, максимальное – в корке (рисунок 8).

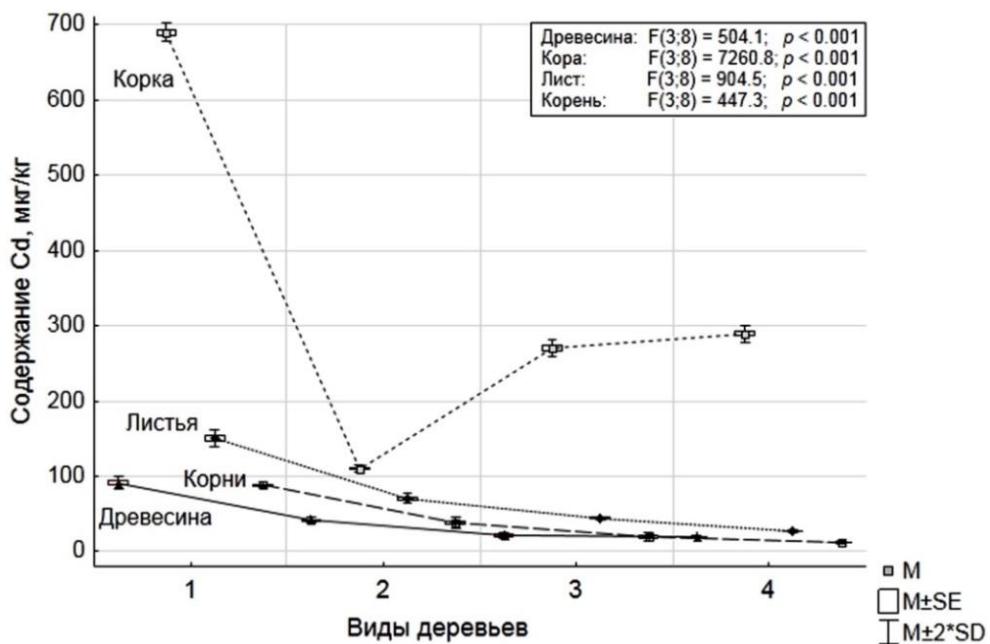


Рисунок 8 – Диаграмма размаха изменчивости значений содержания кадмия в вегетативных органах и тканях деревьев: 1 – *Betula pendula*, 2 – *Quercus robur*, 3 – *Pinus sylvestris*, 4 – *Tilia cordata* и результаты дисперсионного анализа

Полученные данные в основном совпадают с результатами, опубликованными другими исследователями (Савушкина, 2006; Ветчинникова и др., 2013). Однако рядом авторов показано, что в корнях содержится кадмия больше, чем в надземных частях растений (Ильин, Сысо, 2001). Такое распределение концентраций кадмия проявляется при его высоком фоновом содержании в почве и подстилающих породах. В районе же исследований, как было показано выше, почвы бедны рассматриваемым элементом.

Согласно многочисленным литературным данным, кадмий попадает в атмосферный воздух в виде аэрозолей в результате антропогенного загрязнения (Виноградова и др., 1988; Бурцева, Конькова, 2016). Поэтому максимальное содержание рассматриваемого элемента в корке может быть объяснено тем, что он попадает на ее поверхность с дождем и снегом и соответственно поглощается комплексом образующих ее мертвых тканей в течение всего года, исключая период устойчивых морозов, на протяжении жизни дерева.

Повышенное содержание кадмия в листьях, по сравнению с древесиной, нельзя связывать с вышеуказанным фактором, так как листья контактируют с атмосферным воздухом лишь в короткий период вегетации. Кроме того, благодаря гидрофобным свойствам кутикулы, покрывающей их верхнюю сторону, большая часть выпадающей на их поверхность атмосферной влаги не впитывается, а скатывается на поверхность почвы. Поэтому накопление кадмия в листьях вероятно связано с физиологическими процессами, благодаря которым в период листопада древесные растения освобождаются от вторичных метаболитов и токсичных соединений (Крамер, Козловский, 1983; Ветчинникова и др., 2013).

Содержание кадмия в листьях подвержено сезонной динамике. В результате специальных исследований в 2018 г. нами проводился отбор проб листьев с одних и тех же деревьев *B. pendula* с момента их распускания в третьей декаде апреля до начала листопада в сентябре. Как показали результаты измерений, содержание рассматриваемого элемента с апреля по сентябрь выросло в 172 раза. При этом наиболее активное накопление кадмия в листьях началось в августе, когда прекратился рост побегов и деревья начали готовиться к листопаду. Сезонная динамика содержания кадмия в листьях изучалась также у *Q. robur* и *T. cordata*. Были отобраны и проанализированы пробы листьев этих деревьев в третьей декаде апреля и в начале сентября. Для них также были отмечены существенные различия в содержании кадмия в начале и в конце вегетационного периода. Однако они были гораздо меньшими, чем у *B. pendula*. Содержание рассматриваемого элемента в листьях *T. cordata* в сентябре было выше, чем в апреле, в 19 раз, а у *Q. robur* – в 10 раз.

Как показали результаты измерений, содержание кадмия в репродуктивных органах деревьев оказывается в 32 раза меньше, чем в вегетативных органах. Минимальные концентрации зафиксированы в цветках, где происходит формирование половых клеток. Вероятно, это связано с тем, что кадмий является супертоксикантом, оказывающим влияние на сперматогенез (Жегалова и др., 2018). Поэтому у растений выработался защитный механизм против поступления его в репродуктивные органы (Еськов и др., 2008).

Как показали результаты измерений, среднее содержание кадмия в плодах в 2,9 раза выше, чем в цветках, однако по сравнению с вегетативными органами оно также значительно ниже. Описанная закономерность характерна для всех изученных древесных растений.

В ходе проведенных исследований нами определялось содержание кадмия в вегетативных и репродуктивных органах видов кустарников, наиболее распространенных в районе исследований. Как показали результаты измерений, среднее содержание рассматриваемого элемента в вегетативных органах этих растений составляло 21 мкг/кг. Оно было в 3,5 раза ниже, чем у деревьев.

В распределении концентраций кадмия в вегетативных органах и тканях кустарников наблюдались те же закономерности, что и у деревьев. Максимальные концентрации были зафиксированы в корке, минимальные – в корневых системах.

Разные виды кустарников накапливают рассматриваемый элемент неодинаково, хотя его концентрации в их вегетативных органах выражаются близкими значениями. Наибольшая концентрация была определена для *C. avellana* (38 мкг/кг), у *E. verrucosus* (20 мкг/кг) и *L. xylosteum* (24 мкг/кг) она была несколько ниже.

Содержание кадмия в репродуктивных органах кустарников было в 47 раз ниже, чем в вегетативных, т.е. у представителей этой жизненной формы наблюдалась та же закономерность, что и у деревьев.

В ходе исследований нами изучались закономерности накопления кадмия наиболее распространенными видами травянистых растений, растущих под пологом леса – *Aegopodium podagraria*, *Anemone ranunculoides*, *Carex pilosa*, *Stellaria holostea* (рисунок 9). Среднее содержание рассматриваемого элемента в вегетативных органах изученных видов трав составило 7,1 мкг/кг, что в 8,3 раза ниже, чем у деревьев, и в 2,5 раза ниже, чем у кустарников.

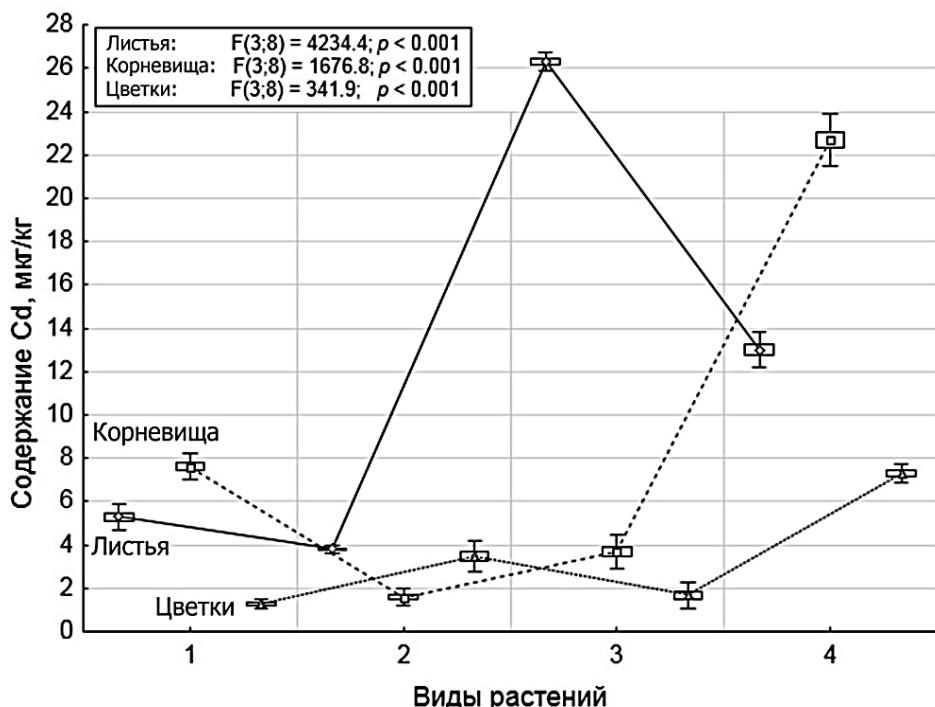


Рисунок 9 – Диаграмма размаха изменчивости значений содержания кадмия в вегетативных органах и цветках травянистых растений:

1 – *Aegopodium podagraria*, 2 – *Anemone ranunculoides*, 3 – *Carex pilosa*,
4 – *Stellaria holostea* и результаты дисперсионного анализа

Различные виды накапливают рассматриваемый элемент в разных концентрациях. Наименьшие значения были определены для *A. ranunculoides*, средние – для *A. podagraria*, а максимальные – для *C. pilosa* и *S. holostea*. Максимальный показатель превышал минимальный в 3,2 раза.

Для изученных видов трав было зафиксировано два типа распределения кадмия. У *A. podagraria* и *S. holostea* его содержание было более высоким в надземных органах. Для *A. ranunculoides* и *C. pilosa* было зафиксировано более высокое содержание рассматриваемого элемента в корневищах. Концентрация кадмия в листьях выражалась меньшими значениями.

Вероятно, характер распределения данного металла, как и интенсивность его биологической аккумуляции, зависит от физиологических особенностей отдельных видов.

В репродуктивных органах изученных видов трав содержание кадмия выражается меньшими значениями, чем в вегетативных. Однако различия

между определенными в ходе измерений значениями оказываются несколько меньшими, чем у деревьев и кустарников. Например, в цветках *C. pilosa* концентрация рассматриваемого элемента была ниже в 7,5 раз, а у *A. podagraria* – всего в 3,3 раза.

Накоплению рассматриваемого элемента сосудистыми растениями в условиях лесных экосистем может быть дана количественная оценка. В связи с тем, что деревья имеют многолетний жизненный цикл, значительная часть накапливаемого ими кадмия депонируется в древесине. При среднем удельном весе 1 м³ древесины – 500 кг и средней концентрации кадмия в ней 43 мкг/кг в одном ее м³ будет содержаться 21 150 000 мкг или 0,0000215 кг рассматриваемого элемента. При среднем запасе древесины в районе исследований 206 м³/га на каждом гектаре леса в стволах деревьев оказывается депонировано порядка 4 356 900 мкг кадмия. Эта величина находится в динамике. Средний прирост древесины в регионе составляет 3,54 м³ на 1 га леса (Иванов и др., 2017). Соответственно, количество кадмия, депонированного в древесине, на каждом гектаре леса ежегодно увеличивается на 80 500 мкг.

При общем запасе древесины в лесах Пензенской области в 132,84 млн м³ количество рассматриваемого элемента, депонированного в стволах деревьев, составляет порядка 2948 кг. В связи с тем, что запасы древесины за счет прироста ежегодно увеличиваются на 2,94 млн м³, количество кадмия, депонированного в древесине, в лесах района ежегодно возрастает на 63,21 кг.

Поглощаемый древесными растениями из окружающей среды кадмий лишь частично депонируется в древесине. Та его часть, которая содержится в листьях, ежегодно в виде листового опада поступает в почву. Для лесов района исследований она составляет в среднем 305 300 мкг/га, т.е. на нее приходится примерно 14 % от количества кадмия, который концентрируется в стволах деревьев на 1 га леса. В древостоях разного видового состава количество кадмия, возвращающегося в почву с листовым опадом, будет неодинаковым. Оно зависит от массы листового опада, образующегося в древостоях из различных деревьев, и содержания в нем рассматриваемого металла. В ходе исследований было установлено, что наибольшее количество кадмия поступает в почву с листовым опадом в условиях березняков, наименьшее – в условиях сосновых. Дубняки по этому показателю занимают среднее положение.

Основные доминанты травяного покрова рассматриваемых экосистем также вносят определенный вклад в трансформацию соединений кадмия. Биомасса зеленой массы осоки волосистой и сныти обыкновенной при достаточно равномерном распределении этих растений под пологом леса составляет в среднем 980 кг/га, т.е. эти виды ежегодно вовлекают в биогенный круговорот порядка 15 500 мкг кадмия на га, который аккумулируется в их листьях, после отмирания которых вновь возвращается в почву. Это значительно меньше, чем вовлекают деревья. Некоторое количество рассматриваемого элемента депонируется в подземных органах трав, однако определение их го-

дичных приростов представляет довольно сложную проблему, решение которой не входило в задачи исследования.

Интенсивная эксплуатация лесов оказывает существенное влияние на баланс микроэлементов в лесных экосистемах. Для Пензенской области размер расчетной лесосеки при рубке спелых и перестойных насаждений установлен в $1\ 464\ 300\ м^3$, т.е. вынос количества кадмия из лесных экосистем при ее полном выполнении составит 30,8 кг. Это значит, что почти половина кадмия, аккумулированного в древесине в течение вегетационного периода, может удаляться из лесных экосистем.

На территориях заповедников, где не проводятся даже санитарные рубки, весь кадмий, поступающий с атмосферными выпадениями, депонируется в почве и биомассе живых организмов. Как показали результаты измерений, образцы почвы и грибов, отобранные в пределах участка ГПЗ Приволжская лесостепь, содержали кадмий на уровне средних значений для района исследований. На отсутствие уменьшения содержания тяжелых металлов по сравнению с фоновыми показателями в почвах заповедников и территорий со слабой антропогенной нагрузкой, используемых в качестве контроля при изучении содержания тяжелых металлов, имеются указания и в работах других исследователей (Мыслова, Белявский, 2017; Попыпанов, 2019).

3.2.3. Содержание кадмия в лишайниках и мхах

Лишайники и мхи в биогеохимических циклах тяжелых металлов занимают особое место. Это связано с тем, что они не имеют корневых систем и получают воду и элементы минерального питания главным образом из атмосферных выпадений, которые активно впитывают поверхностью слоевищ и талломов. Субстраты, на которых они обитают, не оказывают существенного влияния на элементный состав этих организмов. Таким образом, лишайники и мхи вовлекают кадмий в биогенный круговорот автономно, минуя основной поток микроэлементов, идущий через почву, микоризообразующие грибы и сосудистые растения.

Как показали измерения, среднее содержание рассматриваемого элемента в слоевищах лишайников составляет 166,0 мкг/кг, т.е. оно в 2,1 раза выше, чем в вегетативных органах травянистых растений. Для мхов, по сравнению с лишайниками, этот показатель был в 2,5 раза ниже и составил 66,0 мкг/кг. Он был близок к среднему значению содержания кадмия в травянистых сосудистых растениях.

Представители различных экологических групп лишайников и мхов накапливают кадмий неодинаково (рисунок 10). В ходе исследований было установлено, что эпифитные виды мхов и лишайников *H. physodes*, *P. sulcata* и *S. pallescens* накапливают этот элемент несколько активней, чем эпигейные виды – *C. Sylvatica* и *P. schreberi*, развивающиеся на почве. Для первых средний показатель содержания кадмия составил 171,0 мкг/кг, для вторых – 83,0 мкг/кг.

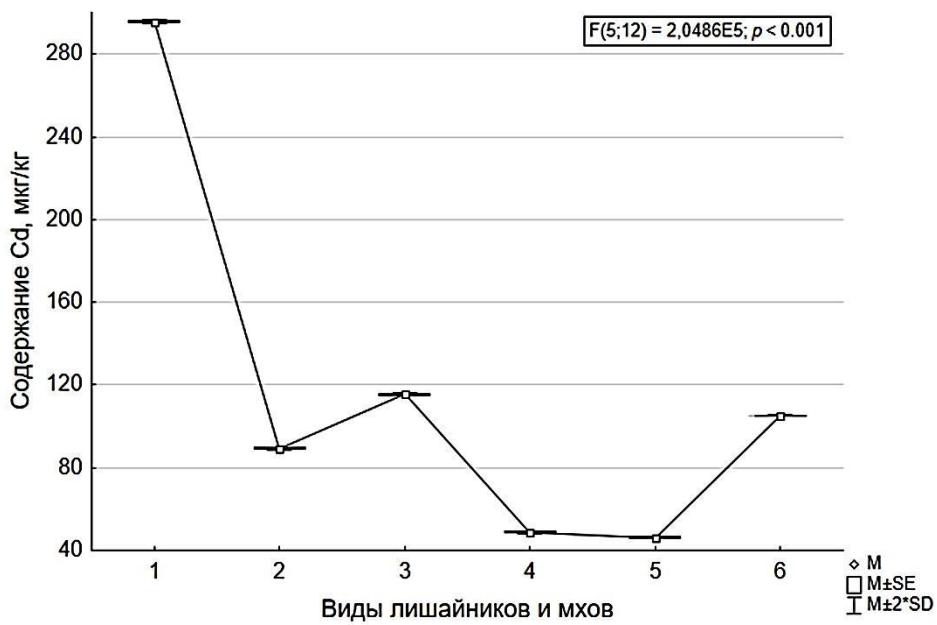


Рисунок 10 – Диаграмма размаха изменчивости значений содержания кадмия в слоевищах лишайников, в талломах мхов и результаты дисперсионного анализа:
1 – *Hypogymniaphysodes*, 2 – *Cladonia sylvatica*, 3 – *Parmelia sulcata*,
4 – *Dicranum polysetum*, 5 – *Pleurozium schreberi*, 6 – *Stereodon pallescens*

Активное накопление кадмия эпифитными мхами и лишайниками связано с тем, что их талломы очень гигроскопичны. В сухую погоду они не способны удерживать влагу и очень быстро ее теряют. Содержавшиеся же в атмосферных выпадениях поллютанты, в том числе и соединения рассматриваемого металла, концентрируются в их талломах. Особенно быстро ее теряют не связанные с почвой эпифиты. Эпигейные виды, контактирующие с влажной почвой, дольше удерживают воду и потому их талломы не так активно поглощают атмосферные выпадения, что отражается на количестве задерживающихся в них поллютантов. Поэтому эпифитные мхи и лишайники эффективней использовать для экологического мониторинга в качестве индикаторов загрязнения воздуха, на что указывают и другие авторы (Шарунова, 2004; Иванов, 2007; Серебрякова, 2009).

3.2.4. Содержание кадмия в дикорастущем пищевом и лекарственном сырье

Одним из важнейших аспектов лесного хозяйства является заготовка недревесной продукции леса. В связи с ее использованием для пищевых и медицинских целей возникает проблема оценки их качества и соответствия установленным нормативам.

Для изучения содержания кадмия в плодовых телах съедобных грибов нами были использованы 16 видов, на которые приходится основная часть грибного сырья, заготавливаемого в лесах района исследований.

По содержанию кадмия разные виды съедобных грибов отличаются друг от друга. Наибольшее количество этого элемента содержат виды, пред-

ставляющие собой самое ценное грибное сырье, объединяемые под общим названием – «белый гриб» (*Boletus edulis*, *B. pinophilus*, *B. reticulatus*). Среднее фоновое содержание кадмия в этих грибах на незагрязненных почвах приближается к значению ПДК. Минимальное значение содержания кадмия было определено для красноголовика желто-бурого (*Leccinum versipelle*). Для остальных видов концентрация кадмия в плодовых телах была близка к среднему показателю. Он составляет для съедобных грибов, собранных на незагрязненных почвах Пензенской области, 36 мкг/кг.

Лекарственные и пищевые растения являются важнейшим элементом недревесной продукции леса. Экспертиза этого сырья предполагает определение в нем содержания кадмия как опасного токсичного элемента.

Минимальные значения были определены для соплодий *Alnus glutinosa* (1,0 мкг/кг), плодов *Fragaria vesca* (1,4 мкг/кг), *Rosacanina* (1,0 мкг/кг) и *Rubus idaeus* (1,1 мкг/кг); средние – для соцветий *Helichrysum arenarium* (2,8 мкг/кг); максимальные – для листьев и плодов *Vaccinium myrtillus* (9,0 мкг/кг).

Несмотря на указанные различия в содержании кадмия в дикорастущем лекарственном сырье, все определенные значения лежали в пределах ПДК для БАД на растительной основе, плодов и ягод. Таким образом, лекарственное и пищевое растительное сырье, заготовка которого возможна в изучаемых лесных сообществах Пензенской области, безопасны в отношении содержания кадмия.

ВЫВОДЫ

1. Серым лесным почвам района исследований, находящимся под лесной растительностью, свойственно невысокое содержание кадмия – 153,3 мкг/кг. По сравнению со средним значением для почв мира оно ниже в 3,3 раза, а по сравнению с западными районами европейской части России – в 2,8 раза.

2. Изученные представители различных систематических групп живых организмов существенно отличаются друг от друга по содержанию кадмия. Максимальная средняя концентрация – 166,9 мкг/кг – была зафиксирована для лихенизированных грибов, минимальная – 59,23 мкг/кг – для сосудистых растений. Грибы агарикомицеты и мхи заняли по данному показателю среднее положение.

3. Средний показатель содержания кадмия в изученных видах грибов агарикомицетов составляет 119,6 мкг/кг. Представители различных эколого-трофических групп грибов накапливают кадмий неодинаково. Наиболее высокое содержание рассматриваемого элемента было определено для симбиотрофов, среднее – для напочвенных сапротрофов, самое низкое – для ксилютрофов.

4. Различные жизненные формы сосудистых растений существенно отличаются по концентрации рассматриваемого элемента в вегетативных орга-

нах. Наиболее высокое среднее содержание рассматриваемого элемента было определено для деревьев – 140,4 мкг/кг, самое низкое – для травянистых растений – 7,1 мкг/кг. Кустарники по этому показателю заняли среднее положение.

5. Эксплуатация лесных ресурсов сопряжена с выносом кадмия из лесных экосистем вместе с заготавливаемой продукцией. В связи с этим на заповедных территориях, где хозяйственная деятельность не ведется в течение длительного времени, содержание кадмия в почвах и биологических объектах может быть больше, чем в условиях интенсивной лесоэксплуатации.

6. Среднее содержание кадмия в съедобных грибах района исследований составляет 31,1 мкг/кг, в лекарственных и пищевых растениях – 3,7 мкг/кг, что значительно меньше установленных ПДК. Это делает район исследований перспективным с точки зрения заготовок экологически чистой продукции.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Андреева, М. И.** Мониторинг содержания кадмия в лесных экосистемах Приволжской возвышенности / М. И. Андреева, И. А. Иванов, А. Г. Горохова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – Вып. 05 (27). – С. 15–20.

2. **Андреева, М. И.** Экологическая ситуация в санитарно-защитной зоне и зоне защитных мероприятий объекта уничтожения химического оружия в пос. Леонидовка Пензенской области на завершающем этапе работы / М. И. Андреева, И. А. Иванов, А. Г. Горохова, А. Е. Клюстер // Теоретическая и прикладная экология. – 2015. – № 3. – С. 96–99.

3. **Андреева, М. И.** Биологическая аккумуляция кадмия плодовыми телами агарикомицетов (*Agaricomycetes*) / М. И. Андреева, И. А. Иванов, А. Г. Горохова, Р. К. Мухамедшин // Микология и фитопатология. – 2017. – Т. 51, вып. 3. – С. 158–167.

4. Иванов, А. И. Биологическая аккумуляция химических элементов грибами агарикомицетами (*Agaricomycetes*) в условиях Приволжской возвышенности / А. И. Иванов, А. Г. Горохова, **М. И. Андреева**, К. А. Дурягина // Теоретическая и прикладная экология. – 2020. – № 2. – С. 39–44.

5. **Андреева, М. И.** Накопление кадмия сосудистыми растениями в лесных экосистемах Приволжской возвышенности в пределах Пензенской области / М. И. Андреева, А. И. Иванов, Д. Г. Смирнов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. – 2020. – № 2 (30). – С. 72–89.

6. **Андреева, М. И.** Содержание кадмия в почве и биологических объектах в условиях лесных экосистем Приволжской возвышенности в пределах Пензенской области / М. И. Андреева, А. И. Иванов, Д. Г. Смирнов // Биосфера. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 138–158.

Публикации в других изданиях

7. **Андреева, М. И.** Содержание кадмия и мышьяка в донных отложениях водотоков правобережья Пензенского водохранилища / М. И. Андреева, А. Г. Горохова // Экология родного края: проблемы и пути решения : материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Киров, 2015. – С. 80–82.
8. Содержание кадмия в серых лесных почвах Пензенской области / **М. И. Андреева**, С. В. Язынин, А. Г. Горохова, К. А. Дурягина, Н. А. Язынина // Материалы 45 ВНК 33 ЦНИИИ. Вольск-18. – 2015. – 1 с.
9. **Андреева, М. И.** Проблема накопления кадмия в плодовых телях агариомицетов в лесных экосистемах Приволжской возвышенности / М. И. Андреева, И. А. Иванов, А. Г. Горохова // Биоразнообразие и экология грибов и грибоподобных организмов северной Евразии : материалы Всерос. конф. с междунар. участием. – Екатеринбург, 2015. – С. 94–96.
10. **Андреева, М. И.** Биоконцентрация токсичных химических элементов агариоидными грибами / М. И. Андреева, И. А. Иванов, А. Г. Горохова // Актуальные проблемы региональной экологии и биодиагностика живых систем : материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Киров, 2015. – С. 104–106.
11. **Андреева, М. И.** Содержание тяжелых металлов (Cu, Zn, Ni, Pb) в водотоках правобережья Пензенского водохранилища / М. И. Андреева, А. Г. Горохова // Великие реки 2015 : сб. науч.-промышл. конф. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2016. – Т. 1. – С. 218–220.
12. Мониторинг содержания кадмия в лесных экосистемах правобережной части водосборной площади Пензенского водохранилища / **М. И. Андреева**, Ю. А. Егорова, Ю. А. Савина, А. Г. Горохова, К. А. Дурягина, Н. А. Язынина, Е. А. Лабутина // Доклады академии военных наук. – Саратов, 2016. – № 4 (68). – С. 104–107.
13. К вопросу о накоплении химических элементов съедобными грибами в условиях Пензенской области / **М. И. Андреева**, А. И. Иванов, А. Г. Горохова, К. А. Дурягина, Е. А. Лабутина, И. В. Гвоздкова // Доклады академии военных наук – СВИВВ МВД РФ. – Саратов, 2017. – № 2 (76). – С. 72–75.
14. **Андреева, М. И.** Содержание химических элементов (Cd, Pb, As) в почвах правобережной части водосборной площади Пензенского водохранилища / М. И. Андреева, А. Г. Горохова, К. А. Дурягина, Р. Г. Сатанов // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем : материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Киров, 2016. – С. 147–149.
15. **Андреева, М. И.** О содержании кадмия в дикорастущих кормовых, пищевых и лекарственных растениях Пензенской области / М. И. Андреева, А. И. Иванов // Нива Поволжья. – 2019. – № 4. – С. 9–15.

Научное издание

АНДРЕЕВА Маргарита Исааковна

СОДЕРЖАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ КАДМИЯ В ПОЧВАХ
И БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ
ПРИВОЛЖСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ
В ПРЕДЕЛАХ ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

Специальность 03.02.08 – Экология (биология)

Редактор *А. П. Федосова*

Технический редактор *Ю. В. Анурова*

Компьютерная верстка *Ю. В. Ануровой*

Распоряжение № 57/194 от 27.10.2020

Подписано в печать 28.10.2020. Формат 60×84¹/₁₆.
Усл. печ. л. 1,39. Заказ № 361. Тираж 100.

Издательство ПГУ.
440026, Пенза, Красная, 40.
Тел./факс: (8412) 56-47-33; e-mail: iic@pnzgu.ru

