

Оригинальная статья

УДК 631.46:574.4: 630.43

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-196-213>

ТОКСИЧНОСТЬ ДЫМА ДЛЯ БИОТЫ И БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ПОЧВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПОЖАРОВ

М. С. Нижельский ✉, К. Ш. Казеев, В. В. Вилкова,
А. Н. Федоренко, С. И. Колесников

Южный федеральный университет

Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, д. 105/42

Поступила в редакцию 18.08.2022 г., после доработки 22.02.2023 г., принята 07.03.2023 г., опубликована 21.06.2023 г.

Аннотация. Приводятся результаты по влиянию одного из видов пирогенного фактора (дым) после сжигания стружек хвойных пород деревьев на биоиндикаторы (почвенные ферменты, микроорганизмы, мезофауна, растения сельскохозяйственных культур). Установлено, что задымление в течение 60 минут значительно повлияло на ферментативную активность чернозема обыкновенного. Посредством фумигации произошло снижение таких ферментов, как каталаза, пероксидаза, полифенолоксидаза и инвертаза. Наиболее чувствительными к дыму оказались ферменты класса оксидоредуктаз. Выявлена высокая токсичность газообразных продуктов горения к почвенной флоре и фауне. В результате воздействия фумигации на биоиндикаторы определена острая токсичность дыма. Зафиксирована высокая смертность тест-объектов в опытах (*Eisenia fetida*, *Nauphoeta cinerea*). Почвенные микроорганизмы (*Azotobacter chroococcum* и *Penicillium chrysogenum*) оказались информативным показателем после 30 – 120 минут фумигации. Выявлена устойчивость всходов растений (*Raphanus sativus*, *Triticum aestivum*, *Pisum sativum*) к газообразным продуктам горения. Выполнен эксперимент по определению химического состава газов в дыму. Установлено, что в нем содержатся такие опасные соединения, как диоксид серы (SO₂), оксид и диоксид азота (NO, NO₂), оксид углерода (CO), ацетальдегид (C₂H₄O), формальдегид (CH₂O), фенол (C₆H₆O) гидроксибензол и другие, которые оказали неблагоприятное воздействие на индикаторы. Анализ выявил, что концентрация оксида углерода в 714 раз превышала максимально разовую предельно допустимую концентрацию (ПДК), ацетальдегида – в 24100 раз, концентрация оксида азота и диоксида азота – в 100 и 300 раз соответственно.

Ключевые слова: пирогенное воздействие, биотестирование, биоиндикаторы, ферменты, тест-объекты, микроорганизмы, токсичность, химический состав дыма

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (№ FENW-2023-0008) и при финансовой поддержке ведущей научной школы Российской Федерации (НШ-449.2022.5).

✉ Для корреспонденции. Кафедра экологии и природопользования Академии биологии и биотехнологии им. Д. И. Иванковского, Южный федеральный университет.

ORCID и e-mail адреса: Нижельский Михаил Сергеевич: <https://orcid.org/0000-0001-6443-6039>, nizhelskiy@sfedu.ru; Казеев Камил Шагидуллович: <https://orcid.org/0000-0002-0252-6212>, kamil_kazeev@mail.ru; Вилкова Валерия Валерьевна: <https://orcid.org/0000-0002-1374-3941>, lera.vilkova.00@mail.ru; Федоренко Анастасия Николаевна: <https://orcid.org/0000-0002-1690-6048>, pushok.mur@yandex.ru; Колесников Сергей Ильич: <https://orcid.org/0000-0001-5860-8420>, kolesnikov@sfedu.ru.

Для цитирования. Нижельский М. С., Казеев К. Ш., Вилкова В. В., Федоренко А. Н., Колесников С. И. Токсичность дыма для биоты и биологической активности почв при моделировании пожаров // Поволжский экологический журнал. 2023. № 2. С. 196 – 213. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-196-213>

ВВЕДЕНИЕ

Пожары наносят катастрофический ущерб природным сообществам, в том числе оказывают неблагоприятное воздействие на почву. В результате изменяются биохимические свойства почв, которые влияют на доступность питательных веществ для растений (Pellegrini et al., 2020). В значительной степени происходят изменения и биоты почв (Certini et al., 2021). Последствия природных пожаров могут включать повышение уровня аэрозолей и CO₂ в атмосферном воздухе с последующим осаждением токсичных веществ на почву. Они, в свою очередь, оказывают прямое негативное воздействие на функционирование биоты и на здоровье почв.

Большая часть организмов, обитающих в почве, фактически находится в поверхностном слое, наиболее подверженном воздействию высоких температур во время пожара (Swengel, 2001; Doamba et al., 2014).

Известно, что при пирогенном воздействии изменяется температурный режим, химические свойства почв, происходит уменьшение влагоёмкости и водопроницаемости, уменьшение численности микроорганизмов (Kazeev et al., 2020 *a, b*). Однако активное задымление также может привести к снижению интенсивности микробиологических процессов и ферментативной активности (Вальков и др., 1996). Поэтому следует более подробно рассмотреть протекающие в почве процессы, обусловленные фумигацией (задымлением). Дым содержит опасные токсины, в нем много фенольных соединений, которые, как известно, обладают мутагенными и канцерогенными свойствами (Синьков, Почапский, 2017; Бердникова, 2019). Оксиды углерода, азота и другие вещества также опасны в составе продуктов горения, образующихся в результате термической деструкции.

Для выявления изменений, происходящих в почве, проводят мониторинг. Биоиндикация является распространенным методом оценки изменений в почве (Breg et al., 2017; Erdős et al., 2017). Живые организмы предоставляют информацию о негативном воздействии стрессовых факторов окружающей среды, и поэтому биоиндикация дополняет физические и химические исследования почв (Heger et al., 2012). Биотестирование проводят для определения общей токсичности, мутагенности и канцерогенности почв (Романов, Любомирова, 2009; Terekhova, 2011). Использование растений в оценке качества почв является приоритетным направлением биоиндикации. Это связано с тем, что продуцентам принадлежит основополагающая роль в жизни биогеоценозов и круговороте веществ и энергии в биосфере (Неверова, Еремеева, 2006). Фитоиндикация осуществляется по реакции растений на воздействие внешних факторов. Выбор изучаемых показателей биологической активности поврежденных почв должен основываться на нескольких критериях: информативности показателя, высокой чувствительности, небольшой ошибке опытов, незначительном варьировании показателя, широкой доступности

использования метода (Казеев и др., 2016). Наиболее корректный результат достигается при использовании нескольких тест-объектов из разных систематических групп (Федеральный закон от 24.06.98 N 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления»).

Цель работы – исследовать влияние дыма при моделировании пожаров на ферментативную активность чернозема обыкновенного, мезофауну, микроорганизмы и растения сельскохозяйственных культур. Для этого требовалось провести анализ по изменению активности почвенных ферментов (каталазы, полифенолоксидазы, пероксидазы, инвертазы, уреазы) и определить показатели, наиболее чувствительные к воздействию дыма. Также в ходе проведения исследований было необходимо установить временной порог влияния фумигации, в процессе которой будет зафиксирована смертность мезофауны (тараканов и дождевых червей), выявить резистентность проростков растений к фумигации и выявить подавление микроорганизмов после задымления.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектами исследований были такие живые организмы, как *Penicillium chrysogenum* (Thom, 1910), азотфиксирующие бактерии *Azotobacter chroococcum* (Beijerinck, 1901), тараканы *Nauphoeta cinerea* (Olivier, 1789), черви *Eisenia fetida* (Savigny, 1826), семена растений – *Pisum sativum* L., (1753), *Triticum aestivum* L., (1753), *Raphanus sativus* L., (1753), а также почвенные ферменты (каталаза, полифенолоксидаза, пероксидаза, инвертаза, уреазы).

Почва, подвергающаяся воздействию дыма – чернозем обыкновенный южно-европейской фации карбонатный легкоглинистый (Haplic Chernozem (Aric, Loamic, Pachic)), отобранный из Ботанического сада Южного федерального университета (0 – 10 см). Она обладает высоким плодородием и благоприятными свойствами: хорошей структурой, оптимальной плотностью сложения, хорошей водопроницаемостью, высокой обеспеченностью калием, азотом и фосфором (Вальков и др., 2008; Azarenko et al., 2020; Kazeev et al., 2020 a). Почва опытного участка характеризуется следующими показателями: мощность гумусовых горизонтов (A+B) – 80 см, содержание органического углерода в пахотном горизонте – 2.0%, легкоглинистый гранулометрический состав (содержание физической глины – 53%), содержание подвижного фосфора – 3.3 мг P₂O₅/100 г, обменного калия, K₂O – 341 мг/кг, нитратов, N–NO₃ – 8.4 мг/кг (Nizhelskiy et al., 2022).

Серия модельных экспериментов была проведена в контролируемых условиях при помощи дымогенератора «Merkel Standart» (Helicon, Россия). Фумигацию осуществляли, используя инструкцию производителя компании Helicon (Россия). Биоиндикаторы помещали в газовую камеру объемом 50 л. Подачу воздуха в камеру осуществляли поршневым компрессором Nailia Aco 208 (Naili Group Co. Ltd, Китай), с интенсивностью заполнения дымом 17.5 л/мин. Схема установки для опытов для каждого из исследуемых объектов представлена на рис. 1. Во всех экспериментах температура воздуха была идентична (21°C), а материалами горения были стружки хвойных пород деревьев. При проведении экспериментов относи-

тельная влажность составляла 54 – 58%, атмосферное давление 755 – 757 мм рт. ст. (100.67 – 100.93 кПа). Параметры воздушной среды определили при помощи метеометра МЭС-200А (ЗАО НПП Электронстандарт, Россия). В опытах исследовали только влияние дыма на почву и биоту, температурный фактор и огонь были исключены конструктивными особенностями устройства для фумигации (задымления). В ходе экспериментов установлено, что температура выделяющегося при горении хвойных стружек дыма не превышала 25.8°C (определено термометром ТЛ-2 (ОАО Термоприбор, Россия)).

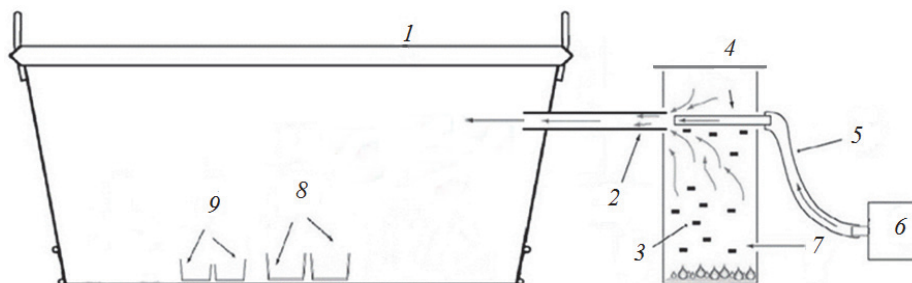


Рис. 1. Схема экспериментов: 1 – газовая камера, 2 – дымовая труба для подачи дыма в газовую камеру, 3 – материалы горения, 4 – трубка для подачи воздуха в дымовую трубу, 5 – шланг от воздушного компрессора, 6 – воздушный компрессор, 7 – отверстие для розжига, 8 – контейнеры с почвой, 9 – контейнеры с тест-объектами

Fig. 1. Scheme of the experiments: 1 – gas chamber, 2 – smoke pipe for smoke supply to the gas chamber, 3 – combustion materials, 4 – air supply pipe to the smoke pipe, 5 – hose from the air compressor, 6 – air compressor, 7 – ignition opening, 8 – containers with soil, 9 – containers with test objects

Изменение биохимических показателей. Почву слоем 0.6 см и массой 40 г помещали в контейнеры объемом 200 мл. Время обработки каждого образца дымом составило 60 мин. Изменение активности почвенных ферментов определяли после фумигации. Активность каталазы – волкуметрическим методом по скорости разложения перекиси водорода (Галстян, 1982). Активность полифенолоксидазы и пероксидазы определены колориметрическим методом по скорости превращения гидрохинона в бензохинон. Активность этих ферментов в значительной степени зависит от pH и некоторых других параметров (Gianfreda, Rao, 2004; Sinsabaugh, 2010). Для определения активности инвертазы использовали колориметрический метод определения образующейся глюкозы из сахарозы с помощью реактива Феллинга. Метод определения активности уреазы основан на определении содержания аммонийного азота при гидролизе мочевины с помощью реактива Несслера. Активность фермента зависит от микробного сообщества, а также физических и химических характеристик почв и меняется при изменении содержания органического вещества, глубины почвы, температуры и pH (Yang et al., 2006; Corstanje et al., 2007).

Обилие микроорганизмов. Численность микроскопических грибов определена методом посева. Для этого использовали чистую культуру *Penicillium chrysogenum* из коллекции кафедры биохимии и микробиологии. Посев проводили на среду Чапека из суспензии микромицета, доведённой до концентрации 10^5 КОЕ/мл, численность конидий контролировали с помощью камеры Горяева. Обилие бактерий *Azotobacter chroococcum* определяли методом комочков обрастания почвы на безазотистой среде Эшби. Чашки Петри с микроорганизмами помещали в газовую камеру для фумигации. Токсичность дыма определяли подсчетом исследуемых микроорганизмов на опытных чашках Петри в сравнении с контрольными чашками без фумигации.

Использование дождевых червей и тараканов в качестве тест-объектов. При помощи дождевых червей оценивается острая токсичность, репродуктивный потенциал, прирост биомассы. При проведении экспериментов за основу взяли метод из государственного стандарта России (Межгосударственный стандарт ГОСТ 33036–2014). Черви *Eisenia fetida* были помещены в контейнеры на 200 мл во влажную почву слоем 0.6 см и массой 40 г. Предварительно почву увлажнили водой (влажность 40% от массы почвы). Поочередно обрабатывали контейнеры с червями дымом в течение 1, 5, 10, 30 мин. Аналогично проводили скрининговый тест, где вместо почвы была фильтровальная бумага. В ходе эксперимента следили за реакцией организмов (скорость зарывания червей в почву). По окончании опыта, а также спустя 24 ч зафиксировали летальный исход (%) организмов. Еще одним не менее важным тест-объектом, который часто используют при оценке состояния наземных экосистем, являются насекомые. Тараканы (*Nauphoeta cinerea*) были помещены в прозрачные контейнеры объемом 1000 мл. Время фумигации и подсчет тараканов были такими же, как и для дождевых червей. Выбор тест-организмов обусловлен удобством их использования и информативностью полученных результатов при биодиагностике (Рассади́на, 2007). Критерием токсичности являлась гибель более 50% тараканов и червей за сутки в тестируемом образце по сравнению с контролем.

Использование растений в качестве тест-объекта. Для эксперимента влажную почву поместили в пластиковые контейнеры объемом 200 мл и увлажнили водопроводной водой (40% от массы почвы). Затем в каждый из контейнеров с почвой сеяли по 10 семян разных культур (*Raphanus sativus*, *Triticum aestivum*, *Pisum sativum*). В течение 4 суток поддерживали оптимальные для прорастания семян условия – влажность, освещенность. По окончании срока проросшие семена подвергали фумигации – 5, 10, 30 мин. После эксперимента в течение 3 суток наблюдали за внешними изменениями проростков. Также измеряли длину корней и побегов растений через 3 суток после фумигации.

Химический состав дыма. При проведении экспериментов по влиянию газообразных продуктов горения на почву и биоту определили также и химический состав дыма. Забор дыма осуществили при помощи газоанализатора ДАГ-16 (ООО Дитгаз, Россия) по методикам: ПНД Ф 13.1.41-2003 (издание 2012), ПНД Ф 13.1:2:3.59-07 (издание 2005), ПНД Ф 13.1:2:3.23-98 (издание 2005), ФР.1.31.2009.05508 (издание 2004), М-МВИ 173-06 (издание 2006), ПНД Ф

13.1.2:3.27-99 (издание 2005), М-18 (издание 2002), М-14 (издание 2011), М-15 (издание 2001), ПНД Ф 12.1.1-99 (издание 1999). Для определения массовых концентраций химических соединений были использованы такие приборы, как газовый хроматограф кристалл-2000М (ЗАО СКБ Хроматэк, Россия), хроматограф ФГХ-01 (ООО НПФ АНАТЭК, Россия), фотометр КФК-3-01-ЗОМЗ (АООТ Загорский оптико-механический завод, Россия), спектрофотометр UV-1800 (Shimadzu Corporation, Япония).

Полученные данные оценивали на достоверность результатов с применением однофакторного дисперсионного анализа с уровнем статистической значимости $p < 0.05$. Все расчеты проводили с применением пакетов программ Microsoft Excel (Microsoft Corp., USA) и Statistica 10 (StatSoft Inc., OK, USA).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение биохимических показателей. В ходе экспериментов было выявлено изменение активности почвенных ферментов. Активность всех ферментов значительно снизилась при воздействии продуктов горения. Наиболее чувствительными к воздействию дыма оказались ферменты из класса оксидоредуктаз: каталаза и полифенолоксидаза. Значения их активности после часовой обработки дымом уменьшились на 25 – 33% по сравнению с контролем. Активность других показателей была ингибирована дымом на 15 – 23% (рис. 2).

Выбор ферментов для анализа обусловлен их высокой чувствительностью к антропогенным влияниям. Газообразные продукты горения оказали значительное воздействие на чернозем. Такие изменения произошли в результате поглощения почвой веществ, которые образуются при горении древесных остатков. При помощи газоанализатора ДАГ-16 было установлено, что в дыму содержатся такие опасные соединения, как диоксид серы (SO_2), оксид и диоксид азота (NO , NO_2), оксид углерода (CO), ацетальдегид ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$), формальдегид (CH_2O), фенол ($\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$) гидроксибензол, гептан (C_7H_{16}), метан (CH_4), гексан (C_6H_{14}). Анализ выявил, что концентрации некоторых из них существенно превышает ПДК атмосферного воздуха ГН 2.1.6.3492-17 (Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.3492-17). В частности, оксид углерода составил 3570 мг/м^3 , что в 714 раз превышает допустимые максимально разовую концентрацию и в 1190 раз среднесуточную. Аналогичные изменения наблюдали с оксидом и диоксидом азота, формальдегидом, фенолом и ацетальдегидом. Следовательно, данные газообразные вещества внесли наибольший

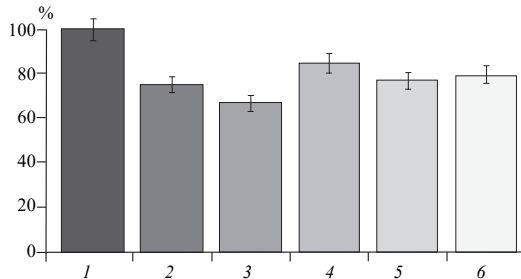


Рис. 2. Снижение активности ферментов в почве, % от контроля: 1 – контроль, 2 – каталаза, 3 – полифенолоксидаза, 4 – пероксидаза, 5 – инвертаза, 6 – уреаза (изменения достоверны при $p < 0.05$)

Fig. 2. Decrease in the enzyme activity in soil, % of control: 1 – control, 2 – catalase, 3 – polyphenol oxidase, 4 – peroxidase, 5 – invertase, 6 – urease (changes are significant when $p < 0.05$)

вклад в изменение ферментативной активности. Однако не все исследуемые в анализе соединения превышали ПДК. Например, концентрация диоксида серы при анализе дыма составила 0.28 мг/м³, что не превысило максимально допустимую, однако в 5.6 раза превышало среднесуточную (табл. 1).

Таблица 1. Концентрации химических соединений в дыму от сжигания хвойных стружек
Table 1. Concentrations of chemical compounds in smoke from the burning of coniferous wood-chips

Химическое соединение / Chemical compound	Концентрация в эксперименте, мг/м ³ / Concentration in the experiment, mg/m ³	Предельно допустимые концентрации в атмосферном воздухе, мг/м ³ / Maximum permissible concentrations for atmospheric air, mg/m ³	
		Максимально разовая концентрация / Maximum single concentration	Среднесуточная концентрация / Daily average concentration
Диоксид серы (SO ₂) / Sulphur dioxide (SO ₂)	0.28	0.5	0.05
Углерод оксид (CO) / Carbon oxide (CO)	3570	5	3
Азота диоксид (NO ₂) / Nitrogen dioxide (NO ₂)	60	0.2	0.04
Азота оксид (NO) / Nitrogen oxide (NO)	40	0.4	0.06
Метан (CH ₄) / Methane (CH ₄)	< 2	50	–
Гексан (C ₆ H ₁₄) / Hexane (C ₆ H ₁₄)	238	60	–
Ацетальдегид (C ₂ H ₄ O) / Acetaldehyde (C ₂ H ₄ O)	241	0.01	–
Формальдегид (CH ₂ O) / Formaldehyde (CH ₂ O)	9.53	0.05	0.01
Фенол (C ₆ H ₆ O) Гидроксibenзол / Phenol (C ₆ H ₆ O) Hydroxybenzene	4.41	0.01	0.006

Ранее были установлены некоторые закономерности реакции почвенных ферментов на воздействие дыма, установлено ингибирование ферментативной активности в зависимости от интенсивности воздействия (времени и температуры дыма), влажности почвы, природы фермента и других факторов (Nizhelskiy et al., 2022). На сегодняшний день в литературных источниках достаточно информации об изменении биохимических показателей почв после воздействия температурного фактора, огня (Boerner et al., 2008; Vilkova et al., 2022), но практически не изучены последствия воздействия дыма на почву. Данное исследование по воздействию дыма от пожаров дополнило ранее изученные по влиянию пирогенного фактора (огня и высоких температур) на изменение активности почвенных ферментов. Выявлены химические вещества, которые оказывают наибольшее воздействие на биологическую активность чернозема при сжигании растительных остатков.

Обилие микроорганизмов. Согласно полученным результатам, обилие *Penicillium chrysogenum* на чашках Петри зависело от времени обработки их дымом. Установлено существенное сокращение численности исследуемых организмов за 30 – 120 мин фумигации. За указанное время численность снизилась на 25 – 57% (рис. 3).

Аналогичная ситуация была и с влиянием дыма на *Azotobacter chroococcum*. Установлена высокая чувствительность бактерий к продуктам горения. Наибольшее подавление произошло после максимального уровня воздействия (120 мин) – значения показателя снизились относительно контроля на 62%. Таким образом, зафиксирована высокая чувствительность бактерий *Azotobacter chroococcum* и грибов *Penicillium chrysogenum* к фумигации от горения хвойных стружек. Выявлена взаимосвязь изменения обилия микроорганизмов в зависимости от продолжительности фумигации.

Ранее уже было исследовано воздействие огня на почвенные микроорганизмы (Barreiro, Díaz-Raviña, 2021), оценивалось кратковременное воздействие пирогенного фактора (огня), а также среднесрочные и долгосрочные последствия. Отмечается, что воздействие пожаров на почвенные микроорганизмы, а также последующее восстановление почвы зависит от различных факторов, таких как интенсивность пожара, длительность воздействия, устойчивость почвы и условий окружающей среды. В работах (Saenz de Miera et al., 2020; Qin, Liu, 2021) описываются изменения бактериальных сообществ в зависимости от интенсивности огня, а также уменьшение разнообразия бактерий и грибов спустя полгода после пирогенного воздействия. Подобное исследование было выполнено в экспериментах, описанных в настоящей статье, однако вместо огня использовали дым от сжигания хвойных стружек. Температурный фактор был исключен конструкцией оборудования для обработки чашек Петри с микроорганизмами дымом. Температура газообразных продуктов горения не превышала 25.8°C. Таким образом выявили токсичность газов, выделяемых при горении растительных материалов на почвенные микроорганизмы. При этом эффекта от сопутствующих факторов пирогенного воздействия – пламени и высокой температуры не было.

Использование дождевых червей и тараканов в качестве тест-объектов.

Воздействие дыма на тараканов в течение 1 мин не вызвало их иммобилизации, отмечалась высокая подвижность особей. Фумигация в течение 5 и 10 мин также не оказала влияния на жизнеспособность тест-организмов, однако двигательная активность их не была высокой, как в контрольном образце. Воздействие дыма в течение 30 мин (табл. 2) вызвало гибель 80% исследуемых организмов. Таким образом, фумигация от горения материалов растительного происхождения, вследствие своей высокой токсичности, значительно повлияла на жизнеспособность

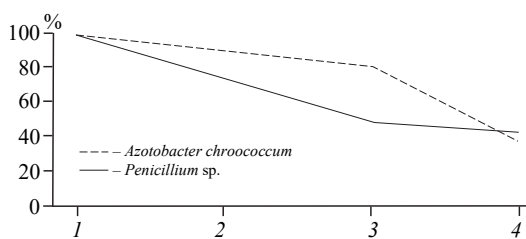


Рис. 3. Снижение численности бактерий *Azotobacter chroococcum* и микроскопических грибов *Penicillium chrysogenum* под воздействием дыма, % от контроля: 1 – контроль, 2 – фумигация 30 мин, 3 – фумигация 60 мин, 4 – фумигация 120 мин (изменения достоверны при $p < 0.05$)

Fig. 3. Reduction of *Azotobacter chroococcum* bacteria and *Penicillium chrysogenum* microscopic fungi under smoke exposure, % of control: 1 – control, 2 – after 30 min fumigation, 3 – after 60 min fumigation, 4 – after 120 min fumigation (changes are significant when $p < 0.05$)

тараканов (*Nauphoeta cinerea*) из-за попадания в их организм вредных веществ после выделения токсичных газов при дымообразовании от горения древесных стружек.

Таблица 2. Изменения активности и смертность *Nauphoeta cinerea*, подвергшихся воздействию дыма

Table 2. Changes in the activity and mortality of smoke-exposed *Nauphoeta cinerea*

Воздействие дыма / Exposure to smoke	Контроль / Control	1 мин / 1 min	5 мин / 5 min	10 мин / 10 min	30 мин / 30 min
Смертность, % / Mortality rate, %	0	0	0	0	80
Поведенческая реакция во время эксперимента / Behavioral responses during the experiment	Отмечена повышенная двигательная активность / There was an increase in motor activity	Поведенческие реакции остались без изменений, аналогично контролю / Behavioral responses remained unchanged, similar to the control	7 из 10 тараканов были малоподвижные / 7 out of 10 cockroaches were slow-moving	У 8 из 10 тест-объектов отсутствовали поведенческие реакции / 8 out of 10 test subjects had no behavioural responses	

После фумигации дождевых червей в скрининговом тесте в течение 1 мин летальных исходов не зафиксировано. В образцах с обработкой 5 и 10 мин количество жизнеспособных особей оставалось неизменным, однако они не были такими активными, как в предыдущем варианте (1 мин) и контроле. После 30 мин фумигации замечена крайне низкая активность организмов на фильтровальной бумаге в скрининговом тесте. Далее после окончания фумигации все контейнеры с образцами хранили при 20°C в темном помещении. Спустя 24 ч тест-объекты проверили снова согласно ГОСТ 33036–2014 (Межгосударственный стандарт ГОСТ 33036-2014). В результате наблюдений выявлено, что только 30-минутная обработка дымом привела к 100% летальному исходу, в то время как изменений в остальных исследуемых образцах не зафиксировано.

Во втором тесте, с использованием почвы, отмечали следующие поведенческие реакции: повышение активности, ускоренное сокращение кожно-мышечного мешка, вертикальный таксис в глубь почвы с целью минимизировать воздействие дыма. Подсчет жизнеспособных дождевых червей после опыта и сравнение с контролем проводили аналогично скрининговому тесту. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3. Поведенческая реакция и смертность (%) *Eisenia fetida* после воздействия дыма
Table 3. Behavioral response and mortality (%) of *Eisenia fetida* after smoke exposure

Воздействие дыма / Exposure to smoke		1 мин / 1 min	5 мин / 5 min	10 мин / 10 min	30 мин / 30 min
Смертность, % / Mortality rate, %	Скрининговый тест / Screening test	0	0	0	100
	Тест с почвой / Test with soil	0	0	0	40
Скорость зарывания в почву, мин / Speed of digging into the soil, min		0.1 – 0.2 мин с начала эксперимента / 0.1–0.2 min from the start of the experiment			

Результаты по влиянию продуктов горения на дождевых червей в почве свидетельствуют о среднем уровне токсичности газообразных продуктов горения на почву, так как согласно ГОСТ 33036–2014 (Межгосударственный стандарт ГОСТ 33036-2014), высоким уровнем считается смертность тест-объектов более 50%. Низкая смертность червей в эксперименте с почвой связана с тем, что почва выполняет роль защитного барьера, препятствуя проникновению газообразных продуктов горения к червям. Однако в случае со скрининговым тестом (без почвы) летальный исход был более 50%.

Известно множество работ, посвященных использованию различных биотестов в качестве диагностического показателя почв в результате различных видов антропогенного воздействия (Казеев и др., 2016; Schaefer, 2004; Moya et al., 2019). Однако нет информации об использовании таких тест-объектов, как дождевые черви (*Eisenia fetida*), тараканы (*Nauphoeta cinerea*) при фумигации от горения материалов растительного происхождения. Настоящее исследование дало представление о реакции живых организмов на газообразные продукты горения.

Использование растений в качестве тест-объекта. Выявлены морфологические изменения растений при диагностике. В частности, зафиксирован некроз – отмирание участков побегов, листьев у исследуемых культур после фумигации дымом. Помимо этого, замечены изменения в длине побегов и корней (рис. 4).

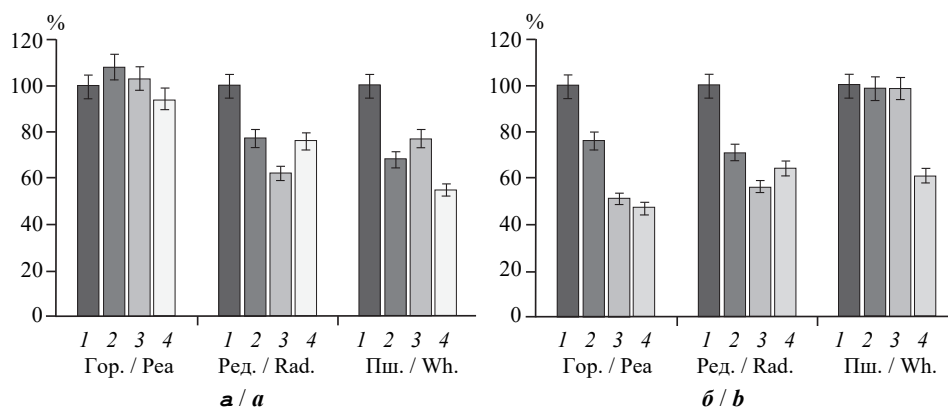


Рис. 4. Изменение длины корня (а) и побега (б) у растений после фумигации, % от контроля: Гор. – горох (*Pisum sativum*), Ред. – редис (*Raphanus sativus*), Пш. – пшеница (*Triticum aestivum*); 1 – контроль, 2 – дым 5 мин, 3 – дым 10 мин, 4 – дым 30 мин (изменения достоверны при $p < 0.05$)

Fig. 4. Changes in the root (a) and shoot (b) length in plants after fumigation, % of control: Pea – pea (*Pisum sativum*), Rad. – radish (*Raphanus sativus*), Wh. – wheat (*Triticum aestivum*); 1 – control, 2 – 5 min smoke, 3 – 10 min smoke, 4 – 30 min smoke (changes are significant when $p < 0.05$)

Так, длина корней у гороха после 30-минутной обработки дымом меньше на 6%, чем у контрольных вариантов, в то время как фумигация 5 и 10 мин не повлияла на корни. Возможно, это связано с крупными размерами семян, которые обла-

дают большими питательными запасами. Они помогают гороху долго функционировать без внешних источников питания. У редиса длина корней уменьшилась на 24 – 38%, однако наибольший эффект дым оказал на корни пшеницы (уменьшение на 45%) после 30 мин фумигации. В случае замеров длин побегов наблюдали похожую ситуацию. Аналогично предыдущим результатам по влиянию дыма на биоиндикаторы (почва, микроорганизмы, черви и тараканы), данный эксперимент выявил резистентность растений к газообразным продуктам горения. Подобных исследований на сегодняшний день практически нет.

В текущей работе был использован метод фитотоксичности, который в настоящее время широко распространен. Все полученные в ходе модельных экспериментов по влиянию дыма от пожаров результаты могут свидетельствовать о существенном влиянии токсичных веществ дыма (диоксид серы, оксид и диоксид азота, оксид углерода, ацетальдегид и другие) на биологические свойства почв.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлено значительное снижение активности почвенных ферментов, изменение обилия микроорганизмов, почвенной биоты после воздействия фумигации. Численность почвенных микроорганизмов является информативным показателем воздействия пирогенного фактора на почву. В результате воздействия дыма наблюдали подавление обилия микроскопических грибов *Penicillium chrysogenum* и бактерий *Azotobacter chroococcum*. Установлен высокий уровень смертности у червей в скрининговом тесте (100%) после 30-минутного воздействия стрессора, но в тесте с почвой этот уровень заметно меньше, что связано с защитной функцией самой почвы, выступающий в качестве барьера. Летальный исход наблюдали у тараканов (80%) после 30 мин нахождения тест-объектов под дымом. Растения также крайне чувствительные тест-объекты, у них наблюдались морфологические изменения – некроз участков тканей. Также имеются изменения в длине побегов и корней, где наибольший эффект зафиксирован при максимальной продолжительности задымления 30 мин. Выявлена высокая чувствительность почвенных ферментов к газообразным продуктам горения. Фумигация оказала негативное воздействие на ферментативную активность почвы, где наиболее чувствительными оказались ферменты класса оксидоредуктаз. Выявлено, что при сжигании материалов растительного происхождения (хвойные стружки) выделяются различные газообразные вещества, которые для почвы и биоты являются крайне токсичными. Это диоксид серы (SO₂), оксид и диоксид азота (NO, NO₂), оксид углерода (CO), ацетальдегид (C₂H₄O), формальдегид (CH₂O), фенол (C₆H₆O) гидроксибензол и другие. Их концентрации превышают предельно допустимые.

Таким образом, возникновение пожаров приобретает катастрофический характер. Как показали наши эксперименты, оказывать негативное воздействие на почву и биоту может не только огонь и экстремально высокие температуры, но и дым. Опасность дыма заключается в его токсичности, и в том, что он может переноситься на большие расстояния, далеко от эпицентра пожаров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бердникова Л. Н. Влияние опасных и вредных факторов лесных пожаров на окружающую среду // Ресурсосберегающие технологии сельского хозяйства. Красноярск : Красноярский государственный аграрный университет, 2019. Вып. 11. С. 47 – 55.

Вальков В. Ф., Казадаев А. А., Креница А. М., Супрун В. А., Суханова В. М., Тациев С. С. Влияние сжигания стерни на биоту чернозема // Почвоведение. 1996. № 12. С. 1517 – 1522.

Вальков В. Ф., Казеев К. Ш., Колесников С. И. Почвы Юга России. Ростов-на-Дону : Изд-во Эверест, 2008. 276 с.

Галстян А. Ш. Об устойчивости ферментов почв // Почвоведение. 1982. № 4. С. 108 – 110.

Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.3492-17. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений. М.: Минюст России, 2018. 35 с.

ГОСТ 33036–2014. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Определение острой токсичности для дождевых червей. М.: Стандартинформ, 2019. 6 с.

Казеев К. Ш., Колесников С. И., Акименко Ю. В., Даденко Е. В. Методы диагностики наземных экосистем. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. 356 с.

М-14. Методика выполнения измерений массовой концентрации фенола в промышленных выбросах в атмосферу фотоколориметрическим методом. СПб.: НППФ Экосистема, 2011. 14 с.

М-15. Методика выполнения измерений массовой концентрации диоксида серы в промышленных выбросах в атмосферу фотоколориметрическим методом. СПб.: НППФ Экосистема, 2001. 17 с.

М-18. Методика выполнения измерений массовой концентрации оксидов азота в промышленных выбросах в атмосферу фотометрическим методом с реактивом Грисса. СПб.: НППФ Экосистема, 2002. 15 с.

М-МВИ 173-06. Методика выполнения измерений массовой концентрации и определения массового выброса загрязняющих веществ в отходящих газах топливосжигающих установок с применением газоанализаторов ДАГ-16, ДАГ-500, ДАГ-510 / НИИ Атмосфера. СПб., 2006. 25 с.

Неверова О. А., Еремеева Н. И. Опыт использования биоиндикаторов в оценке загрязнения окружающей среды / Гос. публ. науч.-техн. библиотека СО РАН. Новосибирск, 2006. 88 с. (Сер. Экология. Вып. 80).

ПНД Ф 13.1.41-2003. Количественный химический анализ атмосферного воздуха и выбросов в атмосферу, методика измерений массовой концентрации формальдегида в промышленных выбросах в атмосферу фотометрическим методом с апитилацетоном / Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия. М., 2012. 16 с.

ПНД Ф 13.1:2:3.59-07. Методика выполнения измерений массовой концентрации суммы предельных углеводородов C₁₂-C₁₉ в атмосферном воздухе санитарно-защитной зоны, воздухе рабочей зоны и промышленных выбросах газохроматографическим методом / НИИ Атмосфера. СПб., 2005. 17 с.

ПНД Ф 13.1:2:3.23-98. Методика выполнения измерений массовых концентраций предельных углеводородов C₁-C₅ и непредельных углеводородов (этена, пропена, бутенов) в атмосферном воздухе, воздухе рабочей зоны и промышленных выбросах методом газовой хроматографии / Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия на окружающую среду. М., 2005. 22 с.

ПНД Ф 13.1:2:3.27-99. Методика выполнения измерений массовой концентрации оксида углерода и метана методом реакционной газовой хроматографии в атмосферном воз-

духе, воздухе рабочей зоны и промышленных выбросах / Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия на окружающую среду. М., 2005. 21 с.

ПНД Ф 12.1.1-99. Методические рекомендации по отбору проб при определении концентрации вредных веществ (газов и паров) в выбросах промышленных предприятий. М.: Госкомэкология РФ, 1999. 14 с.

Рассадина Е. В. Биоиндикация и ее место в системе мониторинга окружающей среды // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2007. № 2. С. 48 – 53.

Романов В. В., Любимирова В. Н. Биотестирование экологического состояния почв не-санкционированных свалок ТБО на территории Ульяновской области // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2009. № 2. С. 82 – 85

Синьков О. А., Почапский А. А. Влияние лесных пожаров на окружающую среду // Актуальные проблемы геотехники, экологии и защиты населения в чрезвычайных ситуациях. Минск: Минский национальный технический университет, 2017. С. 101 – 103.

ФР.1.31.2009.05508. Методика выполнения измерений массовой концентрации акролеина, бутана, бутилкарбита, бутилцеллозоля, гексана, гептана, декана, диметилформамида, метилцеллозоля, нонана, октана, перхлорэтилена, сероуглерода, стирола, этилцеллозоля на портативных газовых хроматографах ФГХ и ПГХ. М.: Росстандарт, 2004.

Федеральный закон от 24.06.98 N 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2022) [принят Государственной думой 22 мая 1998 года: одобрен Советом Федерации 10 июня 1998 года].

Azarenko M. A., Kazeev K. Sh., Yermolayeva O. Y., Kolesnikov S. I. Changes in the plant cover and biological properties of chernozems in the postagrogenic period // Eurasian Soil Science. 2020. Vol. 53, №. 11. P. 1645 – 1654. <https://doi.org/10.1134/S1064229320110034>

Barreiro A. P., Díaz-Raviña M. Fire impacts on soil microorganisms: Mass, activity, and diversity // Current Opinion in Environmental Science and Health. 2021. Vol. 22. Article number 100264. <https://doi.org/10.1016/J.COESH.2021.100264>

Boerner R. E. J., Gai C., Huang J., Miesel J. R. Initial effects of fire and mechanical thinning on soil enzyme activity and nitrogen transformations in eight North American forest ecosystems // Soil Biology and Biochemistry. 2008. Vol. 40, iss. 12. P. 3076 – 3085. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2008.09.008>

Breg V. M., Ribeiro D., Čarni A. Vegetation as the bioindicator of human-induced degradation in karst landscape: case study of waste-filled dolines // Acta Carsologica. 2017. Vol. 46, iss. 1. P. 95 – 110. <https://doi.org/10.3986/ac.v46i1.4712>

Certini G., Moya D., Lucas-Borja M. E., Mastrodonato G. The impact of fire on soil-dwelling biota: A review // Forest Ecology and Management. 2021. Vol. 488. Article number 118989. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2021.118989>

Corstanje R., Schulin R., Lark R. Scale – dependent relationships between soil organic matter and urease activity // European Journal of Soil Science. 2007. Vol. 58, iss. 5. P. 1087 – 1095. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00902.x>

Doamba S. W. M. F., Savadogo P., Nacro H. B. Effects of burning on soil macrofauna in a savanna-woodland under different experimental fuel load treatments // Applied Soil Ecology. 2014. Vol. 81. P. 37 – 44. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.04.005>

Erdős L., Bátori Z., Penksza K., Dénes A., Kevey B., Kevey D., Megnes M., Sengl P., Tölgyesi C. Can naturalness indicator values reveal habitat degradation? A test of four methodological approaches // Polish Journal of Ecology. 2017. Vol. 65, iss. 1. P. 1 – 13. <https://doi.org/10.3161/15052249PJE2017.65.1.001>

Gianfreda L., Rao M. A. Potential of extra cellular enzymes in remediation of polluted soils: A review // Enzyme and Microbial Technology. 2004. Vol. 35, iss. 4. P. 339 – 354. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2004.05.006>

Heger T., Imfeld G., Mitchell E. Special issue on “Bioindication in soil ecosystems”: Editorial note // *European Journal of Soil Biology*. 2012. Vol. 49. P. 1 – 4. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2012.02.001>

Kazeev K. Sh., Odabashian M. Yu., Trushkov A. V., Kolesnikov S. I. Assessment of the Influence of Pyrogenic Factors on the Biological Properties of Chernozems // *Eurasian Soil Science*. 2020a. Vol. 53, № 11. P. 1610 – 1619. <https://doi.org/10.1134/S106422932011006X>

Kazeev K. Sh., Trushkov A. V., Odabashian M. Yu., Kolesnikov S. I. Postagrogenic Changes in the Enzyme Activity and Organic Carbon Content in Chernozem during the First Three Years of Fallow Regime // *Eurasian Soil Science*. 2020b. Vol. 53, № 7. P. 995 – 1003. <https://doi.org/10.1134/S1064229320070054>

Moya D., Gonzalez-De Vega S., Lozano E., Garcha-Orenes F., Mataix-Solera J., Lucas-Borja M., de las Heras J. The burn severity and plant recovery relationship affect the biological and chemical soil properties of *Pinus halepensis* Mill. stands in the short and midterms after wild-fire // *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 235. P. 250 – 256. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.029>

Nizhelskiy M. S., Kazeev K. Sh., Vilkoval V. V., Kolesnikov S. I. Inhibition of enzymatic activity of ordinary chernozem by gaseous products of plant matter combustion // *Eurasian Soil Science*. 2022. Vol. 55, № 6. P. 802 – 809. <https://doi.org/10.1134/S1064229322060096>

Pellegrini A. F., Hobbie S. E., Reich P. B., Jumpponen A., Brookshire E. N. J., Caprio A. C., Coetsee C., Jackson R. B. Repeated fire shifts carbon and nitrogen cycling by changing plant inputs and soil decomposition across ecosystems // *Ecological Monographs*. 2020. Vol. 90, iss. 4. Article number e01409. <https://doi.org/10.1002/ecm.1409>

Qin Q., Liu Y. Changes in microbial communities at different soil depths through the first rainy season following severe wildfire in North China artificial *Pinus tabulaeformis* forest // *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 280. Article number 111865. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111865>

Saenz de Miera L. E., Pinto R., Gutierrez-Gonzalez J., Calvo L., Ansola G. Wildfire effects on diversity and composition in soil bacterial communities // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 726. Article number 138636. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138636>

Schaefer M. Assessing 2,4,6-trinitrotoluene (TNT)-contaminated soil using three different earthworm test methods // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2004. Vol. 57, iss. 1. P. 74 – 80. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2003.08.005>

Sinsabaugh R. L. Phenol oxidase, peroxidase, and organic matter dynamics of soil // *Soil Biology & Biochemistry*. 2010. Vol. 42, iss. 3. P. 391 – 404. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.10.014>

Swengel A. B. A literature review of insect responses to fire, compared to other conservation managements of open habitat // *Biodiversity and Conservation*. 2001. Vol. 10, iss. 7. P. 1141 – 1169. <https://doi.org/10.1023/A:1016683807033>

Terekhova V. A. Soil bioassay: Problems and approaches // *Eurasian Soil Science*. 2011. Vol. 44, № 2. P. 173 – 179. <https://doi.org/10.1134/S1064229311020141>

Vilkoval V. V., Kazeev K. Sh., Shkhatpatsev A. K., Kolesnikov S. I. Reaction of the enzymatic activity of soils of xerophytic forests on the Black Sea coast in the Caucasus to the pyrogenic impact // *Arid Ecosystems*. 2022. Vol. 12, № 1. P. 93 – 98. <https://doi.org/10.1134/S2079096122010139>

Yang Y. Z., Liu S., Zheng D., Feng S. Effects of cadmium, zinc and lead on soil enzyme activities // *Journal of Environmental Science*. 2006. Vol. 18, iss. 6. P. 1135 – 1141. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(06\)60051-X](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(06)60051-X)

Smoke toxicity to the biota and the biological activity of soils when modeling fires

M. S. Nizhelskiy , K. Sh. Kazeev, V. V. Vilkova,
A. N. Fedorenko, S. I. Kolesnikov

Southern Federal University
105/42 Bolshaya Sadovaya St., Rostov-on-Don 344090, Russia

Received: 18 August 2022 / revised: 22 February 2023 / accepted: 7 March 2023 / published: 21 June 2023

Abstract. The paper presents the results of our study on the effect of one type of pyrogenic factor (smoke) after burning coniferous wood chips on several bioindicators (soil enzymes, microorganisms, mesofauna, plants of agricultural crops). Exposition to smoke for 60 minutes was found to significantly affect the enzymatic activity of common chernozem. Fumigation caused a decrease in such enzymes as catalase, peroxidase, polyphenol oxidase and invertase. The enzymes of the oxidoreductase class were the most sensitive to smoke. High toxicity of gaseous combustion products to the soil flora and fauna was revealed. The acute toxicity of smoke to the bioindicators was determined as a result of fumigation. High mortality of test objects (*Eisenia fetida*, *Nauphoeta cinerea*) was recorded in our experiments. Soil microorganisms (*Azotobacter chroococcum* and *Penicillium chrysogenum*) proved to be informative after 30–120 minutes of fumigation. Resistance of plant sprouts (*Raphanus sativus*, *Triticum aestivum*, and *Pisum sativum*) to combustion gaseous products was revealed. An experiment to analyze the chemical composition of gases in smoke was performed. Such hazardous compounds as sulphur dioxide (SO₂), nitrogen oxide and dioxide (NO, NO₂), carbon monoxide (CO), acetaldehyde (C₂H₄O), formaldehyde (CH₂O), phenol (C₆H₆O) hydroxybenzene and others were found to be contained therein. Our analysis revealed that the concentrations of carbon monoxide were 714 times higher than its maximum permissible concentration (MPC), which acetaldehyde was 24,100 times higher. The nitrogen oxide and nitrogen dioxide concentrations were 100 and 300 times higher, respectively.

Keywords: pyrogenic exposure, biotesting, bioindicators, enzymes, test objects, microorganisms, toxicity, chemical composition of smoke

Funding. The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment in the field of scientific activity (no. FENW-2023-0008) and with the financial support of the Leading Scientific School of the Russian Federation (NSH-449.2022.5).

For citation: Nizhelskiy M. S., Kazeev K. Sh., Vilkova V. V., Fedorenko A. N., Kolesnikov S. I. Smoke toxicity to the biota and the biological activity of soils when modeling fires. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2023, no. 2, pp. 196–213 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-196-213>

 *Corresponding author.* Department of Ecology and Nature Management at the Academy of Biology and Biotechnology named after D. I. Ivanovsky, South Federal University, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Mikhail S. Nizhelskiy: <https://orcid.org/0000-0001-6443-6039>, nizhelskiy@sfedu.ru; Kamil Sh. Kazeev: <https://orcid.org/0000-0002-0252-6212>, kamil_kazeev@mail.ru; Valeria V. Vilkova: <https://orcid.org/0000-0002-1374-3941>, lera.vilkova.00@mail.ru; Anastasia N. Fedorenko: <https://orcid.org/0000-0002-1690-6048>, pushok.mur@yandex.ru; Sergey I. Kolesnikov: <https://orcid.org/0000-0001-5860-8420>, kolesnikov@sfedu.ru.

REFERENCES

- Berdnikova L. N. The impact of dangerous and harmful factors of forest fires on the environment. *Resursosberegaiushchie tekhnologii sel'skogo khoziaistva* [Resource-Saving Technologies of Agriculture]. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State Agrarian University Publ., 2019, iss. 11, pp. 47–55 (in Russian).
- Valkov V. F., Kazadaev A. A., Kremenitsa A. M., Suprun V. A., Sukhanova V. M., Tashchiev S. C. Influence of stubble burning on black earth biota. *Eurasian Soil Science*, 1996, no. 12, pp. 1517–1522 (in Russian).
- Valkov V. F., Kazeev K. S., Kolesnikov S. I. *Pochvy Yuga Rossii* [Soils of the South of Russia]. Rostov-on-Don, Izdatel'stvo Everest, 2008. 276 p. (in Russian).
- Galstyan A. Sh. On the stability of soil enzymes. *Eurasian Soil Science*, 1982, no. 4, pp. 108–110 (in Russian).
- Hygienic standards GN 2.1.6.3492-17. Limit Value Concentrations (LVC) of Contaminants in Atmospheric Air of Urban and Rural Settlements*. Moscow, Ministry of Justice of Russia Publ., 2018. 35 p. (in Russian).
- GOST 33036-2014. Test Methods for Chemicals of Environmental Hazard. Acute Toxicity Tests for Earthworms*. Moscow, Standardinform Publ., 2019. 6 p. (in Russian).
- Kazeev K. Sh., Kolesnikov S. I., Akimenko Y. V., Dadenko E. V. *Metody diagnostiki nazemnykh ekosistem* [Methods of Diagnostics of Terrestrial Ecosystems]. Rostov-on-Don, Southern Federal University Publ., 2016. 356 p. (in Russian).
- M-14. Methodology for Measuring the Mass Concentration of Phenol in Industrial Atmospheric Emissions by the Photocolorimetric Method*. Saint Petersburg, NPPF Ekosistema Publ., 2011. 14 p. (in Russian).
- M-15. Methodology of Measurement of Mass Concentration of Sulphur Dioxide in Industrial Emissions Into Atmosphere by Photocolorimetric Method*. Saint Petersburg, NPPF Ekosistema Publ., 2001. 17 p. (in Russian).
- M-18. Methods of Measurement of Mass Concentration of Nitrogen Oxides in Industrial Emissions Into Atmosphere by Photometric Method with Griess Reagent*. Saint Petersburg, NPPF Ekosistema Publ., 2002. 15 p. (In Russian).
- M-MVI 173-06. Methods of Measuring the Mass Concentration and Determination of the Mass Emission of the Polluting Substances in the Exhaust Gases of the Fuel Combustion Installations With Gas Analyzers DAG-16, DAG-500, DAG-510*. Saint Petersburg, NII Atmosfera Publ., 2006. 25 p. (in Russian).
- Neverova O. A., Ereemeeva N. I. *Opyt ispol'zovaniia bioindikatorov v otsenke zagriazneniia okruzhaiushchei sredy* [Experience of Using Bioindicators to Estimate the Pollution of Environment]. Novosibirsk, State Public Scientific and Technical Library of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2006. 88 p. (in Russian).
- PND F 13.1.41-2003. Quantitative Chemical Analysis of Atmospheric Air and Atmospheric Emissions, Method for Measuring the Mass Concentration of Formaldehyde in Industrial Atmospheric Emissions by the Photometric Method With Apetylacetone*. Moscow, Federal Center for Analysis and Assessment of Anthropogenic Impact on the Environment Publ., 2012. 16 p. (in Russian).
- PND F 13.1.2:3.59-07. Methods for Measuring the Mass Concentration of the Sum of Limiting Hydrocarbons C₁₂-C₁₉ in the Air of the Sanitary Protection Zone, in the Air of the Working Zone and in Industrial Emissions by Gas Chromatographic Method*. Saint Petersburg, NII Atmosfera Publ., 2005. 17 p. (in Russian).
- PND F 13.1:2.3.23-98. Methods of Measurement of Mass Concentrations of Limiting Hydrocarbons C₁-C₅ and Unsaturated Hydrocarbons (Ethene, Propene, Butenes) in Atmospheric Air, Working Air and Industrial Emissions by Gas Chromatography*. Moscow, Federal Center for Analysis and Assessment of Anthropogenic Impact on the Environment Publ., 2005. 22 p. (in Russian).

PND F 13.1:2:3.27-99. *Methodology for the Measurement of the Mass Concentration of Carbon Monoxide and Methane by Gas Chromatography Reaction Method in Atmospheric Air, Working Air and Industrial Emissions*. Moscow, Federal Center for Analysis and Assessment of Anthropogenic Impact on the Environment Publ., 2005. 21 p. (in Russian).

PND F 12.1.1-99. *Guidelines for Sampling in Determining the Concentration of Harmful Substances (Gases and Vapours) in Emissions of Industrial Enterprises*. Moscow, State Committee for Ecology of the Russian Federation Publ., 1999. 14 p. (in Russian).

Rassadina E. V. Bioindication and its place in the system of environmental monitoring. *Bulletin of Ulyanovsk State Agricultural Academy*, 2007, no. 2, pp. 48–53 (in Russian).

Romanov V. V., Lyubomirova V. N. Biotesting of ecological state of soils of unauthorized landfills in Ulyanovsk region. *Bulletin of Ulyanovsk State Agricultural Academy*, 2009, no. 2, pp. 82–85 (in Russian).

Sinkov O. A., Pochapsky A. A. Impact of forest fires on the environment. In: *Aktual'nye problemy geotekhniki, ekologii i zashchity naseleniya v chrezvychaynykh situatsiyakh* [Actual Problems of Geotechnics, Ecology and Population Protection in Emergency Situations]. Minsk, Minsk National Technical University Publ., 2017. pp. 101–103 (in Russian).

FR.1.31.2009.05508. *Methodology for Measuring the Mass Concentration of Acrolein, Butane, Butylcarbitol, Butylcellosolv, Hexane, Heptane, Decane, Dimethylformamide, Methylcellosolv, Nonane, Octane, Perchloroethylene, Carbon Disulfide, Styrene, Ethylcellosolv on Portable Gas Chromatographs FGC and PGC*. Moscow, Rosstandart Publ., 2004. (in Russian)

Federal law of 24.06.98 N 89-FZ “About production and consumption wastes” (with amendments and additions, in force since 01.03.2022) [adopted by State Duma on 22 May 1998: approved by Federation Council on 10 June 1998]. (in Russian).

Azarenko M. A., Kazeev K. Sh., Yermolayeva O. Y., Kolesnikov S. I. Changes in the plant cover and biological properties of chernozems in the postagrogenic period. *Eurasian Soil Science*, 2020, vol. 53, no. 11, pp. 1645–1654. <https://doi.org/10.1134/S1064229320110034>

Barreiro A. P., Díaz-Raviña M. Fire impacts on soil microorganisms: Mass, activity, and diversity. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, 2021, vol. 22, article number 100264. <https://doi.org/10.1016/J.COESH.2021.100264>

Boerner R. E. J., Giai C., Huang J., Miesel J. R. Initial effects of fire and mechanical thinning on soil enzyme activity and nitrogen transformations in eight North American forest ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, vol. 40, iss. 12, pp. 3076–3085. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2008.09.008>

Breg V. M., Ribeiro D., Čarni A. Vegetation as the bioindicator of human-induced degradation in karst landscape: case study of waste-filled dolines. *Acta Carsologica*, 2017, vol. 46, iss. 1, pp. 95–110. <https://doi.org/10.3986/ac.v46i1.4712>

Certini G., Moya D., Lucas-Borja M. E., Mastrodonato G. The impact of fire on soil-dwelling biota: A review. *Forest Ecology and Management*, 2021, vol. 488, article number 118989. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2021.118989>

Corstanje R., Schulin R., Lark R. Scale – dependent relationships between soil organic matter and urease activity. *European Journal of Soil Science*, 2007, vol. 58, iss. 5, pp. 1087–1095. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00902.x>

Doamba S. W. M. F., Savadogo P., Nacro H. B. Effects of burning on soil macrofauna in a savanna-woodland under different experimental fuel load treatments. *Applied Soil Ecology*, 2014, vol. 81, pp. 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.04.005>

Erdős L., Bátori Z., Penksza K., Dénes A., Kevey B., Kevey D., Megnes M., Sengl P., Tölgyesi C. Can naturalness indicator values reveal habitat degradation? A test of four methodological approaches. *Polish Journal of Ecology*, 2017, vol. 65, iss. 1, pp. 1 – 13. <https://doi.org/10.3161/15052249PJE2017.65.1.001>

- Gianfreda L., Rao M. A. Potential of extra cellular enzymes in remediation of polluted soils: A review. *Enzyme and Microbial Technology*, 2004, vol. 35, iss. 4, pp. 339–354. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2004.05.006>
- Heger T., Imfeld G., Mitchell E. Special issue on “Bioindication in soil ecosystems”: Editorial note. *European Journal of Soil Biology*, 2012, vol. 49, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2012.02.001>
- Kazeev K. Sh., Odabashian M. Yu., Trushkov A. V., Kolesnikov S. I. Assessment of the Influence of Pyrogenic Factors on the Biological Properties of Chernozems. *Eurasian Soil Science*, 2020a, vol. 53, no. 11, pp. 1610–1619. <https://doi.org/10.1134/S106422932011006X>
- Kazeev K. Sh., Trushkov A. V., Odabashian M. Yu., Kolesnikov S. I. Postagrogenic Changes in the Enzyme Activity and Organic Carbon Content in Chernozem during the First Three Years of Fallow Regime. *Eurasian Soil Science*, 2020b, vol. 53, no. 7, pp. 995–1003. <https://doi.org/10.1134/S1064229320070054>
- Moya D., Gonzalez-De Vega S., Lozano E., Garcha-Orenes F., Mataix-Solera J., Lucas-Borja M., de las Heras J. The burn severity and plant recovery relationship affect the biological and chemical soil properties of *Pinus halepensis* Mill. stands in the short and midterms after wildfire. *Journal of Environmental Management*, 2019, vol. 235, pp. 250–256. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.029>
- Nizhelskiy M. S., Kazeev K. Sh., Vilkova V. V., Kolesnikov S. I. Inhibition of enzymatic activity of ordinary chernozem by gaseous products of plant matter combustion. *Eurasian Soil Science*, 2022, vol. 55, no. 6, pp. 802–809. <https://doi.org/10.1134/S1064229322060096>
- Pellegrini A. F., Hobbie S. E., Reich P. B., Jumpponen A., Brookshire E. N. J., Caprio A. C., Coetsee C., Jackson R. B. Repeated fire shifts carbon and nitrogen cycling by changing plant inputs and soil decomposition across ecosystems. *Ecological Monographs*, 2020, vol. 90, iss. 4, article number e01409. <https://doi.org/10.1002/ecm.1409>
- Qin Q., Liu Y. Changes in microbial communities at different soil depths through the first rainy season following severe wildfire in North China artificial *Pinus tabulaeformis* forest. *Journal of Environmental Management*, 2021, vol. 280, article number 111865. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111865>
- Saenz de Miera L. E., Pinto R., Gutierrez-Gonzalez J., Calvo L., Ansola G. Wildfire effects on diversity and composition in soil bacterial communities. *Science of The Total Environment*, 2020, vol. 726, article number 138636. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138636>
- Schaefer M. Assessing 2,4,6-trinitrotoluene (TNT)-contaminated soil using three different earthworm test methods. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2004, vol. 57, iss. 1, pp. 74–80. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2003.08.005>
- Sinsabaugh R. L. Phenol oxidase, peroxidase, and organic matter dynamics of soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, vol. 42, iss. 3, pp. 391–404. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.10.014>
- Swengel A. B. A literature review of insect responses to fire, compared to other conservation managements of open habitat. *Biodiversity and Conservation*, 2001, vol. 10, iss. 7, pp. 1141–1169. <https://doi.org/10.1023/A:1016683807033>
- Terekhova V. A. Soil bioassay: Problems and approaches. *Eurasian Soil Science*, 2011, vol. 44, no. 2, pp. 173–179. <https://doi.org/10.1134/S1064229311020141>
- Vilkova V. V., Kazeev K. Sh., Shkhatpatsev A. K., Kolesnikov S. I. Reaction of the enzymatic activity of soils of xerophytic forests on the Black Sea coast in the Caucasus to the pyrogenic impact. *Arid Ecosystems*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 93–98. <https://doi.org/10.1134/S2079096122010139>
- Yang Y. Z., Liu S., Zheng D., Feng S. Effects of cadmium, zinc and lead on soil enzyme activities. *Journal of Environmental Science*, 2006, vol. 18, iss. 6, pp. 1135–1141. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(06\)60051-X](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(06)60051-X)