Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*

**НИЖЕЛЬСКИЙ МИХАИЛ СЕРГЕЕВИЧ**

# ВЛИЯНИЕ ДЫМА ОТ ПОЖАРОВ НА ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВ ЮГА РОССИИ

1.5.15. Экология (биологические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Ростов-на-Дону – 2024

Работа выполнена на кафедре экологии и природопользования
Академии биологии и биотехнологии имени Д. И. Ивановского
Южного федерального университета

**Научный руководитель**: **Казеев Камиль Шагидуллович**,
доктор географических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», Академия биологии и биотехнологии им. Д. И. Ивановского, директор

Официальные оппоненты: **Дымов Алексей Александрович**,
доктор биологических наук, доцент, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ИБ ФИЦ КОМИ НЦ УрО РАН), отдел почвоведения, ведущий научный сотрудник

**Хасанова Резеда Фиргатовна**,
доктор биологических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное научное учреждение Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Опытная станция «Уфимская», лаборатория селекции зерновых и зернобобовых культур, заведующая, и.о главного научного сотрудника

Защита диссертации состоится **14 июня 2024 г.** в **17:00** на заседании диссертационного совета ЮФУ 801.01.01 по биологическим наукам на базе Академии биологии и биотехнологии им. Д. И. Ивановского Южного федерального университета по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1, к. 712.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. Ю. А. Жданова Южного федерального университета по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 21ж, и на сайте Южного федерального университета https://hub.sfedu.ru/diss/show/1326704/

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Отзыв на автореферат в двух экз. (с указанием даты, полностью ФИО, ученой степени со специальностью, звания, организации, подразделения, должности, адреса, телефона, e-mail), заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1, к. 804, ученому секретарю диссертационного совета ЮФУ 801.01.01 Тимошенко А. Н., а также в формате *.pdf* на e-mail: atimoshenko@sfedu.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета Тимошенко Алёна Николаевна

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

***Актуальность исследования.*** На территории России воздействию природных и антропогенных пожаров подвергаются огромные территории. Почва, как основной компонент экосистемы, подвергается серьезным изменениям, которые коренным образом влияют на ее свойства и биоту. Помимо огня и экстремально высоких температур стоит учитывать и последствия задымления почв. Этот аспект на сегодняшний день практически не изучен. Поэтому актуально исследовать влияние токсичного дыма от пожаров, образующегося в результате термической деструкции материалов горения, на почву, ее флору и фауну. Известно, что пожары приводят к выбросам больших объемов токсичного дыма, многие химические соединения обладают мутагенными, канцерогенными, тератогенными свойствами (Dong et al., 2017). Последствия и степень воздействия задымления на биологические параметры почв различного генезиса изучены недостаточно. Нет четкого представления о влиянии смога на почву, образованного дымом от сжигания растительности. Также нет информации и о накоплении полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в почве после воздействия дыма от пожаров, хотя известно, что многие полиарены имеют пирогенное происхождение (Цибарт, 2012). Слабо изучены последствия влияния выбросов токсичных веществ дыма на почву от горения торфа при торфяных пожарах. Практически нет оценки воздействия дыма при пожарах на почву от горения синтетических материалов. Имеется немало работ, посвященных воздействию огня на почвы (Казеев и др., 2020; Jiménez-Morillo et al., 2020; Вилкова и др., 2023; Cheng et al., 2023). В то время как информации о влиянии дыма на почву не так много (Одабашян, 2019; Нижельский и др., 2022, 2023).

**Цель работы** – оценить влияние дыма от пожаров на экологическое состояние почв юга России в модельных экспериментах.

В задачи исследований входило:

- Выявить изменение ферментативной активности почв при воздействии дыма в зависимости от продолжительности воздействия, источника дыма, глубины проникновения, типа почв и условий проведения экспериментов.
- Выявить токсичность дыма для почвенной биоты при моделировании пожаров. Определить чувствительность и информативность исследованных биоиндикаторов при воздействии дыма на почву.
- Изучить концентрации токсичных газов дыма и накопление полициклических ароматических углеводородов в почве.
- Оценить скорость восстановления фумигированных почв, определить возможность применения биопрепаратов для ускорения ремедиации.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Фумигация чернозема приводит к ингибированию ферментативной активности (особенно оксидоредуктаз), зависящей от продолжительности воздействия дыма от 15 до 120 мин. Наибольшее ингибирование дым оказывает на поверхностный слой 0-1 см (уменьшение активности на 19-58%), на глубине 4-5 см эффект фумигации меньше (снижение активности ферментов на 10%). Хроническое и периодическое воздействия дыма увеличивают ингибирование активности ферментов до 84% и 78%

соответственно. Чувствительность ферментов к дыму в разных исследуемых почвах (коричневые, буроземы, черноземы, серопески) отличается.

2. Чистые культуры микроорганизмов очень чувствительны к дыму и подавляются уже после 1-5 мин фумигации. Бактерии более устойчивы к дыму, чем микромицеты. Фумигация почвы в течение 60 мин приводит к подавлению микроорганизмов (*Azotobacter chroococcum* и *Micromycetes*) на 18-87% от контрольных значений. Для мезофауны через 30 минут фумигации смертность *Nauphoeta cinerea* составила 80%, для *Eisenia fetida* – 100%. Степень угнетения дымом растений зависит от вида (*Raphanus sativus, Triticum aestivum, Pisum sativum, Hordeum vulgare*) и стадии развития (семена, проростки, начальный рост).
3. Токсичность дыма зависит от материалов горения (синтетического и растительного происхождения). В дыму от горения древесных стружек отмечено превышение в 100-24100 раз допустимых концентраций токсичных газов (оксид углерода, ацетальдегид, формальдегид, гидроксибензол, оксид и диоксид азота). Фумигация приводит к снижению pH всех исследуемых почв на 0,6-2,3 ед. После задымления почвы выявлено значительное накопление в ней ПАУ, превышающее допустимые концентрации, особенно фенантрена и нафталина – в 2,4-32,5 раза в зависимости от источников дыма.
4. После фумигации в лабораторных условиях восстановление большинства биологических показателей происходит спустя 30 суток. В полевых условиях восстановление проходит в три раза медленнее. Применение биопрепаратов (NAGRO, гумата калия, «Байкала-ЭМ1») способствует ускорению восстановления биологической активности почв.

***Научная новизна.*** Впервые исследованы последствия влияния дыма от сжигания материалов растительного и синтетического происхождения на экологическое состояние почв юга России. Выявлено влияние дыма на биологическую активность почв разного генезиса. Проведена сравнительная оценка эффекта фумигации при кратковременном, разовом 60-минутном, хроническом и периодическом воздействии. Определена чувствительность почвенных микроорганизмов, растений и мезофауны к дыму при моделировании пожаров. Установлены особенности влияния газообразных продуктов горения в природных и лабораторных условиях. Определены высокие концентрации таких токсичных веществ дыма, как оксид углерода, оксиды азота, ацетальдегида, формальдегида и других. Они повлияли на ферментативную активность и биоту. Впервые приведены данные о накоплении ПАУ в почве после влияния дыма при моделировании пожаров от сжигания материалов различного происхождения. Впервые исследовано восстановление биологической активности задымленных почв.

***Теоретическая и практическая значимость.*** В модельных экспериментах проведена оценка влияния газообразных продуктов горения на биоту и биологическую активность почв. Определены закономерности изменения биологических свойств почв в зависимости от вида дыма и длительности его воздействия. Установлены различия в чувствительности почвенных ферментов к фумигации дымом. Установлен ряд устойчивости почв по степени снижения их биологической активности.

На основе проведенных исследований выявлена возможность проведения оценки воздействия дыма на почву и экосистемы. На основе полученных результатов можно

будет проводить оценку эффективности способов восстановления нарушенных почв. Результаты исследования будут использованы в учебном процессе для студентов биологических специальностей в Южном федеральном университете.

***Степень достоверности результатов.*** Достоверность полученных результатов исследования, выводов подтверждается обоснованностью используемой методологией выполняемых работ, применением общепринятых методов, достаточной повторностью вариантов опытов, большим объемом полученных данных и статистической обработкой данных.

***Апробация результатов.*** Результаты и сделанные на их основе выводы были представлены на научных конференциях: «Ломоносов» (Москва, 2021-2023), IV Международной научной конференции памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова (Ростов-на-Дону, 2022), Молодежной научной конференции VI Вильямсовские чтения «Почвенный покров - фундамент агротехнологий будущего» (Москва, 2021), III Международной научной конференции и II Международной научной школы для молодых ученых «Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях антропогенной нагрузки (Ростов-на-Дону – Таганрог, 2023).

***Личный вклад автора.*** Все этапы лабораторных, полевых исследований и анализ данных выполнены лично автором в период с 2020 по 2024 год. Выполнение лабораторных анализов осуществлялось на кафедре экологии и природопользования Академии биологии и биотехнологии им. Д. И. Ивановского ЮФУ.

***Публикации.*** По итогам исследований были опубликованы 32 научные работы, включая 4 статьи в журналах, входящих в базы данных международных индексов научного цитирования Scopus и Web of Science, 3 статьи в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ЮФУ и ВАК, 1 монография и 3 базы данных.

***Структура и объем работы.*** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, выводов, списка литературы. Работа изложена на 154 страницах печатного текста, содержит 11 таблиц, 45 рисунков. Список литературы включает 311 источников, из них 202 на иностранном языке.

***Конкурсная поддержка работы.*** Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (№ FENW-2023-0008), при финансовой поддержке ведущей научной школы Российской Федерации (НШ-449.2022.5) и при поддержке Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета («Приоритет 2030»).

***Благодарности.*** Автор выражает благодарность научному руководителю д. г. н., профессору К. Ш. Казееву за помощь на всех этапах работы. Также автор выражает благодарность С. И. Колесникову, д. с.-х. н., заведующему кафедрой экологии и природопользования Академии биологии и биотехнологии им. Д. И. Ивановского ЮФУ, д. б. н., заведующей лабораторией «Интеллектуальные агроэкосистемы» ЮФУ С. Н. Сушковой и всем сотрудникам кафедры экологии и природопользования за помощь в проведении исследований на разных этапах.

# Глава 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В разделе 1.1 представлены литературные данные по влиянию пожаров на наземные экосистемы. В разделе 1.2 приводится обзор исследований о химическом составе дыма при пожарах. В разделе 1.3 описано воздействие дыма на живые организмы. В разделе 1.4 приведен анализ литературных данных о влиянии дыма на почву, где отмечено, что работ по влиянию пожарного дыма на почву практически нет.

# Глава 2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной главе приводится список объектов исследования:

1. Чернозем обыкновенный, или миграционно-сегрегационный (*Haplic Chernozem* по World Reference Base for Soil Resources (WRB)).
2. Буроземы Крыма и Кавказа (*Cambisols* по классификации WRB).
3. Коричневые почвы Краснодарского края (*Cambisols* по WRB).
4. Серопески Ростовской области (*Arenosols* по WRB).
5. Газообразные продукты горения. В качестве источников горения были выбраны материалы растительного (сосновые стружки, солома, хвойный и листовой опад, торф) и синтетического происхождения (материалы на основе каучука, полистирола и поливинилхлорида).

# Глава 3. Методика и методы исследований

В данной главе приводится список выполненных исследований по теме диссертации (табл. 1). Опыты по задымлению почв выполнены при помощи различных дымогенераторов (рис. 1). Схема установки представлена на рисунке 2.

Рисунок 1 – Дымогенераторы для проведения экспериментов: Kitfort Kt-2033 smoking gun (1), Merkel Standart (2), дымогенератор из профильной трубы (3)

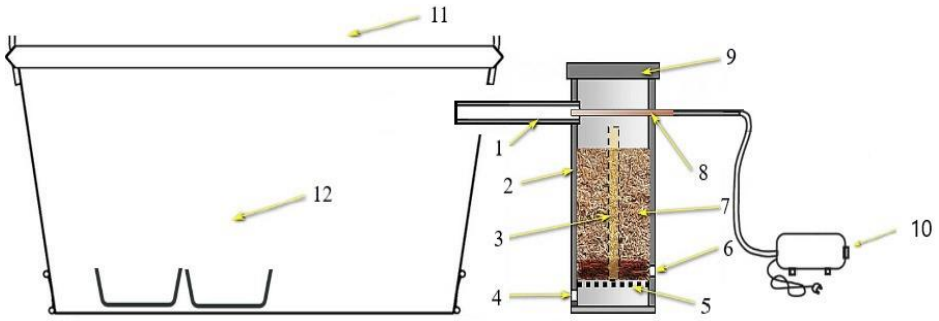


Рисунок 2 – Экспериментальная установка:
1 – дымоход от дымогенератора; 2 – дымогенератор; 3 – спираль для охлаждения дыма и сбора золы, смолы; 4 – отверстие для подачи воздуха; 5 – решетка для накопления золы и смолы; 6 – отверстие для розжига; 7 – материалы горения; 8 – трубка воздушного компрессора; 9 – крышка дымогенератора; 10 – воздушный компрессор; 11 – полипропиленовый контейнер-изолятор; 12 – образцы почвы/тест-объекты

Таблица 1

Список экспериментов

| № | Описание |
|---|---|
| | Ферментативная активность почв |
| 1 | Влияние кратковременного воздействия дыма на почву (15 мин) |
| 2 | Влияние разового 60-минутного воздействия дыма на почву |
| 3 | Влияние хронического воздействия дыма на почву (12-36 ч) |
| 4 | Влияние периодического воздействия дыма на почву |
| 5 | Оценка глубины проникновения дыма в почву |
| 6 | Влияние дыма на почвы разного генезиса |
| 7 | Влияние дыма на почву от сжигания материалов различного происхождения |
| 8 | Влияние фумигации на почву (пашня) в естественной среде в зависимости от продолжительности опыта (30-120 мин) |
| 9 | Влияние фумигации на почву (пашня) в естественной среде в зависимости от интенсивности задымления |
| 10 | Влияние дыма на почву в естественных условиях (на участках разного землепользования – залежи и насаждения сосны) |
| | Влияние дыма на биоту |
| 11 | Влияние дыма на микроскопические грибы и азотфиксирующие бактерии |
| 12 | Оценка чувствительности чистых культур микроорганизмов к фумигации |
| 13 | Реакция мезофауны на газообразные продукты горения |
| 14 | Трофическая активность фауны после фумигации почв |
| 15 | Целлюлозолитическая активность почв после фумигации |
| 16 | Влияние дыма на растения сельскохозяйственных (с/х) культур (лабораторный опыт) |
| 17 | Влияние фумигации на растительные сообщества (полевой опыт) |
| | Анализ дыма и ПАУ |
| 18 | Химический состав дыма при моделировании пожаров |
| 19 | Накопление ПАУ в почве после фумигации от горения материалов растительного происхождения |
| 20 | Накопление ПАУ в почве после фумигации от горения материалов синтетического происхождения |
| | Восстановление биологической активности почв после фумигации |
| 21 | Восстановление почв без применения биопрепаратов в лабораторных и естественных условиях |
| 22 | Восстановление почв при помощи биопрепаратов |

В разделе 3.1. описаны методы определения биохимических (ферментативная активность почв) и физико-химических свойств почв. В разделе 3.2 описана методика определения изменений почвенной биоты после воздействия дыма.

В разделе 3.3 представлены методика определения химического состава дыма и анализ почвы на содержание ПАУ. В разделе 3.4 описана методика восстановления биологической активности почв после воздействия дыма. В разделе 3.5 описана статистическая обработка данных.

# ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

## 4.1. Воздействие дыма при моделировании пожаров на ферментативную активность почв

### 4.1.1. Оценка кратковременного и длительного воздействия дыма на активность почвенных ферментов

В результате кратковременного (15 мин) рекогносцировочного исследования воздействия дыма на почву выявлено снижение активности каталазы на 10% от горения материалов растительного происхождения (сосновые стружки, солома, хвойный и листовой опад) по отношению к контролю (опыт № 1). При этом ингибирование не зависело от источника горения в вариантах с фумигацией чернозема. Различия между вариантами задымления почвы от горения соломы, сосновых стружек и опада не обнаружено. В результате опыта № 2 (60 мин фумигации почвы) выявлено снижение активности каталазы на 25%, пероксидазы – на 15%, полифенолоксидазы – на 33%, инвертазы – на 23%, уреазы – на 20% и фосфатазы – на 16%.

### 4.1.2. Влияние хронического и периодического воздействия дыма на почву при моделировании пожаров

В результате хронического воздействия дыма (опыт № 3) был заметен значительный эффект (рис. 3) по сравнению с предыдущим 60-минутным. Значение каталазы после 36 ч нахождения почвы в газовой камере снизилось на 84%. Подобные изменения наблюдали со всеми исследуемыми ферментами.

Реакция среды (pH) уменьшилась с 7,8 ед. (контроль) до 5,5 ед. Установлено увеличение содержания легкорастворимых солей с 9,2 мг/л в контроле до 183-248 мг/л после 12-36 ч воздействия дыма. Полученные значения по содержанию солей сравнили с идентичным хроническим воздействием дыма на водопроводную воду, чтобы выявить различия.

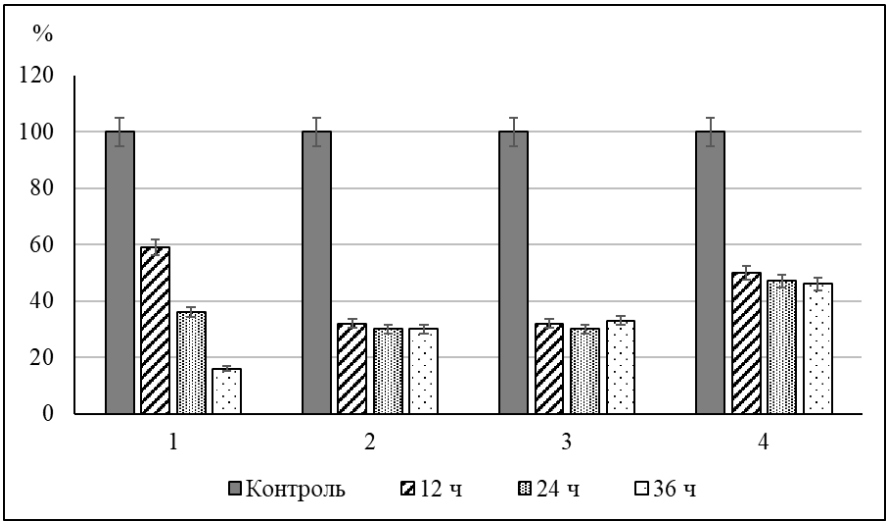


Рисунок 3 – Изменение ферментативной активности чернозема обыкновенного после хронического воздействия дыма: 1 – каталаза, 2 – полифенолоксидаза, 3 – пероксидаза, 4 – инвертаза

Значения контрольных образцов воды составили 5,8 мг/л, а опытных увеличились до 146, 226 и 418 мг/л после 12, 24 и 36 ч соответственно. Активность ферментов снизилась и в эксперименте с периодической (опыт № 4) фумигацией почвы (рис. 4).

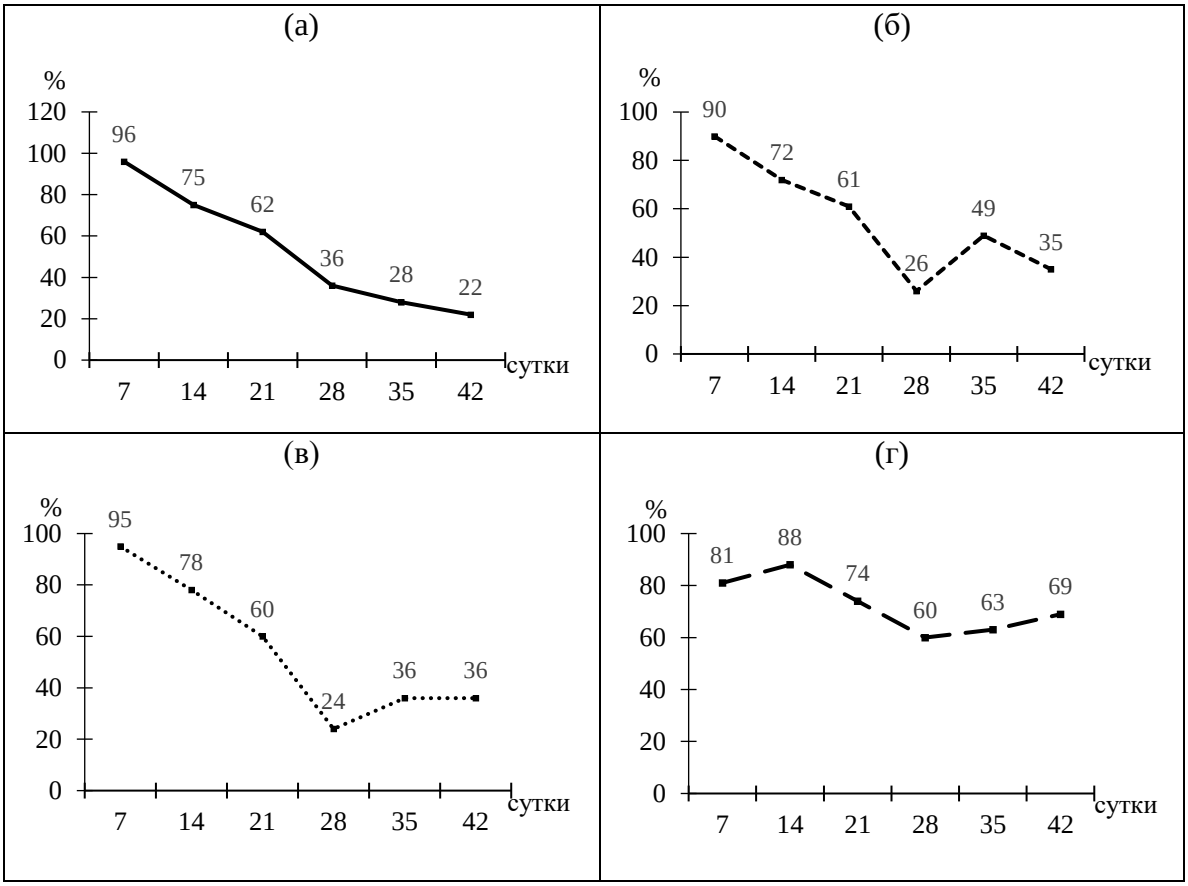


Рисунок 4 – Снижение ферментативной активности чернозема в эксперименте с периодическим воздействием дыма: а – каталаза, б – пероксидаза, в – полифенолоксидаза, г – инвертаза

### 4.1.3. Оценка глубины воздействия газообразных веществ на почву

В данном исследовании (опыт № 5) определили глубину, на которой заметен эффект дыма при моделировании пожаров. Активность каталазы сухой почвы после 30

мин фумигации в слоях 0-1, 1-2 и 4-5 см снизилась на 5-19%, после 60 мин в этих же слоях ингибирование составило 10-28%, а после 120 мин – 8-37%. Активность полифенолоксидазы уменьшилась в слое 0-1 см на 6-49% после 30-120 мин фумигации. Однако в остальных слоях достоверные различия установить не удалось из-за высокого варьирования активности в образцах, которые перекрывали различия между вариантами опыта.

Идентичный тест выполнен с увлажненной почвой. Активность каталазы в слое 0-1 см была ингибирована относительно контроля после 30 мин на 52%, после 60 мин – на 41%, а после 120 мин – на 48%. Данные значения активности фермента несколько больше, чем в прошлом тесте с сухой почвой. Активность полифенолоксидазы снизилась в слое 0-1 см относительно контроля на 38-57% за 30-120 мин, что больше, чем в сухой почве. В рамках данного исследования выявлено снижение показателя pH почвы за 30-120 мин фумигации. Контрольное (фоновое) значение составило 7,8 ед. Однако уже спустя 30 мин фумигации значение снизилось до 7 ед., после 60 и 120 мин – до 6,3 и 5,9 ед. соответственно.

### 4.1.4. Влияние фумигации на почвы разного генезиса

Оценено воздействие дыма на ферментативную активность буроземов Крыма и Кавказа, чернозема обыкновенного, коричневых почв и серопесков (опыт № 6). При оценке воздействия дыма на бурозем Кавказа от сжигания сосновых стружек в течение 60 мин выявлено снижение активности каталазы на 36%, пероксидазы, полифенолоксидазы и инвертазы – на 58%, 54% и 30% соответственно. Исследование также выявило различия реакции среды (pH) опытных образцов по сравнению с контрольными. Результаты анализов показали, что через 60 мин после обработки почвы дымом водородный показатель снизился на 0,85 ед. (с 5,4 ед. до 4,55 ед.) относительно контроля. Аналогичным образом выявили эффект от газообразных продуктов горения при моделировании пожаров на ферментативную активность и реакцию среды остальных типов почв. Активность почвенных ферментов чернозема обыкновенного снизилась на 20-79%, бурозема Республики Крым – на 18-69%, коричневых почв – на 28-71%, серопесков – на 18-66%. Изменения значений водородного показателя почв представлены в таблице 2.

Таблица 2

Изменения pH почв разного генезиса после 60 мин воздействия дыма

| Чернозем | | Бурозем Кавказа (Адыгея) | | Бурозем Крыма | | Серопески | | Коричневые | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Контроль | Опыт | Контроль | Опыт | Контроль | Опыт | Контроль | Опыт | Контроль | Опыт |
| 7,8 | 6,3 | 5,40 | 4,55 | 4,95 | 4,35 | 7,2 | 5,3 | 7,76 | 6,39 |

### 4.1.5. Влияние дыма на почву от сжигания материалов различного происхождения

В данном исследовании (опыт № 7) оценивали воздействие дыма на почву от сжигания материалов как растительного, так и синтетического происхождения. Снижение ферментативной активности чернозема обыкновенного от термической деструкции торфа составило 8-15% (достоверных изменений активности инвертазы выявить не удалось), от сжигания сосновых стружек – 17-41%, соломы – 11-30%, хвойного опада – 17-34% (рис. 5).

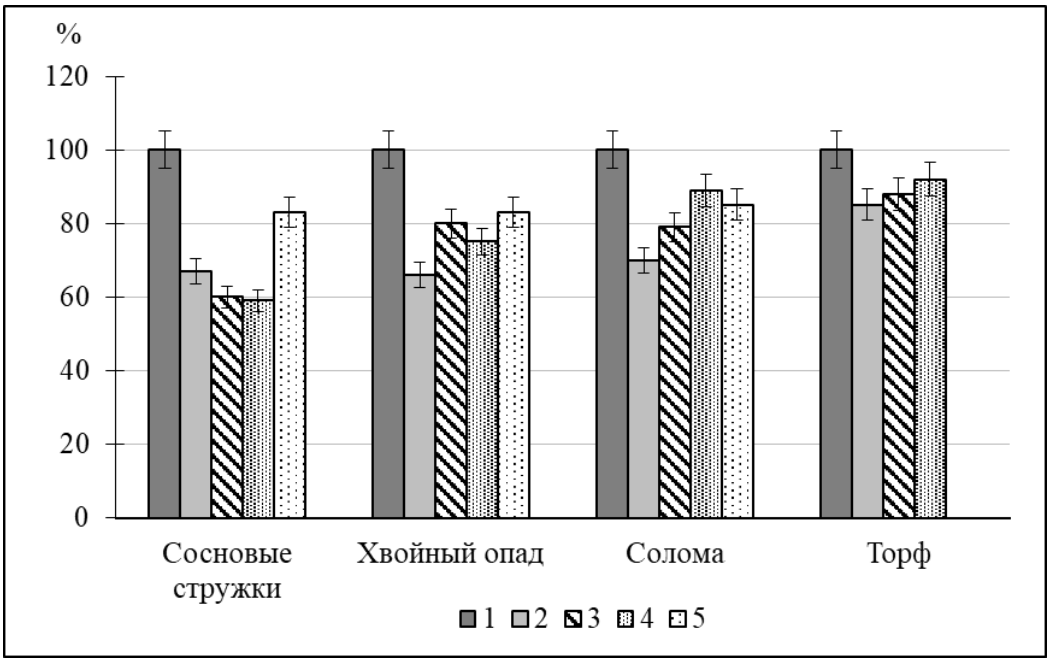


Рисунок 5 – Изменение активности почвенных ферментов после воздействия дыма от термической деструкции материалов растительного происхождения: 1 – контроль; 2 – каталаза; 3 – пероксидаза; 4 – полифенолоксидаза; 5 – инвертаза

В результате сжигания материалов на основе каучука – автомобильная резина – выявлено снижение активности каталазы на 42% по отношению к контролю. Аналогичные изменения были в отношении пероксидазы, полифенолоксидазы и инвертазы из класса гидролаз (рис. 6). Также выявили активность ферментов после влияния газообразных веществ от сжигания материалов на основе полистирола (рис. 7а) и поливинилхлорида (рис. 7б). Ферментативная активность чернозема после воздействия дыма от термической деструкции ПВХ-линолеума снизилась на 6-73%, а от сжигания полистирольных стаканчиков – на 7-29%.

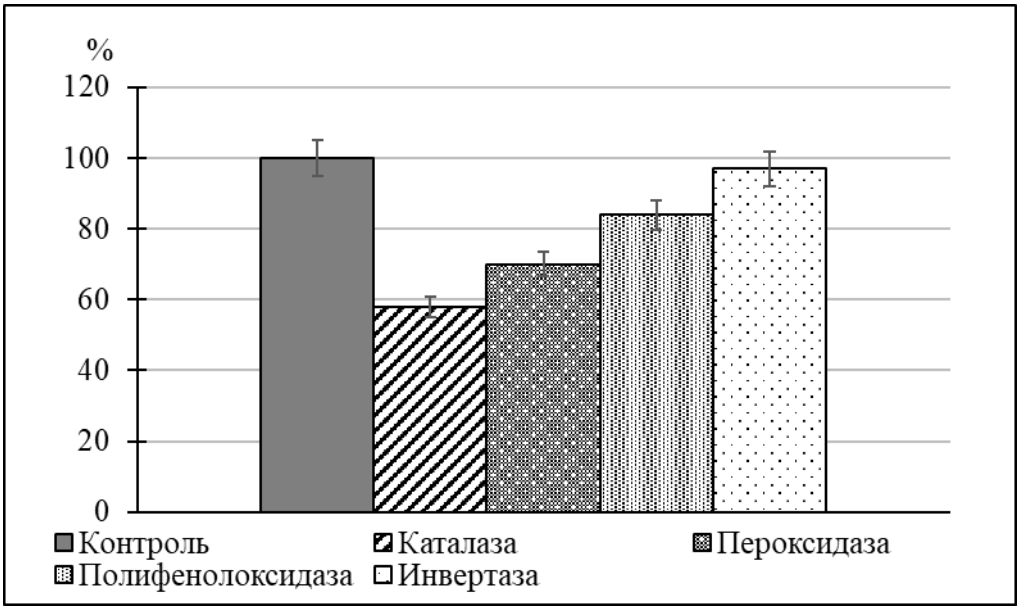


Рисунок 6 – Изменение ферментативной активности чернозема после сжигания материалов на основе каучука (автомобильная резина)

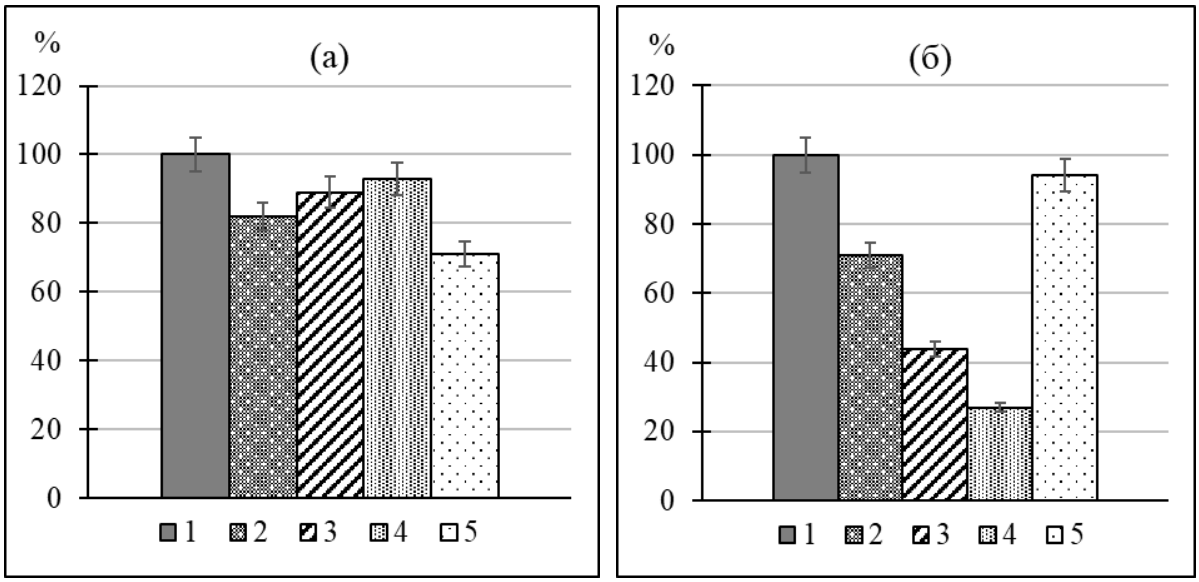


Рисунок 7 – Изменение ферментативной активности чернозема после воздействия дыма (30 мин) от сжигания материалов на основе полистирола (а) и поливинилхлорида (б): 1 – контроль; 2 – каталаза; 3 – пероксидаза; 4 – полифенолоксидаза; 5 – инвертаза

### 4.1.6. Влияние дыма на почву при моделировании пожаров в полевых условиях

При проведении полевого опыта в июне 2022 года в ботаническом саду ЮФУ (на пашне) выявлено закономерное уменьшение активности почвенных ферментов в зависимости от продолжительности (опыт № 8) фумигации 30-120 мин (рис. 8). Также в полевых условиях оценили воздействие фумигации на почву (опыт № 9) в зависимости от интенсивности задымления (рис. 9).

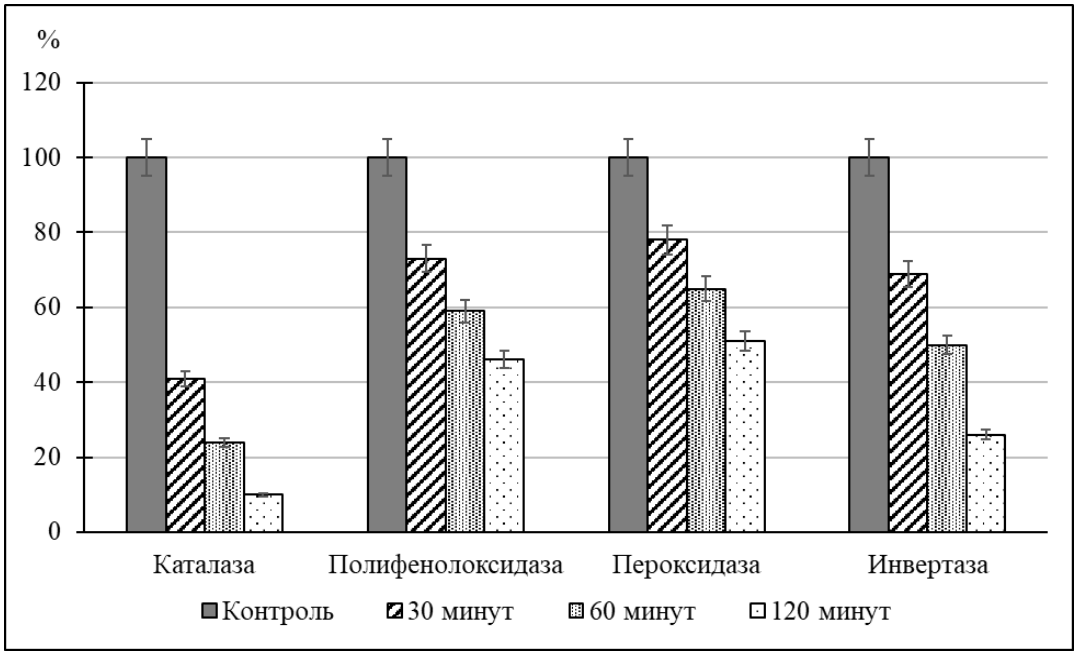


Рисунок 8 – Изменение активности почвенных ферментов после фумигации чернозема в естественных условиях в течение 30-120 мин

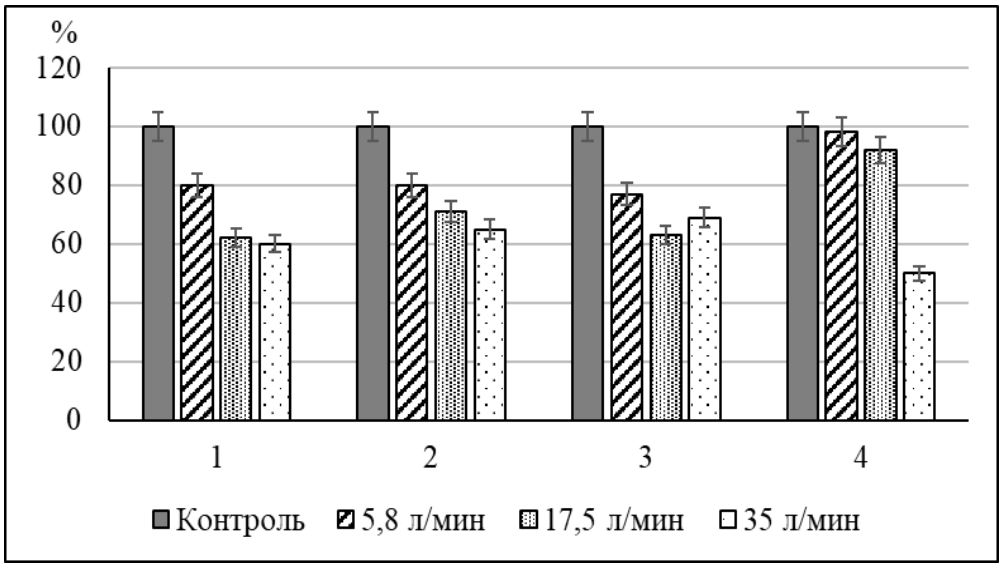


Рисунок 9 – Снижение активности почвенных ферментов в зависимости от интенсивности фумигации чернозема: 1 – каталаза; 2 – пероксидаза; 3 – полифенолоксидаза; 4 – инвертаза

## 4.2. Изменение почвенной биоты после воздействия дыма

### 4.2.1. Изменение микробиологической активности почв

При проведении первого теста в рамках опыта № 11 численность *Micromycetes* на чашках Петри зависела от времени обработки их дымом. Установлено существенное сокращение численности исследуемых организмов за 30-60 мин фумигации. За указанное время численность снизилась на 25-57%. Большая устойчивость к дыму выявлена для *Azotobacter chroococcum*, где наибольшее подавление произошло после 60 мин – значение показателя снизилось относительно контроля на 18% (рис. 10).

Во втором тесте также выявлена большая устойчивость бактерий к дыму по сравнению с микромицетами (рис. 11). Численность грибов за 10-60 минут фумигации

почвы уменьшилась относительно контроля на 25-87%, в то время как численность бактерий снизилась на 28-33%.

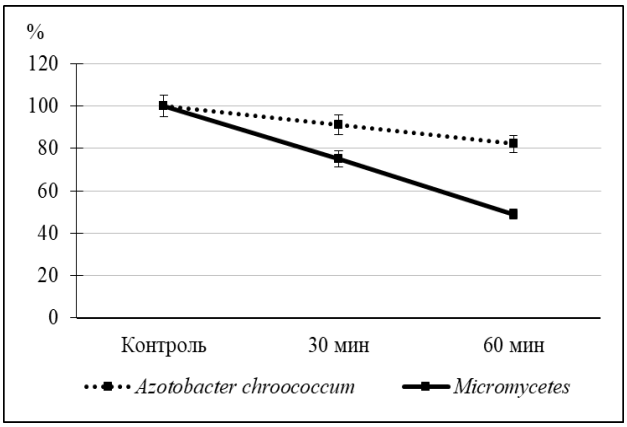


Рисунок 10 – Изменение численности *Micromycetes* и обилия бактерий рода *Azotobacter* после воздействия дыма в течение 30-60 минут при моделировании пожаров

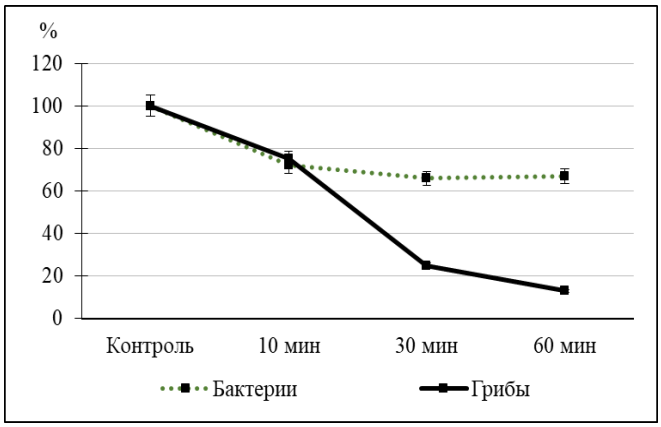


Рисунок 11 – Уменьшение численности грибов и бактерий после 10-60 минут фумигации почвы

Помимо этого была определена чувствительность чистых культур микроорганизмов к дыму (опыт № 12). За 5 минут фумигации полностью подавились *Fusarium oxysporum, Venturia inaequalis, Fusarium moniliforme, Fusarium graminearum, Cladosporium cucumerinum*. Был проведен дополнительный тест, в котором минимальное время фумигации было сокращено до 1 мин (табл. 3). В качестве объектов исследования были выбраны те же культуры, а также: *Penicillium chrysogenum, Rhodotorula rubra, Lipomyces starkeyi, Acinetobacter calcoaceticus, Streptomyces violaceus, Kocuria rosea*.

Таблица 3

Подавление чистых культур микроорганизмов после воздействия дыма на протяжении 1-10 мин

| **Культура** | **Продолжительность фумигации** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **Контроль** | **1 мин** | **3 мин** | **5 мин** | **10 мин** |
| *Fusarium oxysporum* | ++ | - | - | - | - |
| *Venturia inaequalis* | ++ | - | - | - | - |
| *Fusarium moniliforme* | ++ | - | - | - | - |
| *Fusarium graminearum* | ++ | - | - | - | - |
| *Cladosporium cucumerinum* | ++ | - | - | - | - |
| *Streptomyces violaceus* | ++ | - | - | - | - |
| *Penicillium chrysogenum* | ++ | ++ | - | - | - |
| *Acinetobacter calcoaceticus* | ++ | ++ | + | - | - |
| *Lipomyces starkeyi* | ++ | ++ | + | - | - |
| *Rhodotorula rubra* | ++ | ++ | + | + | - |
| *Kocuria rosea* | ++ | ++ | + | + | - |

Примечание
++ Размножение сопоставимо с контролем
+ Частичное размножение микроорганизмов
- Нет признаков размножения

Установлено, что *Streptomyces violaceus* обладает высокой чувствительностью к газообразным продуктам горения. Полное угнетение культуры было выявлено через 1

мин фумигации. После 3 мин фумигации замечено полное подавление *Penicillium chrysogenum*. Но *Rhodotorula rubra, Acinetobacter calcoaceticus, Kocuria rosea* и *Lipomyces starkeyi* все еще проявляли устойчивость к дыму. Более того, *Rhodotorula rubra* и *Kocuria rosea* показали слабую способность к росту даже через 5 мин после воздействия продуктов горения, в то время как роста остальных микроорганизмов после фумигации не выявлено.

### 4.2.2. Влияние дыма на мезофауну

Воздействие дыма на тараканов *(Nauphoeta cinerea)* в течение 1, 5 и 10 мин фумигации не вызвало их иммобилизацию, отмечалась высокая подвижность особей (опыт № 13). Но воздействие дыма в течение 30 мин вызвало гибель 80% исследуемых организмов. После фумигации дождевых червей *(Eisenia fetida)* в скрининговом тесте (без почвы) в течение 1, 5, 10 мин задымления также не зафиксировано летальных исходов. После 30 мин фумигации замечена крайне низкая активность, обработка дымом тест-организмов привела к 100%-ному летальному исходу. Во втором тесте дождевых червей помещали перед фумигацией в почву. Подсчет жизнеспособных червей после теста проводили аналогично скрининговому тесту. Выявлена смертность 40% испытуемых тест-организмов при максимальной продолжительности опыта 30 мин.

### 4.2.3. Исследование трофической активности фауны после фумигации почвы

В результате проведения исследования летом 2022 года по изменению трофической активности фауны после воздействия газообразных продуктов горения (опыт № 14) установлено, что спустя 14 сут после опыта процент съеденных приманок в пластинах в контрольном варианте составил 41%. На опытных участках процент съеденных приманок заметно снизился и составлял 3-12% в зависимости от продолжительности фумигации. Аналогичный эксперимент выполнили в июне 2023 года на опытных и контрольных участках, расположенных на залежи и насаждениях сосны крымской. Однако если результаты сравнить с предыдущим тестом, то заметна существенная разница. Процент съеденных приманок на контрольном участке залежи составил 96,5%, а на опытном – 89,5%. На контрольном и опытном участках насаждений сосны похожая ситуация (93% и 89% соответственно).

### 4.2.4. Целлюлозолитическая активность почв после фумигации

В результате исследования целлюлозолитической активности почв летом 2022 года выявлено снижение массы пакетиков на 6-16% относительно контроля (опыт № 15). Похожий эксперимент провели в июне 2023 года на опытных и контрольных участках, расположенных на залежи и насаждениях сосны крымской в ботаническом саду ЮФУ. Существенных различий в снижении массы содержимого пакетиков на опытных и контрольных площадках после 90 сут инкубации не обнаружено.

### 4.2.5. Влияние дыма при моделировании пожаров, оказываемое на растения

В результате проведения опыта № 16 по фумигации растений с/х культур оценивали замеры длин корней и побегов, а также следили за морфологическими изменениями гороха, редиса, пшеницы. Наибольшей резистентностью к стрессору обладал горох. При анализе морфологических изменений зафиксирован некроз – отмирание участков корней, листьев у исследуемых культур. Дополнительно был выполнен еще один тест в рамках данного опыта с этими же культурами (рис. 12-15). Помимо редиса, гороха и пшеницы анализировали изменения ячменя после фумигации. Кроме того, было добавлено несколько вариантов обработки культур дымом.

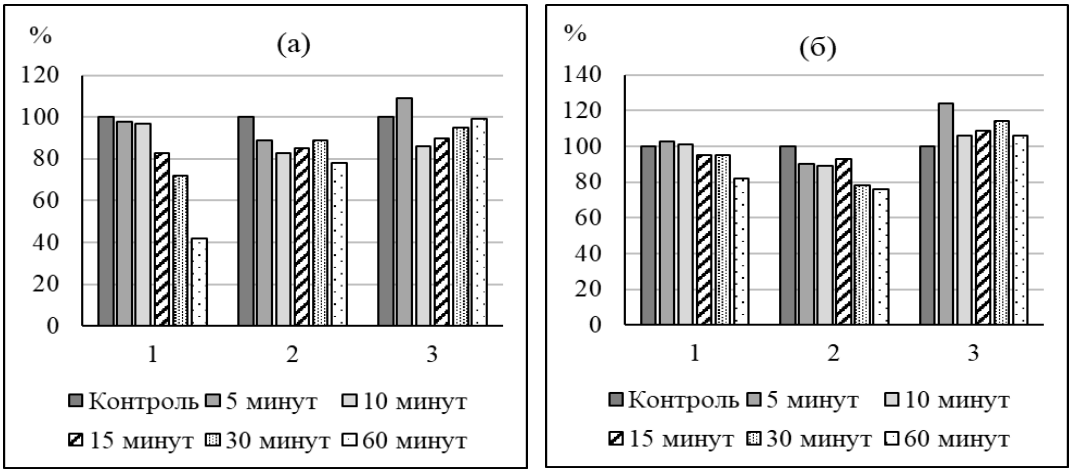


Рисунок 12 – Изменение длины корней (а) и побегов (б) у гороха (*Pisum sativum*) после трех вариантов фумигации: 1 – фумигация заранее проросших в почве растений; 2 – посев необработанных дымом семян на фумигированную почву; 3 – пересев проростков из водной среды в фумигированную почву

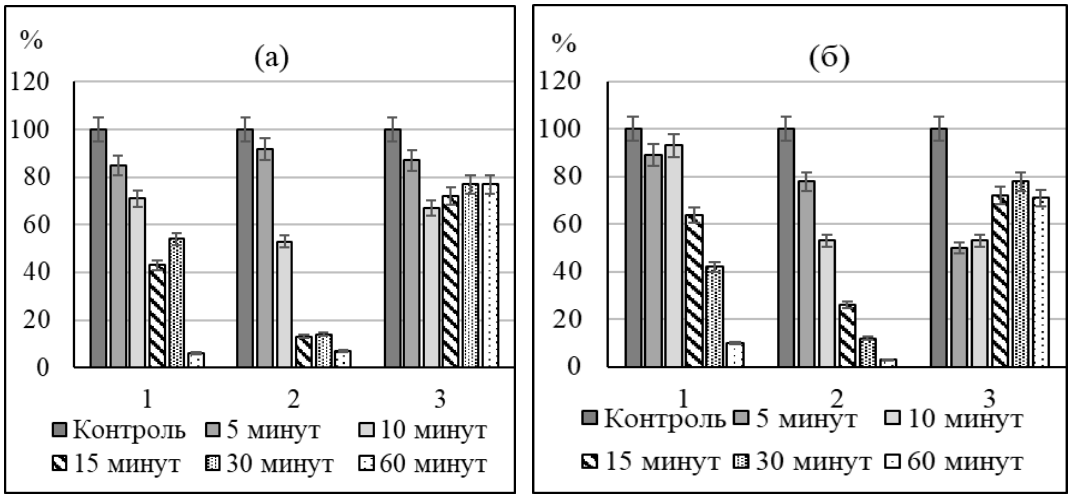


Рисунок 13 – Изменение длины корней (а) и побегов (б) у редиса (*Raphanus sativus*) после трех вариантов фумигации. Обозначения, как на рис. 12

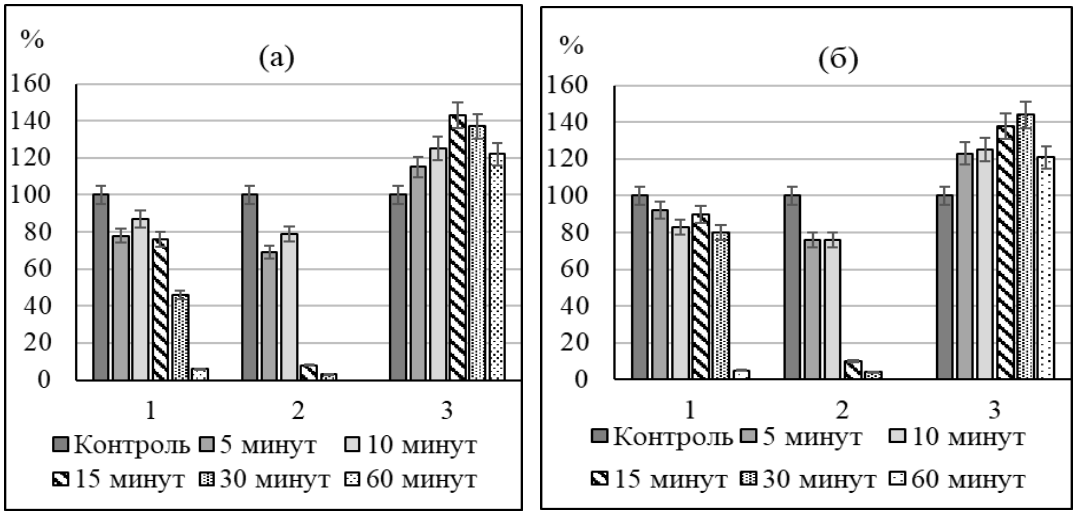


Рисунок 14 – Изменение длины корней (а) и побегов (б) у пшеницы (*Triticum aestivum*) после трех вариантов фумигации. Обозначения, как на рис. 12

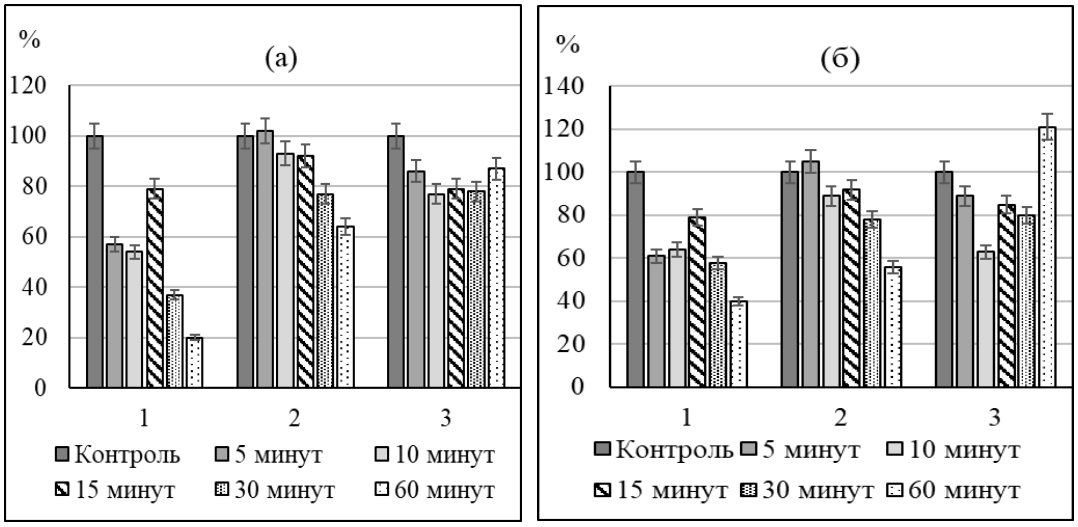


Рисунок 15 – Изменение длины корней (а) и побегов (б) у ячменя (*Hordeum vulgare*) после трех вариантов фумигации. Обозначения, как на рис. 12

Помимо этого выполнена фумигация растений в естественной среде (опыт № 17) в июне 2023 года в ботаническом саду ЮФУ. Был выполнен эксперимент по фумигации растительных сообществ на залежи и насаждении сосны крымской. После опыта, спустя сутки, а также спустя 16 и 36 сут с момента фумигации следили за морфологическими изменениями на опытных участках.

### 4.3. Химический состав дыма при моделировании пожаров

В данном исследовании (опыт № 18) выявлено значительное превышение в воздухе при горении сосновых стружек концентраций газообразных веществ. Полученные значения сравнивались с СанПиН 1.2.3685-21 по предельно допустимым концентрациям (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе в городских и сельских поселениях. Установлено превышение в воздухе концентраций оксида углерода – 3570 мг/м$^3$, что в 714 раз превышает допустимую максимально разовую концентрацию, в 1190 раз – среднесуточную и среднегодовую. Зарегистрировано превышение максимально разовой концентрации формальдегида в 190,6 раза, среднесуточной – в 953 раза и среднегодовой – в 3176 раз. Превышение фенола ($C_6H_6O$) было в 441 (максимально разовая), 735

(среднесуточная) и 1470 раз (среднегодовая). Аналогичные изменения наблюдали с оксидом и диоксидом азота и ацетальдегидом (табл. 4).

Таблица 4

Концентрации химических соединений дыма в эксперименте от сжигания сосновых стружек по сравнению с допустимыми значениями (согласно СанПиН 1.2.3685-21)

| Вещество | Концентрация в эксперименте, мг/м$^3$ | Допустимые концентрации, мг/м$^3$ (согласно СанПиН 1.2.3685-21) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Максимально разовая | Среднесуточная | Среднегодовая |
| Диоксид серы | 0,28 | 0,5 | 0,05 | - |
| Оксид углерода | 3570 | 5 | 3 | 3 |
| Диоксид азота | 60 | 0,2 | 0,1 | 0,04 |
| Оксид азота | 40 | 0,4 | - | 0,06 |
| Ацетальдегид | 241 | 0,01 | - | 0,005 |
| Формальдегид | 9,53 | 0,05 | 0,01 | 0,003 |
| Фенол гидроксибензол | 4,41 | 0,01 | 0,006 | 0,003 |
| Гексан | 238 | 60 | 7 | 0,7 |

## 4.4. Накопление полициклических ароматических углеводородов в почве от сжигания материалов растительного и синтетического происхождения

Снижение ферментативной активности почв связано также и с ПАУ. Полученные концентрации ПАУ в почве сопоставляли с регламентированными канадскими нормативами и СанПиН 1.2.3685-21. В ходе анализа почвы (опыт № 19) после влияния дыма от сжигания материалов растительного происхождения (сосновые стружки) концентрация нафталина составила 57,3 нг/г (превышение в 4,4 раза допустимого значения), фенантрена – 132,3 нг/г (превышение в 2,8 раза). Подобные результаты были получены при анализе ПАУ в почве (опыт № 20) после воздействия дыма от термической деструкции торфа, материалов на основе каучука, полистирола, поливинилхлорида. Обращает на себя внимание значительное превышение нафталина и фенантрена в черноземе обыкновенном после задымления почвы от термической деструкции материалов на основе каучука. Концентрация нафталина превысила фоновое значение в 51,6 раза, допустимое – в 32,5 раза. Значение фенантрена превысило фоновое и допустимое в 26,6 и 7,7 раза соответственно. Также обнаружено превышение концентрации пирена в почве, которое в 3,9 раза выше фонового и в 1,5 раза допустимого значения.

## 4.5. Восстановление ферментативной активности почв после воздействия дыма

В рамках данного исследования было выполнено 2 опыта. В первом опыте (опыт № 21) проследили динамику восстановления ферментативной активности чернозема обыкновенного в лабораторных условиях и естественных условиях после воздействия дыма без применения биопрепаратов. В лабораторных условиях каталазная активность снизилась на 55-77% после 30-120 минут обработки почвы дымом. Активность пероксидазы и полифенолоксидазы уменьшилась на 57-69% и 48-61% соответственно

(рис. 16). Через месяц установили постепенное восстановление ферментативной активности без применения биопрепаратов. Однако полное восстановление активности было зафиксировано спустя 90 сут.

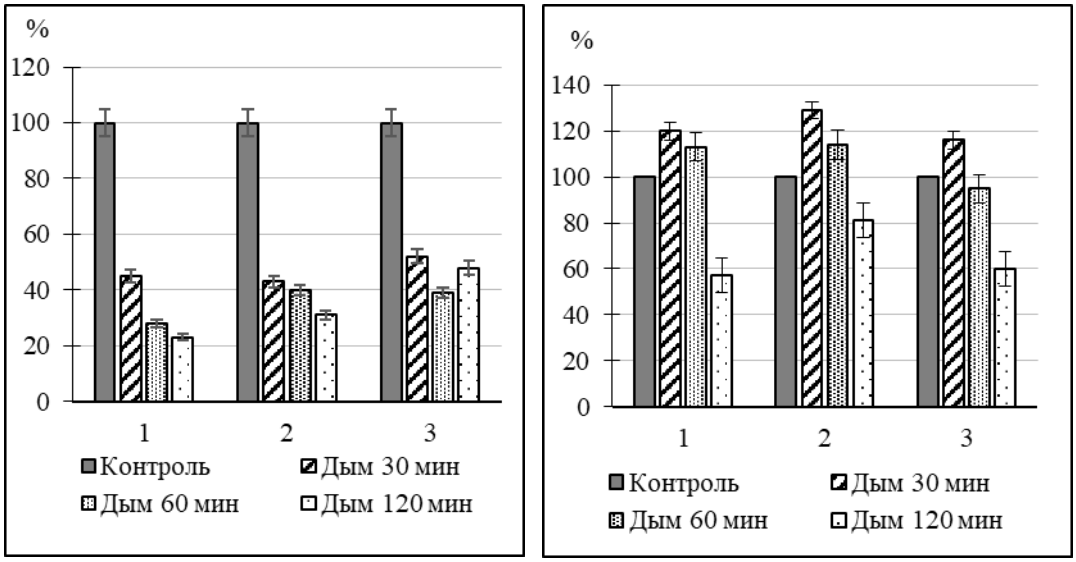


Рисунок 16 – Влияние фумигации на чернозем в лабораторных условиях (а) и динамика восстановления (б) спустя 1 месяц: 1 – каталаза, 2 – пероксидаза, 3 – полифенолоксидаза

В полевых условиях активность каталазы в течение 30-120 мин снизилась на 13-42%, пероксидазы – на 8-29%, а полифенолоксидазы – на 7-30%. Через месяц выявили, что ни один из показателей не восстановился до контрольных значений.

Также был поставлен опыт по восстановлению чернозема после фумигации при помощи биопрепаратов. После 60 мин фумигации почвы (опыт № 2) в каждый из образцов добавили по одному препарату. Спустя 21 сут выполнили анализы. При добавлении 0,2%-ного раствора NAGRO и 1%-ного раствора гумата калия активность каталазы относительно снижения активности фермента в опыте № 2 увеличилась на 50%. После применения 1%-ного раствора «Байкала ЭМ1» – на 37%, после 10%-ного раствора гумата калия активность каталазы увеличилась на 49%. Значения полифенолоксидазы возросли после «Байкала ЭМ1» относительно снижения активности фермента в опыте № 2 на 40%, после 1%-ного и 10%-ного растворов гумата калия – на 35% и 38%, после NAGRO – на 30% (восстановление до контроля не произошло). Увеличение активности фосфатазы относительно фумигации почвы в опыте № 2 было зафиксировано только после добавления «Байкала ЭМ1» (на 28%) и после 10%-ного раствора гумата калия (на 58%).

## Выводы

1. При оценке воздействия дыма на почву выявлено значительное снижение активности почвенных ферментов. Наибольшая чувствительность зарегистрирована для оксидоредуктаз, таких как каталаза, пероксидаза и полифенолоксидаза. Выявлена четкая закономерность изменения ферментативной активности в зависимости от времени обработки почвы дымом. Изменения произошли даже при 15-минутном воздействии газообразных веществ на активность каталазы (снижение на 10%). Увеличение продолжительности опыта до 60 минут приводило к снижению активности каталазы на 25%.

2. Воздействие на сухую и увлажненную почву ослабевает ниже слоя 0-1 см. При этом воздействие на увлажненную почву было сильнее, где активность каталазы в слое 0-1 см ингибирована на 41-58% в зависимости от продолжительности задымления, а в сухой – на 19-37%. В слое 4-5 см в сухой почве активность фермента ингибирована на 5-10%, в увлажненной почве достоверных значений не выявлено.

3. В результате хронического воздействия дыма на почву активность почвенных ферментов снизилась на 41-84%, а реакция среды (pH) снизилась на 0,6-2,3 ед. Эффект периодического воздействия дыма привел к ингибированию ферментов до 78%.

4. Дым при моделировании пожаров оказал существенное влияние на биологическую активность почв разного генезиса. По чувствительности каталазы исследуемые почвы можно расположить в ряд: чернозем (ингибирование на 75%) > серопески (66%) > коричневые (57%) > буроземы Крыма (37%) ≥ буроземы Кавказа (36%). По чувствительности пероксидазы: чернозем (ингибирование на 79%) > буроземы Крыма (на 69%) > серопески (на 62%) > буроземы Кавказа = коричневые почвы (на 58%). По чувствительности полифенолоксидазы: коричневые (ингибирование на 71%) ≥ чернозем (на 70%) > серопески (на 61%) > буроземы Крыма (на 56%) ≥ буроземы Кавказа (на 54%). По чувствительности инвертазы: буроземы Кавказа (ингибирование на 30%) ≥ коричневые = серопески (на 28%) > чернозем (на 20%) ≥ буроземы Крыма (на 18%). Реакция среды почв разного генезиса снизилась на 0,6-1,9 ед. pH.

5. Выявлено снижение ферментативной активности чернозема обыкновенного при оценке воздействия дыма на почву в течение 30 мин от термодеструкции материалов растительного и синтетического происхождения: торфа – до 15%, соломы – до 30%, хвои – до 34%, сосновых стружек – до 41%, полистирола – до 29%, каучука – до 42%, поливинилхлорида – до 73%.

6. Численность микроскопических грибов после 10-60 мин фумигации уменьшилась на 25-87% относительно контроля, а обилие бактерий *Azotobacter* уменьшилось на 28-33%. Изменения численности, роста и развития микроорганизмов находились в прямой зависимости от продолжительности воздействия стрессового фактора. При оценке воздействия фумигации на чистые культуры (скрининговый тест) наиболее устойчивыми оказались *Rhodotorula rubra* и *Kocuria rosea*.

7. Установлен высокий уровень смертности у дождевых червей (*Eisenia fetida*) в скрининговом тесте (100%) после 30-минутного воздействия дыма. В тесте с почвой смертность составила 40%. Летальный исход наблюдали и у тараканов (*Nauphoeta cinerea*) – 80% после 30 мин нахождения тест-организмов под дымом.

8. Выявлено снижение трофической активности фауны при фумигации чернозема ботанического сада ЮФУ в полевом эксперименте на залежи в 3,4-13,6 раза в зависимости от времени воздействия. Также установлено снижение целлюлозолитической активности (TBI) почв на 6-16%. При повторном исследовании фумигации почвы на залежи и насаждениях сосны не было зафиксировано достоверных изменений этих показателей.

9. Дым вызывает хлороз и некроз растений, а также повышение фитотоксичности почвы. Горох обладает большей резистентностью вследствие крупного размера семян, которые обладают большими питательными запасами. Чувствительной

тест-культурой оказался редис. Длина его корней уменьшалась на 8-94% в разных вариантах фумигации.

10. В дыму от сосновых стружек выявлены значительные превышения максимально разовых концентраций оксида и диоксида азота (NO, $NO_2$) в 100 и 300 раз соответственно, оксида углерода (CO) – в 714 раз, ацетальдегида ($C_2H_4O$) – в 24 100 раз, формальдегида ($CH_2O$) – в 190 раз, фенола ($C_6H_6O$) – в 441 раз и гексана ($C_6H_{14}$) – в 3,9 раза. Выявлено накопление ПАУ в фумигированной почве с превышением ПДК нафталина в 4,4 раза, фенантрена – в 2,9 раза от сжигания сосновых стружек. Дым от термического разложения торфа повышает содержание нафталина в 7,1 раза, фенантрена – в 2,4 раза. Среди материалов синтетического происхождения наибольшее накопление ПАУ выявлено при сжигании каучука с превышением ПДК нафталина в 32,5 раза, фенантрена – в 7,7 раза.

11. Выявлено восстановление биологической активности почв после фумигации спустя 30-90 сут с момента задымления. После слабого (30 мин) и среднего (60 мин) воздействия дыма в лабораторных условиях активность каталазы, пероксидазы и полифенолоксидазы восстановилась до контрольных значений через 30 сут. В этот срок при сильном уровне воздействия (120 мин) ферментативная активность все еще была снижена на 19-43%, а восстановление отметили через 90 сут. В полевых условиях ботанического сада процесс восстановления ферментативной активности протекал медленнее. Активность каталазы в полевом опыте через 30 сут была ингибирована 30-120-минутной фумигацией на 9-15%, пероксидазы – на 7-11%, полифенолоксидазы – на 4-37%. Биопрепараты NAGRO (0,2%-ный раствор), «Байкал ЭМ1» (1%-ный раствор) и растворы гумата калия (1%-ный и 10%-ный) способствовали ускоренному восстановлению активности ферментов. Активность каталазы и полифенолоксидазы восстановилась уже спустя 21 сут после фумигации почвы после применения всех исследуемых биостимуляторов.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи, опубликованные в журналах, входящих в базы данных международных индексов научного цитирования Scopus и/или Web of Science

1. Effect of Smoke Caused by Fires on the Enzymatic Activity of Forest Soils in the North Caucasus (Russian Federation) / **M. S. Nizhelskiy**, K. S. Kazeev, V. V. Vilkova, A. N. Fedorenko, A. K. Shkhapatsev, S. I. Kolesnikov // Soil Systems. – 2023. – Vol. 7. – №3. – P. 77. – DOI 10.3390/soilsystems7030077 (Q1)

2. Inhibition of Enzymatic Activity of Ordinary Chernozem by Gaseous Products of Plant Matter Combustion / **M. S. Nizhelskiy**, K. Sh. Kazeev, V. V. Vilkova, S. I. Kolesnikov // Eurasian Soil Science. – 2022. – Vol. 55. – №6. – P. 802-809. – DOI 10.1134/S1064229322060096 (Q2)

3. Smoke Toxicity to the Biota and the Biological Activity of Soils When Modeling Fires / **M. S. Nizhelskiy**, K. S. Kazeev, V. V. Vilkova, A. N. Fedorenko, S. I. Kolesnikov // Biology Bulletin. – 2023. – Vol. 50. – P. 2765-2773. – DOI 10.1134/S1062359023100217 (Q4).

4. Continuous and Periodical Effects of Smoke from Crop Residue Combustion on Soil Enzymatic Activity / **M. S. Nizhelskiy**, K.Sh. Kazeev, V. V. Vilkova, A. N. Fedorenko,

S. N. Sushkova, S. I. Kolesnikov // Eurasian Soil Science. – 2024. – Vol. 57. – № 4. – P. 623–634. DOI: 10.1134/S1064229323603256 (Q2).

## Статьи, опубликованные в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ЮФУ

5. Использование активности ферментов для диагностики последствий фумигации дымом почв / **Нижельский М. С.**, Казеев К. Ш., Шхапацев А. К., Колесников С. И. // АгроЭкоИнфо. – 2021. – № 4(46). – DOI 10.51419/20214426

6. **Нижельский М. С.** Влияние биологических препаратов на ферментативную активность чернозема обыкновенного после фумигации дымом от опилок / М. С. Нижельский, К. Ш. Казеев, С. И. Колесников // Агрохимический вестник. – 2021. – № 5. – С. 28–33. – DOI 10.24412/1029-2551-2021-5-006

7. Влияние дыма палов и пожаров на всхожесть и интенсивность начального роста сельскохозяйственных культур (модельный эксперимент) / **М. С. Нижельский**, В. В. Вилкова, В. Д. Приходько, К. Ш. Казеев // Проблемы агрохимии и экологии. – 2022. – № 2. – С. 55–58. – DOI 10.26178/AE.2022.81.65.008

## Монография

8. Вилкова, В. В. Оценка влияния факторов пирогенного воздействия на биологические свойства почв : монография / В. В. Вилкова, **М. С. Нижельский**, К. Ш. Казеев. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2023. – 151 с. – ISBN 978-5-9275-4470-7.