

УДК 631.46:574.4:630*43

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАЗНЫХ ФАКТОРОВ ПИРОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧЕРНОЗЕМА

© 2020 г. К. Ш. Казеев^а, *, М. Ю. Одабашян^а, А. В. Трушков^а, С. И. Колесников^а^а Южный федеральный университет, пр. Стачки, 194/1, Ростов-на-Дону, 344006 Россия

*e-mail: kamil_kazeev@mail.ru

Поступила в редакцию 07.08.2019 г.

После доработки 19.11.2019 г.

Принята к публикации 24.04.2020 г.

В модельных экспериментах исследовано изменение биологических свойств чернозема при воздействии разных факторов пирогенного воздействия: низкотемпературной плазмы, инфракрасного излучения, пала соломы, дыма от продуктов горения. В результате выявлено, что пирогенное воздействие имеет комплексный характер и уменьшение значений биологических параметров зависит от нескольких факторов: температуры, продолжительности, интенсивности воздействия дыма и золы продуктов горения, влажности почв. Комплексное воздействие при сжигании соломы привело к уменьшению микробной биомассы на 39% и сокращению обилия азотфиксирующих бактерий на 29% относительно контрольных значений. Подавление активности дегидрогеназ и каталазы из класса оксидоредуктаз составило 44–53%; активность гидролаз (фосфатазы и инвертазы) инактивировалась в меньшей степени (на 16–18%). Максимальное воздействие отмечено для верхнего слоя почвы (0–1 см) по сравнению со слоем 4–5 см. Уменьшение микробиологических показателей при трехминутной обработке пламенем горелки составило на 52–56%, активности почвенных ферментов – на 25–26%. Выявлена высокая степень зависимости ферментативной активности от длительности воздействия пламени. Коэффициент корреляции для активности дегидрогеназ составляет –0.81, для инвертазы –0.86, каталазы –0.78, фосфатазы –0.85 ($p < 0.01$). Возрастание уровня инфракрасного излучения также приводит к прогрессирующему подавлению биологических показателей. Даже минимальное воздействие (3 мин при температуре 52°C) дыма от продуктов горения соломы достоверно сократило (на 4–19%, $p < 0.05$) микробиологические и биохимические параметры почвы. Повышение уровня воздействия приводит к подавлению биологической активности на 20–30%.

Ключевые слова: пожары, пал, биологические индикаторы, ферментативная активность

DOI: 10.31857/S0032180X20110064

ВВЕДЕНИЕ

Пирогенное воздействие встречается в естественных условиях и является важным фактором, приводящим к существенным изменениям природных экосистем [38]. Однако деятельность человека привела к существенному увеличению как частоты, так и интенсивности пожаров. Влияние пожаров на экосистемы и почвы представляет интерес для многих исследователей во всем мире [20, 44, 46, 48, 54]. Связано это не только с пирогенным изменением территорий при пожарах, но с тем, что возобновление территории гарей занимает длительное время и зависит от силы пирогенного воздействия [15, 21–23, 25, 36, 39].

Пирогенное воздействие на почву различается в зависимости от типа пожара (верховой, низовой, подземный), его интенсивности (слабый, средний, сильный), продолжительности (от нескольких минут до нескольких часов) и повторяемости. Физико-химические, гидротермические, биологические свойства могут изменяться как непо-

средственно от воздействия высоких температур, дыма и золы, так и опосредованно – через полное сгорание местной флоры и дальнейшей смены растительности, сокращения численности беспозвоночных животных [3, 12, 49]. Температура и влажность почвы – это два ключевых фактора, контролирующих биологические процессы в экосистемах и почвах [35, 52, 56, 57]. Изменения гидротермических свойств почвы может привести к изменению численности почвенных микроорганизмов. Прямое воздействие – нагревание почвы – влияет на численность микроорганизмов, убивая или изменяя их репродуктивные возможности, косвенно нагревание изменяет содержание органического вещества почвы (источник питания микроорганизмов). Продолжительное термическое воздействие на почву приводит к деградации микробного сообщества. Изменение микробного сообщества зависит от интенсивности пожара и от количества сгораемого материала и корневых остатков в почвенном слое [5, 24, 25]. Корни растений чув-

ствительны к тепловому воздействию; неблагоприятной температурой для большинства видов считается температура около 50°C [47].

Активность почвенных ферментов имеет важное значение при оценке качества почв и диагностике их экологического состояния [17, 19, 39, 45, 50, 51]. Пирогенный эффект оказывает значительное влияние на ферментативную активность почв [26, 43, 53, 54]. Поэтому активность почвенных ферментов может быть потенциальным индикатором последствий пирогенного воздействия в почвах. Температурный оптимум ферментов разный в почвах разных климатических условий. Установлено, что ферменты, вырабатываемые микроорганизмами в холодном климате, имеют более низкие температурные оптимумы [1]. В почвах многолетней мерзлоты потенциальная ферментативная активность остается близкой к исходному уровню. Однако активность ферментов, хотя и в сильно измененной форме, обнаруживается даже при минусовой температуре [37]. Ферментативная активность почв может стабильно сохраняться при низких и обычных температурах [8] и существенно уменьшаться при температурах, превышающих 100°C. Температурный оптимум ферментов составляет 40–50°C. Высокие температуры окружающей среды, превышающие оптимум действия ферментов, как правило, вызывают разрушение (денатурацию) белковой структуры. Однако иммобилизованные почвой ферменты более устойчивы к воздействию высоких температур [14, 31].

Многие сельскохозяйственные производители не только в России, но и во всем мире активно применяют ежегодные выжигания прошлогодней травы и стерни — палы как самый быстрый метод очистки полей для активизации роста новой травы на пастбищах и подготовки полей агроценозов к посеву. В литературе можно встретить работы, посвященные как положительному [29], так и отрицательному [6] воздействию палов. Нередко сельскохозяйственные палы становятся причиной степных или лесных пожаров. В настоящее время палы стерни и растительности в России [28] и, в частности, в Ростовской области [27] и Краснодарском крае [13] запрещены, однако до сих пор широко распространены. Пирогенное воздействие на биоту и почвы изучено не в полной мере, особенно в степной зоне юга России.

Цель работы — оценка разных факторов пирогенного воздействия (теплового излучения, непосредственно огня и продуктов горения) на биологические свойства чернозема обыкновенного Ростовской области в модельных экспериментах.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования — чернозем обыкновенный южно-европейской фации карбонатный тя-

желосуглинистый (Haplic Chernozem (Loamic, Pachic)). Эти почвы широко распространены в степной зоне Юга России и являются наиболее продуктивными пахотными почвами [7]. Место отбора почвы — опытный старопашотный участок Ботанического сада Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону. В опытах использовали пахотный слой (0–20 см) почвы.

Исследование влияния пала соломы. В эксперименте оценивали комплексное воздействие палов стерни и послеуборочных остатков на биологические свойства почв. Для этого образец почвы 300 г помещали в алюминиевые контейнеры 20 × 15 × 8 см слоем 5 см. Поверхностный слой почвы наиболее сильно подвержен пирогенному воздействию при палах стерни и пожарах [23, 46]. На поверхности почвы поместили солому пшеницы (100 г) и сожгли ее до полного сгорания.

Исследование влияния пламени газовой горелки. Для выявления действия низкотемпературной плазмы (огня) пробу почвы 150 г помещали в алюминиевые контейнеры 15 × 10 × 8 см слоем в 5 см и подвергали воздействию пламени газовой горелки с расстояния 10 см в течение 1, 2 и 3 мин.

Исследование влияния инфракрасного излучения. Тепловое излучение пожара — это электромагнитное излучение инфракрасного диапазона, испускаемое пламенем [40, 41]. Модельный эксперимент по выявлению теплового излучения для определения его вклада в пирогенный эффект от пожаров проведен с помощью горизонтальной установки из пяти инфракрасных ламп мощностью 250 Вт на расстоянии 10 см. Почву с разной влажностью (воздушно-сухую, влажную (25% от массы почвы) и избыточно влажную (50% от массы почвы)) подвергали инфракрасному излучению от установки на расстоянии 10 см до достижения разной температуры поверхности почвы (100, 200, 400°C). Разные температуры воздействия выбраны как эквивалент беглых, слабых и сильных пожаров. Разная степень влажности почв помогла оценить особенности воздействия фактора в разных условиях среды.

Исследование влияния дыма от продуктов горения соломы. В этом опыте исследовано токсическое действие дыма, выделяющегося во время горения сухой растительности. Для этого сухие и влажные (25%) почвенные пробы массой 150 г в алюминиевых формах с пятисантиметровым слоем помещали в закрытую установку с отверстием, куда прикреплялась труба, ведущая к источнику дыма от горения сухой соломы пшеницы. При горении соломы продукты горения направляли в отсек с почвенным образцом. Длинной трубы регулировали температуру дыма. Почвенные образцы обрабатывали холодным (52°C) и горячим (139°C) дымом в течение 3, 9 и 30 мин.

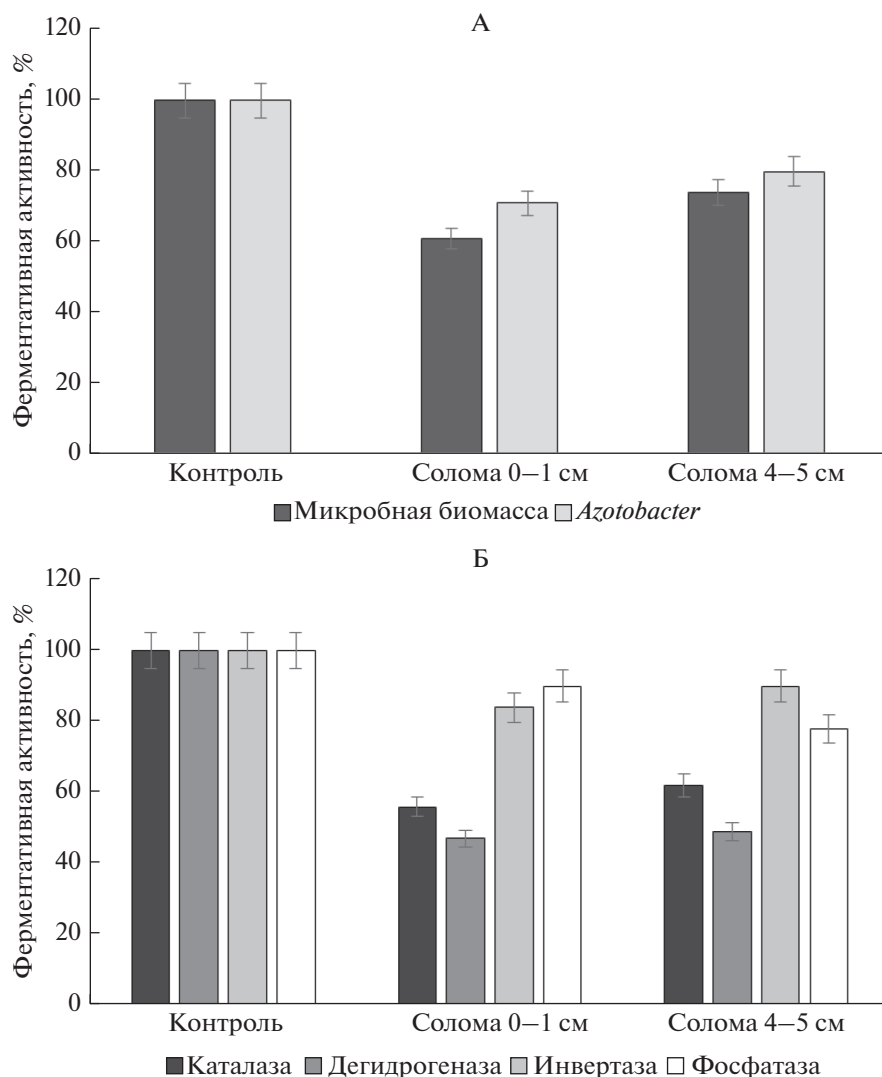


Рис. 1. Влияние пала соломы на микробиологическую (А) и ферментативную (Б) активность чернозема на глубине 0–1 и 4–5 см, % от контроля.

Для определения температуры почвы использовали пирометр DT-810 “СЕМ”. Лабораторно-аналитические исследования проведены с использованием методов биодиагностики и биоиндикации почв [18]. Ферментативную активность почв определяли следующими методами: активности каталазы и дегидрогеназ по А.Ш. Галстяну (1978); активность инвертазы колориметрическим методом с реактивом Феллинга; активность фосфатазы по А.Ш. Галстяну и Э.А. Арутюняну (1966). Обилие азотфиксирующих бактерий рода *Azotobacter* оценивали методом комочков обрастания почв на безазотистой среде Эшби, микробную биомассу определяли регидратационным методом Благодатского с соавт. [3].

Статистическая обработка данных выполнена с использованием корреляционного и дисперсионного анализов. При обсуждении результатов учиты-

вали статистически достоверные различия с уровнями значимости 0.1–5% ($p < 0.001$, 0.01 и 0.05).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияние сжигания соломы. При сжигании соломы на поверхности почвы отдельно определяли температуру верхнего (0–1 см) и нижнего слоев (4–5 см). Температура верхнего слоя почвы при этом увеличилась с 18 до 91°C, температура нижнего слоя – с 23 до 59°C. После сжигания соломы выявлено изменение биологических свойств чернозема. Максимальное уменьшение значений показателей выявлено для верхнего слоя почвы (рис. 1, А). Количество микробной биомассы сразу после пала в слое 0–1 см уменьшилось на 39% от контрольных значений ($p < 0.05$), обилие азотфиксирующих бактерий – на 29% ($p < 0.05$). Так-

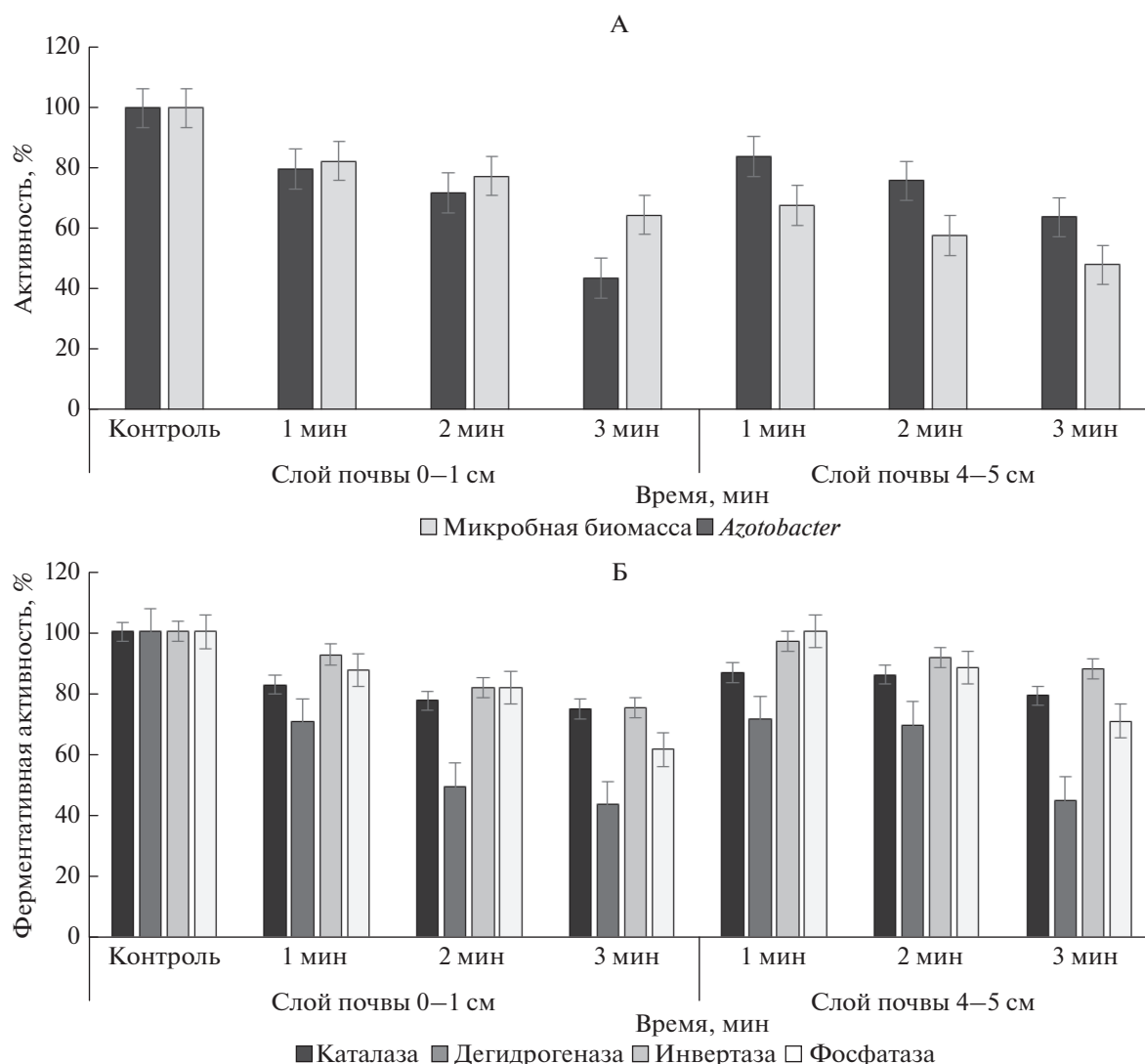


Рис. 2. Влияния плазмы газовой горелки на микробиологическую (А) и ферментативную (Б) активность чернозема на глубине 0–1 и 4–5 см, % от контроля.

же было выявлено инактивация активности почвенных ферментов (рис. 1, Б). Максимальное подавление активности выявлено для ферментов из класса оксидоредуктаз (на 44–53% относительно контрольных значений), минимальное подавление – для гидролаз (на 16–18%). Уменьшение значений биохимических показателей зависит от глубины почвы. Верхний слой почвы подвержен наиболее интенсивному воздействию плазмы. На глубине 4–5 см ферментативная активность также подавлена, но в меньшей степени.

Влияние пламени газовой горелки. Интенсивность уменьшения значений биологических показателей связана с продолжительностью действия плазмы газовой горелки на почву. Минимальное сокращение наблюдали при одноминутном воздействии на почву, максимальное – при трехминутном. Температура почвы контрольного образ-

ца на поверхности составила +24°C, на глубине 5 см +18°C. Температура поверхности почвы при увеличении интенсивности пирогенного воздействия огнем повышается в несколько раз, что вызывает изменение почвенных параметров. Температура поверхности почвы непосредственно во время воздействия огня достигает 450–500°C. Через 1 мин после обработки плазмой на поверхности она составила 47°C, на глубине 5 см – 22°C; после 2 мин влияния плазмы – 64°C, на глубине 5 см – 24°C; после 3 мин влияния плазмы – 84°C, на глубине 5 см – 26°C. Данные по изменениям биологических показателей представлены на рис. 2. В поверхностном слое почвы после 3 минут обработки огнем максимальное инактивация активности из ферментов класса оксидоредуктаз наблюдали для каталазы, активность которой на 25% меньше контроля ($p < 0.05$). Из исследуемых

гидролаз существенная инактивация отмечена для фосфатазы — на 26%. Аналогичную тенденцию наблюдали в слое 4–5 см: активность каталазы за 3 минуты уменьшилась на 21%, из класса гидролаз — у фосфатазы — на 30% от контроля ($p < 0.05$).

Для выявления причинно-следственной связи временем воздействия пламени горелки с биологическими показателями был рассчитан коэффициент корреляции Пирсона. Выявлена тесная обратная связь между временем обработки почвы пламенем и активностью почвенных ферментов. Коэффициент корреляции с активностью дегидрогеназ составляет -0.81 , для инвертазы -0.86 , каталазы -0.78 , фосфатазы -0.85 (везде $p < 0.01$).

Обилие бактерий рода *Azotobacter* через 3 мин после воздействия пламени горелки на поверхность почвы (0–1 см) уменьшается на 56% ($p < 0.01$) от контрольных значений, в слое 4–5 см — на 36% ($p < 0.05$) (рис. 2, А). Микробная биомасса в слое почвы 0–1 см при воздействии плазмы в течение 3 мин сократилась на 52% ($p < 0.01$), а в слое 4–5 см — на 35% от контроля ($p < 0.05$).

Влияния инфракрасного излучения. В ходе модельного исследования воздействия теплового излучения было выявлено изменение некоторых микробиологических свойств и ферментативной активности, различающееся в зависимости от уровня теплового воздействия. Микробная биомасса почвы при температуре 100°C уменьшилась на 24–28% от контроля ($p < 0.05$), независимо от влажности почвы (рис. 3). Обилие азотфиксирующих бактерий воздушно-сухой и влажной почвы при температуре 100°C сокращается на 32% от контроля ($p < 0.05$), а в избыточно влажной почве — на 24% ($p < 0.05$) (рис. 3, А). Инфракрасное облучение приводит к достоверному ингибированию ферментативной активности. Активность дегидрогеназ при нагреве до 100°C уменьшилась на 19–23% ($p < 0.05$) независимо от влажности почвы (рис. 3, Б). Выявлена тесная обратная зависимость активности дегидрогеназ от температуры почв с разным увлажнением ($r = -0.71...-0.79$ при $p < 0.01$). Активность каталазы воздушно-сухой почвы при температуре 100°C была меньше контроля на 25%, влажной почвы — на 36%, избыточно влажной — на 24% (для всех ферментов $p < 0.05$). Коэффициент корреляции между температурой образца и активностью каталазы составляет -0.78 для воздушно-сухой почвы, -0.76 для влажной почвы и -0.85 для избыточно влажной почвы (везде $p < 0.01$).

Термическое ингибирование активности инвертазы прогрессировало при повышении увлажнения почвы при температуре 100°C на 25% ($p < 0.05$) в сухой и на 36% ($p < 0.05$) в избыточно влажной почве. Коэффициент корреляции для температуры и активности инвертазы составляет -0.81 ($p < 0.01$) для воздушно-сухой почвы, -0.66

($p < 0.05$) для влажной почвы, и -0.89 ($p < 0.01$) для избыточно влажной почвы. Инактивация фосфатазы в почве разного увлажнения составила 24–36% ($p < 0.05$). Минимальные значения фермента отмечены после нагревания избыточно-влажной почвы. Коэффициент корреляции составляет $-0.98...-0.99$ ($p < 0.001$) для сухой и влажной почвы, для избыточно влажной почвы $r = -0.85$ ($p < 0.01$).

Влажная почва для своего нагревания до заданных температур требовала больше времени воздействия от тепловой установки. Поэтому она аккумулировала больше тепла по сравнению с воздушно-сухой. Соответственно и инактивация исследуемых ферментов (за исключением дегидрогеназ) в варианте с избыточно влажной почвой значительнее. Для расчета количества тепла (DH), полученного почвой во время инфракрасного облучения, был использован модифицированный градусно-часовой метод (Degree-hour method) [37].

$$DH_{\text{почвы}} = \sum (T5 (1 \text{ см}) - T_{\text{комн}}) / t, \text{ Дж/г},$$

где $T5 (1 \text{ см})$ — показания пирометра через каждые 5 мин на глубине 1 см, $T_{\text{комн}}$ — комнатная температура, t — время нагревания образца (табл. 1).

Разный уровень теплового воздействия существенно изменял активность ферментов в почве. При температуре 100°C наиболее устойчивой оказалась активность каталазы и инвертазы, а наименее — активность дегидрогеназ. Изменения исследуемых показателей при температурах 200 и 400°C схожие. Однако воздействие инфракрасного облучения усиливается с повышением температуры и влажности. При температуре 400°C наблюдается максимальное подавление ферментативной активности в переувлажненной почве: активность каталазы снижается на 46% от контроля ($p < 0.01$), активность дегидрогеназ снижается на 43% ($p < 0.01$), активность инвертазы — на 51% ($p < 0.01$), активность фосфатазы на 58% ($p < 0.01$). Следовательно, в целом, тепловое воздействие при нагреве почв до 400°C более ощутимо для ферментов во влажной и переувлажненной почвах по сравнению с сухой почвой.

Микробиологические показатели, как и в случае минимального нагревания, после нагрева до 400°C уменьшили свои значения независимо от влажности исходной почвы. Микробная биомасса сухой почвы уменьшилась на 68% от контроля ($p < 0.01$), увлажненной почвы — на 49% ($p < 0.01$), избыточно влажной почвы — на 66% ($p < 0.01$). Эффект от теплового воздействия максимального уровня на обилие азотфиксирующих бактерий, в отличие от ферментативной активности, уменьшился при повышении влажности почвы. В сухой почве подавление составило 84% от контроля ($p < 0.001$), во влажной почве — 72% ($p < 0.001$), в избыточно влажной почве — 64% ($p < 0.01$) (рис. 3, А).

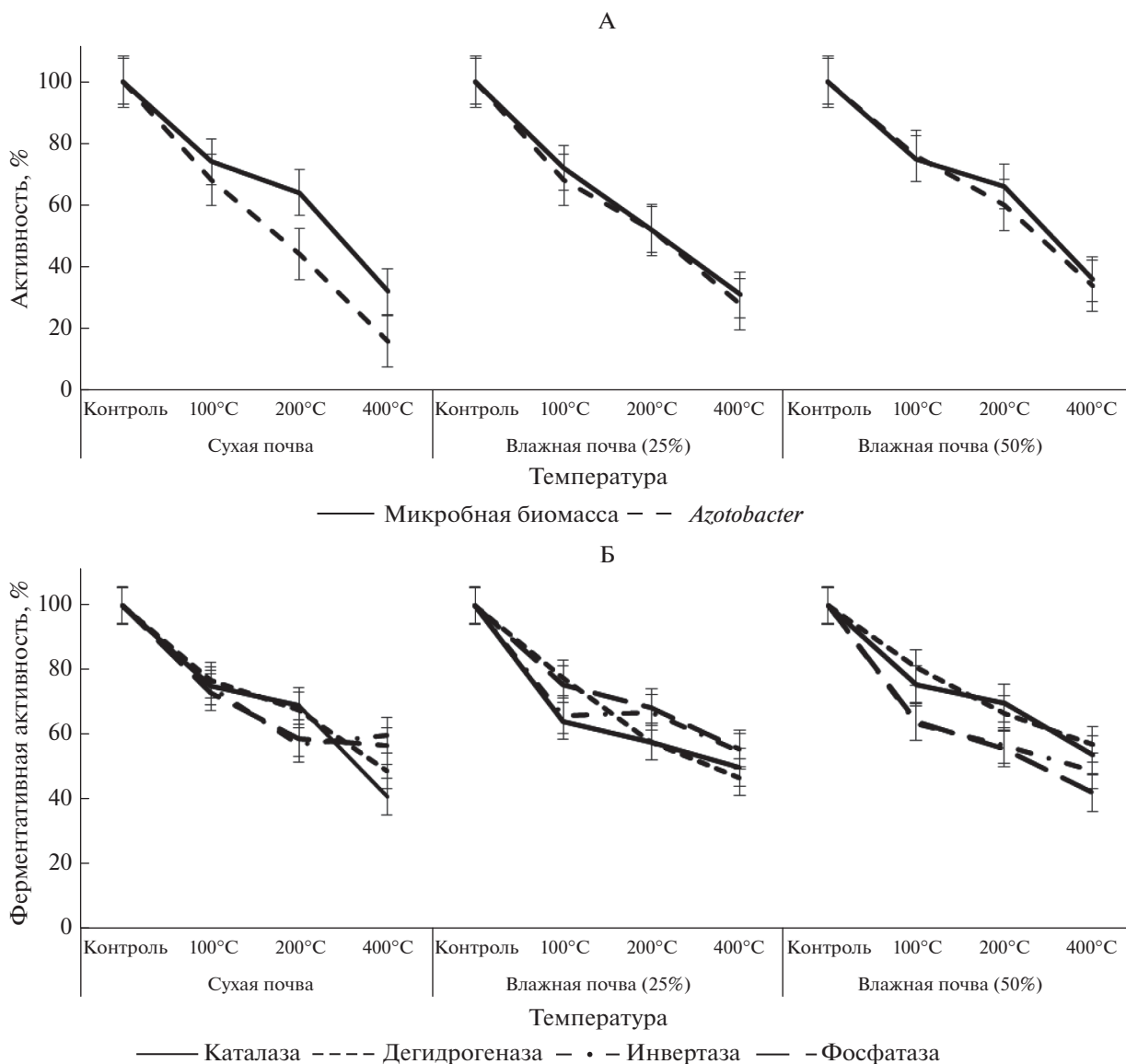


Рис. 3. Влияние инфракрасного облучения на микробиологическую (А) и ферментативную (Б) активность чернозема, % от контроля.

Таблица 1. Параметры исследования воздействия инфракрасного излучения

Температура на поверхности образца, °С	Средняя температура, °С	Время нагревания, мин	Поглощенное почвой тепло (ДН), Дж/г
Воздушно-сухая почва (контроль)			
100	86	6	97
200	131	21	129
400	261	100	266
Влажная почва (25%)			
100	79	8	98
200	116	30	135
400	206	115	285
Избыточно влажная почва (50%)			
100	77	12	116
200	122	38	138
400	253	145	308

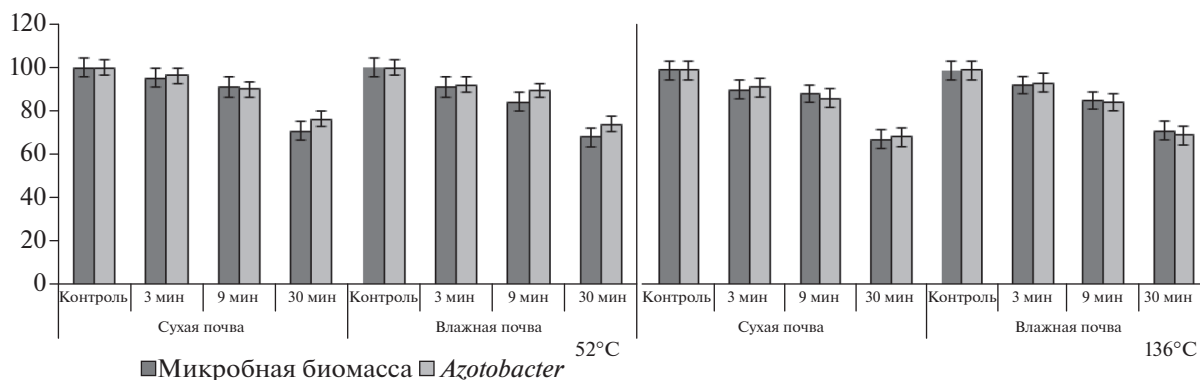


Рис. 4. Влияния дыма от продуктов горения соломы на микробиологическую активность чернозема, % от контроля.

Влияния дыма от продуктов горения соломы.

В ходе исследования было выявлено уменьшение активности оксидоредуктаз и гидролаз при разной влажности в условиях холодной (52°C) и горячей (139°C) обработки почвы дымом от горения соломы. Реакция активности ферментов, как и в предыдущем опыте, зависела от времени воздействия и исходной влажности почвы (рис. 4). При воздействии холодного дыма в течение 3 мин активность каталазы сухой почвы ослаблена на 11% ($p < 0.05$) относительно контрольных значений, активность дегидрогеназ уменьшилась на 4%, активность инвертазы — на 8%, активность фосфатазы — на 10% (для всех ферментов $p < 0.05$). Во влажной почве аналогичное воздействие инактивировало каталазу на 10%, дегидрогеназы — на 11%, инвертазу — на 13%, фосфатазу — на 19% (для всех ферментов $p < 0.05$).

При холодной обработке сухой почвы дымом в течение 9 мин ингибирование активности каталазы относительно контроля удвоилось, активность дегидрогеназ, фосфатазы, инвертазы уменьшилась на 11–14% ($p < 0.05$). Во влажной почве при таком же воздействии фактора активность каталазы уменьшилась на 24%, активность дегидрогеназ и инвертазы — на 15%, фосфатаз — на 29% ($p < 0.05$).

При максимальном по времени воздействию холодным дымом в течение 30 мин в сухой почве активность каталазы достоверно меньше на 29%, активность дегидрогеназ — на 24%, активность инвертазы на 16%, активность фосфатаз — на 20% (для всех ферментов $p < 0.05$). Для влажной почвы инактивация каталазы составило 32%, дегидрогеназ — 30%, инвертазы — 22%, фосфатаз — 31% (для всех ферментов $p < 0.05$). При обработке горячим дымом наблюдается схожая тенденция изменения биологической активности. Однако уменьшение значений показателей более существенно, так как в данном случае оно зависит не только от продолжительности действия и влажности почвы, но и повышения температуры почвы. Микробная биомасса сухой почвы при обработке холодным ды-

мом в течение 3 мин достоверно ($p < 0.05$) подавлена на 10% от контроля, при горячей обработке — на 12% (рис. 4). Во влажной почве достоверные изменения значений ($p < 0.05$) практически такие же — 8% при холодной обработке, 10% — при горячей обработке. Редуцирование биомассы микроорганизмов не зависит от исходной влажности почвы. Оно максимально при горячей обработке влажной почвы в течение 30 мин (на 35% при $p < 0.05$). Аналогичная тенденция была выявлена и для азотфиксирующих бактерий рода *Azotobacter*. Обилие этих бактерий в сухой почве при обработке холодным дымом в течение 3 мин было меньше на 4% относительно контроля ($p < 0.05$), при горячей обработке — на 8%. Во влажной почве снижение значений составило 6–8% ($p < 0.05$). Максимальное подавление обилия бактерий отмечено после обработки горячим дымом влажной почвы в течение 30 мин. Обилие бактерий при этом было меньше на 30% ($p < 0.01$).

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных модельных исследований выявлено, что все исследуемые факторы пирогенного воздействия в зависимости от продолжительности и интенсивности изменяют биологические свойства чернозема в сторону уменьшения значений. Комплексное воздействие в результате пала повышает температуру поверхностного слоя в несколько раз, воздействует низкотемпературной плазмой и продуктами горения, что приводит к подавлению почвенных микроорганизмов и ингибированию ферментативной активности. Об инактивации ферментов пропорционально степени пирогенного воздействия в почвах писали и другие исследователи [43, 53].

Максимальный эффект пирогенного воздействия отмечен для верхнего (0–1 см) слоя почвы. На этот факт, преимущественно для лесных почв, указывали и другие исследователи [20, 24, 43, 46]. Но и в нижнем слое 4–5 см подавление биологи-

ческой активности было достоверным. По отношению к палу ферменты из класса оксидоредуктаз оказались менее устойчивы, нежели гидролазы. Полученные результаты согласуются с данными Валькова с соавт. [6] по исследованию воздействия палов на биоту и биологическую активность пахотных черноземов. Ранее [26] были показаны закономерности ингибирования и динамика восстановления ферментативной активности после сжигания урожая ячменя в полевых условиях. Было показано сохранение различий между участками с разной интенсивностью палов и контрольным участком в течение всего срока исследований (30 сут). В настоящей работе аналогичные результаты получены при моделировании пала в контролируемых условиях, что еще раз доказывает отрицательное воздействие пала на почву.

Воздействие низкотемпературной плазмы газовой горелки привело к существенному подавлению биологической активности чернозема. Степень изменения значений биологических параметров зависела от продолжительности воздействия. Максимальный эффект наблюдали при трехминутном воздействии пламени горелки, минимальное — при одноминутном воздействии. При этом повышается температура, уменьшается влажность почвы, численность микроорганизмов (на 52–56%) и активность почвенных ферментов (на 25–26%). Основная часть микроорганизмов сосредоточена в подстилке, дернине и верхних гумусовых горизонтах [11, 16]. Максимальная микробиологическая активность проявляется при оптимальных для них высокой влажности и умеренно-высоких температурах. Низкая влажность почвы является одним из неблагоприятных факторов для жизнедеятельности растений и микроорганизмов. В ходе данного исследования температура верхнего слоя почвы на короткое время повышалась до 450–500°C, что иссушало почву и сильно повлияло на почвенный микробоценоз. Кроме прямого воздействия — разрушения микробиологических клеток и денатурации ферментов — высокие температуры существенно меняют условия жизнедеятельности микроорганизмов.

Ферментативная активность почвы зависит от свойств почв, биоты и биологической активности. Основными факторами, регулирующими деятельность микроорганизмов и активность почвенных ферментов, являются влажность, температура и pH [32, 33]. Ферменты являются термолабильными веществами, их активность сохраняется при низких температурах и высушивании почвы. Однако при высоких температурах почвенные ферменты инактивируются. Лишь очень немногие ферменты способны в определенных условиях выдерживать нагревание до 100°C с сохранением активности. Как избыток, так и недостаток влажности отрицательно сказываются на активности ферментов. В воздушно-сухой почве активность

ингибируется на 20–30% и более, а при увлажнении восстанавливается [34]. При 80% влажности воздуха в инкубационной камере в сухой почве уреазы проявляла высокую активность, в то время как размножение большинства почвенных микроорганизмов прекращалось [55]. В представленных исследованиях выявлено, что при нагревании переувлажненной почвы до 400°C активность ферментов подавляется в меньшей степени по сравнению с микробиологическими показателями. Почвенные ферменты более чувствительны, чем микроорганизмы, к физическим воздействиям, таким, как инфракрасное, ультрафиолетовое и радиоактивное облучение [10, 33, 34]. Исследования показывают, что при воздействии на почвы гамма-излучения численность микроорганизмов значительно подавляется [9], в то же время ферментативная активность остается достаточно высокой [10]. Большей устойчивостью иммобилизованных почвой ферментов обусловлена их меньшая реакция по сравнению с обилием микроорганизмов на разные факторы пирогенного воздействия, в частности на инфракрасное облучение и воздействие плазмы газовой горелки. Оксидоредуктазы катализируют перенос электронов, то есть отвечают за окислительно-восстановительные реакции в почве, гидролазы катализируют гидролиз химических связей, то есть сольволиз воды. Ферменты из этих классов по-разному реагируют на экологические факторы и антропогенное воздействие ввиду их специфичности их свойств и функций [34, 37, 39]. В наших исследованиях при воздействии различных пирогенных факторов на почву ферментативная активность достоверно необратимо ингибируется. Инфракрасное излучение приводит к уменьшению значений микробиологических параметров (на 49–84% при максимальной температуре 400°C) и ферментативной активности (на 46–68%), которое коррелирует с температурой воздействия. Максимальная инактивация каталазы, инвертазы и фосфатазы выявлена во влажной почве по сравнению с сухой, что объясняется большей продолжительности воздействия тепла для достижения заданной температуры. Соответственно в данных условиях увеличивается и количество энергии, полученной почвой и воздействующей на биологические параметры (табл. 1).

О токсичности продуктов горения при пожарах хорошо известно. В дымовых газах, образующихся при горении древесины, могут быть более 200 веществ, продуктов неполного сгорания [2]. Большинство из газообразных продуктов горения токсичны для живых организмов, в том числе для человека [30]. Основным веществом при этом является монооксид углерода — угарный газ. Известны научные работы, посвященные воздействию дыма от пожаров на качество воздуха, растительность, фауну [42, 58]. Однако работ, посвященных

влиянию дыма от продуктов горения при пожарах на почвенных микроорганизмов и биологическую активность почв, практически нет. Установленный в представленном исследовании эффект воздействия дыма на биологические свойства почв позволяет отчасти восполнить этот пробел. Воздействие дыма от продуктов горения соломы подавило микробиологические и биохимические параметры почвы с теми же закономерностями, что и для описанных выше воздействий огня и инфракрасного излучения. Микробиологические показатели при максимальном воздействии на влажные образцы почв уменьшают значения на 30–35%, ферментативная активность подавляется на 22–32%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения серии модельных исследований установлено, что пирогенное воздействие имеет комплексное влияние на биологические свойства почв. К поражающим факторам пирогенного воздействия отнесены огонь (низкотемпературная плазма), высокая температура, токсичные продукты горения. Степень подавления биологических свойств почв зависит от интенсивности фактора (температура и время воздействия), а также от исходной влажности почвы. Максимальное угнетение биологической активности установлено для верхнего сантиметрового слоя почвы, однако достоверные изменения достигают глубины 5 см. Все исследуемые биологические параметры были информативными и чувствительными в качестве индикаторов для оценки пирогенного воздействия. В качестве простого теста степени повреждения постпирогенных почв можно использовать активность почвенных ферментов, особенно активность каталазы как простого и воспроизводимого показателя, не требующего высокой квалификации исполнителей и ресурсов для определения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования проведены при финансовой поддержке ведущей научной школы Российской Федерации (НШ- 2511.2020.11).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Архангельская Т.А.* Температурный режим комплексного почвенного покрова. М.: ГЕОС, 2012. 282 с.
2. *Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б.* Выделение дыма при термическом разложении и горении древесины // Лесной вестник. 2004. № 2(33). С. 99–103.

3. *Безкорвайная И.Н., Иванова Г.А., Тарасов П.А. и др.* Пирогенная трансформация почв сосняков средней тайги Красноярского края // Сибирский экологический журн. 2005. Т. 12. № 1. С. 143–152.
4. *Благодатский С.А., Благодатская Е.В., Горбенко А.Ю., Паников Н.С.* Регидратационный метод определения микробной биомассы в почве // Почвоведение. 1987. № 4. С. 64–71.
5. *Буйолов Ю.А., Быкова Е.П., Гавриленко В.С., Грибков А.В. и др.* Анализ отечественного и зарубежного опыта управления пожарами в степях и связанных с ними экосистемах, в частности, в условиях ООПТ. М.: Ин-т глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, 2013. 140 с.
6. *Вальков В.Ф., Казадаев А.А., Кременица А.М., Супрун В.А., Суханова В.М., Тащев С.С.* Влияние сжигания стерни на биоту чернозема // Почвоведение. 1996. № 12. С. 1517–1522.
7. *Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И.* Почвы Юга России. Ростов-на-Дону: Эверест, 2008. 276 с.
8. *Даденко Е.В., Казеев К.Ш., Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф.* Изменение ферментативной активности почвенных образцов при их хранении // Почвоведение. 2009. № 12. С. 1481–1486.
9. *Денисова Т.В., Казеев К.Ш.* Чувствительность основных групп почвенных микроорганизмов чернозема обыкновенного к гамма-излучению // Экология. 2008. № 2. С. 110–115.
10. *Денисова Т.В., Казеев К.Ш., Колесников С.И., Вальков В.Ф.* Интегральная оценка электромагнитных воздействий различной природы на биологические свойства почв юга России // Почвоведение. 2011. № 11. С. 1386–1390.
11. *Добровольская Т.Г., Звягинцев Д.Г., Чернов И.Ю., Головченко А.В., Зенова Г.М., Лысак Л.В., Манучарова Н.А., Марфенина О.Е., Полянская Л.М., Степанов А.Л., Умаров М.М.* Роль микроорганизмов в экологических функциях почв // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1087–1096. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090038>
12. *Зайцев А.С., Гонгальский К.Б., Коробушкин Д.И., Бутенко К.О., Горшкова И.А., Рахлеева А.А., Сайфутдинов Р.А., Костина Н.В., Шахаб С.В., Язрикова Т.Е.* Снижение уровня функционирования почвенных пищевых сетей после пожаров на примере бореальных лесов Центральной России // Сибирский экологический журн. 2017. Т. 24. № 3. С. 321–331.
13. Закон Краснодарского края от 2 июля 2004 г. № 734-КЗ “Об охране атмосферного воздуха на территории Краснодарского края”.
14. *Звягинцев Д.Г., Алиев Р.А.* Сравнительное изучение температурной устойчивости каталазы разного происхождения // Почвоведение. 1975. № 3. С. 73–80.
15. *Иванова Г.А., Иванов В.А., Ковалева Н.М., Конрад С., Жила С.В., Тарасов П.А.* Сукцессия растительности после высокоинтенсивного пожара в сосняке лишайниковом // Сибирский экологический журн. 2017. Т. 24. № 1. С. 61–71. <https://doi.org/10.7868/S0367059718010043>
16. *Иванова Е.А., Першина Е.В., Кутовая О.В., Сергалиев Н.Х., Нагиева А.Г., Жиенгалеев А.Т., Проворов Н.А., Андронов Е.Е.* Сравнительный анализ микробных сообществ контрастных почвенных типов в усло-

- виях различных фитоценозов // Экология. 2018. № 1. С. 34–44.
17. Казеев К.Ш., Козунь Ю.С., Колесников С.И. Использование интегрального показателя для оценки пространственной дифференциации биологических свойств почв юга России в градиенте аридности климата // Сибирский экологический журн. 2015. Т. 22. № 1. С. 112–120.
18. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В. Методы биодиагностики наземных экосистем. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та, 2016. 356 с.
19. Колесников С.И., Жаркова М.Г., Везденеева Л.С., Кутузова И.В., Молчанова Е.В., Зубков Д.А., Казеев К.Ш. Оценка экотоксичности тяжелых металлов и нефти по биологическим показателям чернозема // Экология. 2014. № 3. С. 158–163. <https://doi.org/10.1134/S106422931908009X>
20. Краснощекоев Ю.Н. Постпирогенная изменчивость подстилки в горных лесах Прибайкалья // Почвоведение. 2019. № 3. С. 290–303.
21. Краснощекоев Ю.Н. Почвы горных лесов Прибайкалья и их трансформация под влиянием пожаров // Почвоведение. 2018. № 6. С. 387–401.
22. Краснощекоев Ю.Н., Евдокименко М.Д., Онучин А.А. Постпирогенная дигрессия лесных экосистем в горном Прибайкалье // Сибирский лесной журн. 2018. № 6. С. 46–57.
23. Кукавская Е.А., Бурак Л.В., Каленская О.П., Зарубин Д.С. Трансформация напочвенного покрова при низовых пожарах и оценка пирогенной эмиссии углерода в темнохвойных лесах Средней Сибири // Сибирский экологический журн. 2017. Т. 24. № 1. С. 72–82.
24. Максимова Е.Ю., Кудинова А.Г., Абакумов Е.В. Функциональная активность почвенных микробных сообществ постпирогенных островных сосновых лесов г. Тольятти Самарской области // Почвоведение. 2017. № 2. С. 249–255.
25. Маслов М.Н., Маслова О.А., Поздняков Л.А., Копейна Е.И. Биологическая активность почв горно-тундровых экосистем при постпирогенном восстановлении // Почвоведение. 2018. № 6. С. 728–737.
26. Одабашиян М.Ю., Трушков А.В., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Влияние пала на ферментативную активность чернозема // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. № 2(3). С. 481–485.
27. Постановление Правительства Ростовской области от 30.08.2012 № 810 “О мерах по противодействию выжиганию сухой растительности на территории Ростовской области”.
28. Постановление Правительства РФ от 25.04.2012 № 390 “О противопожарном режиме”. Пункт 218: “Запрещается сжигание стерни, пожнивных остатков и разведение костров на полях”.
29. Работнов Т.А. Луговоедение. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. 319 с.
30. Суховский В.С., Стрелис А.К., Григорьев Е.Г., Суховская В.В. Влияние дыма лесных пожаров на заболеваемость жителей Приангарья // Здоровоохранение Российской Федерации. 2009. № 1. С. 54–55.
31. Тульская Е.М., Звягинцев Д.Г. Сравнительное изучение каталазной и каталитической активности верхних горизонтов почв // Почвоведение. 1979. № 10. С. 92–97.
32. Хазиев Ф.Х. Системно-экологический анализ ферментативной активности почв. М.: Наука, 1982. 204 с.
33. Хазиев Ф.Х. Функциональная роль ферментов в почвенных процессах // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2015. № 2(78). С. 14–24.
34. Хазиев Ф.Х. Экологические связи ферментативной активности почв // Экобиотех. 2018. Т. 1. № 2. С. 80–92.
35. Юсупов И.А., Панова Н.К., Антипина Т.Г. Трансформация процесса торфообразования в олиготрофном болоте в зоне влияния газового факела в Западной Сибири // Экология. 2019. № 1. С. 3–14.
36. Alcaniz M., Outeiro L., Francos M., Farguell J., Ubeda X. Long-term dynamics of soil chemical properties after a prescribed fire in a Mediterranean forest (Montgrí Massif, Catalonia, Spain) // Sci. Total Environ. 2016. V. 572. P. 1329–1335. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.115>
37. Bachmann J., Horton R., van der Ploeg R.R. Isothermal and nonisothermal evaporation from four sandy soils of different water repellency // Soil Science Society Am. J. 2001. V. 65. P. 1599–1607. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.1599>
38. Bento-Goncalves A., Vieira A., Ubeda X., Martin D. Fire and soils: Key concepts and recent advances // Geoderma. 2012. V. 191. P. 3–13.
39. Burns R.G., DeForest Jared L., Jürgen M., Sinsabaugh R.L., Stromberger M.E., Wallenstein M.D., Weintraub M.N., Zoppini A. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions // Soil Biol. Biochem. 2013. V. 58. P. 216–234. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.009>
40. Cancelo-Gonzalez J., Rial-Rivas M., Díaz-Fierros, F. Colourimetric variations in burnt granitic forest soils in relation to fire severity // Ecological Indicators. 2014. V. 46. P. 92–100. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.02.003>
41. Chandler C., Cheney P., Thomas P., Trabaud L., Williams D. Forest fire behavior and effects // Fire in Forestry. N.Y.: Wiley, 1983. V. 1. P. 171–175.
42. Dokas I., Statheropoulos M., Karma S. Integration of field chemical data in initial risk assessment of forest fire smoke // Sci. Total Environ. 2007. V. 376. P. 72–85. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.01.064>
43. Fernandez-García V., Miesel J., Baeza M.J., Marcos E., Calvo L. Wildfire effects on soil properties in fire-prone pine ecosystems: Indicators of burn severity legacy over the medium term after fire // Applied Soil Ecology. 2019. V. 135. P. 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.12.002>
44. Fonseca F., Figueiredo T., Nogueira C., Queiros A. Effect of prescribed fire on soil properties and soil erosion in a Mediterranean mountain area // Geoderma. 2017. V. 307. P. 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.06.018>
45. Francos M., Ubeda X., Pereira P., Alcaniz M. Long-term impact of wildfire on soils exposed to different fire severities. A case study in Cadiretes Massif (NE Iberian Pen-

- insula) // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 615. P. 664–671.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.311
46. Girona-Garcia A., Badia-Villas D., Marti-Dalmau C., Ortiz-Perpina O., Mora O.J.L., Armas-Herrera C.M. Effects of prescribed fire for pasture management on soil organic matter and biological properties: A 1-year study case in the Central Pyrenees // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 618. P. 1079–1087.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.127
 47. Hart S.C., DeLuca T.H., Newman G.S., MacKenzie M.D., Boyle S.I. Post-fire vegetative dynamics as drivers of microbial community structure and function in forest soils // *Forest Ecology and Management.* 2005. V. 220. P. 166–184.
https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.012
 48. Hobbey E.U., Le Gay Brereton A.J., Wilson B. Forest burning affects quality and quantity of soil organic matter // *Sci. Total Environ.* 2017. V. 575. P. 41–49.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.231
 49. Hu T., Hu H., Li F., Zhao B., Wu S., Zhu G., Sun L. Long-term effects of postfire restoration types on nitrogen mineralisation in a Dahurian larch (*Larix gmelinii*) forest in boreal China // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 679. P. 237–247.
 50. Hugh H.A.L. Soil extracellular enzyme dynamics in a changing climate // *Soil Biol. Biochem.* 2012. V. 47. P. 53–59.
https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.12.026
 51. Kolesnikov S.I., Timoshenko A.N., Kazeev K.Sh., Aki-menko Yu.V., Myasnikova M.A. Ecotoxicity of Copper, Nickel, and Zinc Nanoparticles Assessment on the Basis of Biological Indicators of Chernozems // *Eurasian Soil Science.* 2019. V. 52. № 8. P. 982–987.
 52. Kong J.J., Yang J., Bai E. Long-term effects of wildfire on available soil nutrient composition and stoichiometry in a Chinese boreal forest // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 642. P. 1353–1361.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.154
 53. Lucas-Borja M.E., Calsamiglia A., Fortesa J., García-Comendador J., Guardiola L., García-Orenes F., Gago J., Estrany J. The role of wild fire on soil quality in abandoned terraces of three Mediterranean micro-catchments // *Catena.* V. 170. 2018. P. 246–256.
 54. Moya D., Gonzalez-De Vega, Lozano E., Garcha-Orenes F., Mataix-Solera J., Lucas-Borja M.E., 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 // *J. Environmental Management.* 2019. V. 235. P. 250–256.
https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.029
 55. Skujins J.J., McLaren A.D. Enzyme reaction rates at limited water activities // *Science.* 1967. Dec. 22. V. 158(3808). P. 1569–1570.
 56. Song X., Wang G., Hu Z., Fei Ran, Chen X. Boreal forest soil CO₂ and CH₄ fluxes following fire and their responses to experimental warming and drying // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 644. P. 862–872.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.014
 57. Strydom E., Riddell E.S., Rowe T., Govender N., Lorentz S.A., Pieter A.L. le Roux, Corli Wigley-Coetsee. The effect of experimental fires on soil hydrology and nutrients in an African savanna // *Geoderma.* 2019. V. 345. P. 114–122.
https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.027
 58. Wild land Fires and Air Pollution / Ed. by A. Bytnerowicz, M.J. Arbaugh, A.R. Riebau, C. Andersen. 2008. V. 8. P. 1–638.

Assessment of the Effect of Pyrogenic Factors on the Biological Properties of Chernozems

K. Sh. Kazeev^{1,*}, M. Yu. Odabashian¹, A. V. Trushkov¹, and S. I. Kolesnikov¹

¹*Southern Federal University, Stachka prosp., 194/1, Rostov-on-Don, 344006 Russia*

^{*}*e-mail: kamil_kazeev@mail.ru*

Alteration of biological properties of chernozems caused by several pyrogenic agents has been studied in simulation experiments. These were: low-temperature plasma, infra-red irradiation, straw burning, and fume of burning products. It has been shown that the pyrogenic effect has a complex nature, so that worsening of biological parameters depends on temperature, duration of fire episode, intensity of smoke and ash impact, and soil moisture. Such integrated effect induced a decrease in microbial biomass by 39%, population of nitrogen-fixing bacteria by 29% versus the control values. The inhibition of dehydrogenase and catalase (oxidoreductase class) was 44–53%; activity of hydrolase (phosphatase and invertase) was lower (by 16–18%). A maximal effect was recorded for the uppermost soil layer (0–1 cm) as compared to the 4–5 cm layer. Microbiological indices went down by 52–56% after placing the sample in the flame of a gas-jet for 3 minutes, while soil enzyme activity decreased by 25–26%. For the latter, the duration of flame effect was of special importance; the correlation coefficient for dehydrogenase activity was –0.81, for invertase –0.86, catalase –0.78, phosphatase –0.85 ($p < 0.01$). Increasing IR irradiation also resulted in growing inhibition of biological indices. Even a minimal impact of fume of straw burning products (3 minutes at temperature 52°C) reliably decreased soil microbiological and biochemical parameters (by 4–19%, $p < 0.05$). Higher level of impact suppresses the biological activity by 20–30%.

Keywords: fire, burn, biological indicators, enzyme activity