

УДК 631.46:574.4:630\*43

## ВЛИЯНИЕ ПОЖАРОВ НА ФЕРМЕНТАТИВНУЮ АКТИВНОСТЬ КОРИЧНЕВЫХ ПОЧВ И БУРОЗЕМОВ ЗАПАДНОГО КАВКАЗА

© 2024 г. В. В. Вилкова<sup>a,\*</sup> (<https://orcid.org/0000-0002-1374-3941>), К. Ш. Казеев<sup>a</sup>, М. С. Нижельский<sup>a</sup>, Д. А. Привизенцева<sup>a</sup>, А. Н. Федоренко<sup>a</sup>, С. И. Колесников<sup>a</sup>, А. К. Шхапацев<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Южный федеральный университет, пр-т Стачки 194/1, Ростов-на-Дону, 344090 Россия

<sup>b</sup>Майкопский государственный технологический университет, ул. Первомайская 191, Майкоп, 385000 Россия

\*e-mail: lera.vilkova.00@mail.ru

Поступила в редакцию 15.05.2023 г.

После доработки 21.09.2023 г.

Принята к публикации 22.09.2023 г.

Изучено влияние пожаров на ферментативную активность коричневых почв ксерофитных лесов (Skeletal Leptic Cambisol) государственного природного заповедника “Утриш”, Краснодарский край (верховой пожар 2020 г.) и бурозема мезофитных лесов (Naplic Cambisol (Loamic)) Хамышинского лесничества, Республика Адыгея (низовой пожар 2018 г.). Исследованы изменения реакции почвенной среды, содержания органического углерода и активности ферментов: каталазы, уреазы, фосфатазы и инвертазы, участвующих в круговороте углерода, фосфора и азота. Реакция ферментов на пирогенное воздействие зависит от вида фермента и типа почв. Проведен факторный анализ. Установлено снижение активности каталазы и инвертазы для двух типов почв в слое 0–3 см в среднем на 47%, реакция фосфатазы и уреазы отличалась в зависимости от типа почв. Спустя два года после пожара активность фосфатазы поверхностного слоя постпирогенных коричневых почв приближалась к контрольным значениям, активность уреазы восстанавливалась медленнее по сравнению с другими ферментами. Спустя четыре года после пожара, в слое 0–3 см постпирогенного бурозема значения активности уреазы были примерно равны контрольному варианту. Установлено увеличение значений pH в среднем на 30% и уменьшение содержания C<sub>орг</sub> в среднем на 12% в обеих почвах. В слое 3–10 см коричневых почв отмечено повышение активности всех изученных ферментов, а бурозема – уменьшение. Факторный анализ показал наличие связи между реакцией почвенной среды, содержанием органического углерода и активностью ферментов, теснота и характер связи отличаются в зависимости от типа почвы. Полученные результаты свидетельствуют о влиянии эдафических особенностей изученных почв на реакцию ферментативной активности и пирогенное воздействие.

**Ключевые слова:** пирогенный фактор, биодиагностика, почвенные ферменты, оксидазы, гидролазы

**DOI:** 10.31857/S0032180X24020064, **EDN:** XYLMWC

### ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом пожары становятся все более острой угрозой лесным экосистемам. Стремительное сокращение площадей лесов и невозполнимая утрата природной биоты вынуждают рассматривать пожары как негативный фактор воздействия [8]. Установлено, что пожары, оказывают влияние на перенос воздушных масс и климатические условия [22]. В условиях быстрого изменения климата биогеоценозы более уязвимы к последствиям сезонных и эпизодических периодов засухи [37]. Чаще всего в лесах России возникают и распространяются

низовые пожары, оказывающие разрушительное воздействие на свойства почв, что приводит к нарушению почвообразования и, следовательно, к снижению эффективности всех экосистемных процессов [8]. Высокой стойкостью к пирогенному фактору обладают лесные массивы, насыщенные влагой [22]. В то время как аридные экосистемы более уязвимы к пожарам из-за большего долгосрочного дефицита влаги [30]. Высокая вероятность пожаров в засушливом средиземноморском климате обусловлена повышенными температурами и учащением волн жары. На Северо-Западе Кавказа вероятность возникновения 5-го класса

пожароопасности (температура пламени 1000°C и более) составляет около 24–36% [2].

Почва, как один из компонентов биогеоценоза, подвержена влиянию пирогенного фактора. В результате пожара происходит потеря от 20 до 80% углерода и азота почвы, часть которых улетучивается или переходит в подвижные водорастворимые соединения [9, 23]. Также сокращается микробная биомасса из-за недоступности пирогенного углерода [51]. Частота, сила и другие параметры пожаров зависят от мощности лесной подстилки, гранулометрического состава и гидротермического режима почв [19, 39, 54].

Биологическая индикация с использованием методов почвенной микробиологии и биохимии широко применяется при диагностике и мониторинге экологического состояния почв [25, 29, 42, 45, 49, 52]. Пожары оказывают значительное влияние на почвенные микробиоценозы и ферментативную активность почв [31, 38, 43, 44, 48]. Их последствия отмечены спустя годы [39, 40, 54].

Особенности воздействия пожаров на экосистемы и их последствия на ранних стадиях сукцессии отличаются. Следовательно, необходимо проведение исследований по оценке влияния пожаров с учетом климатических, геоморфологических и других условий каждого региона.

Цель работы – изучение влияния пожаров на ферментативную активность коричневых почв и бурозема Западного Кавказа. Были поставлены следующие задачи: оценить активность почвенных ферментов (каталазы, уреазы, инвертазы, фосфатазы) постпирогенных коричневых почв и бурозема из слоев 0–3 и 3–10 см; определить степень приближения активности почвенных ферментов постпирогенных коричневых почв и бурозема к контрольным значениям.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

**Полевые исследования.** В августе–сентябре 2022 г. были проведены полевые исследования двух постпирогенных участков ксерофитного и мезофитного лесов Западного Кавказа. Местоположение и описание исследуемых участков представлены на рис. 1 и в табл. 1. Изучаемый участок ксерофитного леса находится на территории государственного природного заповедника “Утриш” на полуострове Абрау. Количество выпадающих осадков здесь составляет около 600–700 мм. Гидротермические условия сильно варьируют: промывной водный режим в течение влажной и теплой зимы сменяется летним иссушением [26]. Абраусский полуостров является единственным местом на территории России, где произрастают реликтовые ксерофитно-средиземноморские сообщества из можжевельников высокого (*Juniperus*

*excelsa* M. Bieb.), вонючего (*J. foetidissima* Willd.) и красного (*J. oxycedrus* L.) [13]. Почвенный покров представлен разновидностями коричневых, лугово-коричневых и аллювиально-луговых почв, Cambisols, Fluvisols. Почва исследуемого участка по WRB определена как Skeletic Leptic Cambisol [55]. Содержание гумуса составляет около 5–10%, с глубиной происходит его постепенное убывание. Коричневые почвы характеризуются нейтральной или слабощелочной реакцией среды в верхних горизонтах и щелочной – в нижних [4, 11]. В августе 2020 г. в результате сильного верхового пожара на территории заповедника “Утриш” сгорело более 120 га реликтового леса. После чего началась восстановительная сукцессия. В 2022 г. отмечено разрастание сумаха (*Rhus coriaria* L.), который не наблюдали в этих комплексах до пожара, также возросла доля злаков за счет ломкоостника (*Piptatherum holciforme* (M. Bieb.) Roem. & Schult), заметно выросла средняя высота травостоя [20]. Контрольный участок характеризует типичную растительность заповедника и представляет собой смешанный лес с произрастанием можжевельника (*Juniperus* sp.), дуба пушистого (*Quercus pubescens* Willd.), грабинника (*Carpinus orientalis* Mill.), образующего сомкнутые заросли, и иглицы понтийской (*Ruscus aculeatus* L.). Участок имеет разреженный травяно-кустарничковый ярус (проективное покрытие обычно не превышает 20–30%, а истинное задернение – 10%), доминантами которых выступают шалфей красный (*Salvia ringens* Sm.), дубравник белый (*Teucrium polium* L.), вероника нителистная (*Veronica filifolia* Lipsky) [3].

Изучаемый участок мезофитного леса находится на территории Хамышинского участкового лесничества Республики Адыгея. В предгорьях Западного Кавказа выпадает 700–900 мм осадков, испаряемость составляет 600–700 мм. Подобное соотношении осадков и испаряемости в условиях хорошего вертикального или горизонтального дренажа обуславливают промывной тип водного режима [4]. Растительность контрольного участка представляет собой мертвопокровный буковый лес, формула леса: 6БЗГ1Л (60% бук, 30% граб, 10% липа). Почвенный покров представлен буроземом (Haplic Cambisol (Loamic) по WRB) [55]. В верхнем почвенном горизонте содержание гумуса достигает 10%, с глубиной значение снижается [4]. Для бурых лесных почв по всей глубине профиля отмечается кислая реакция среды (рН от 5.1 до 5.9). Величина рН обуславливает направление большинства процессов, протекающих в почве, и зависит от состава растительного опада, рельефа, экспозиции склона и других факторов [1]. Здесь низовой пожар произошел в 2018 г., после которого ослабленные деревья были свалены ветровалом. Спустя 4 года после пожара на исследуемом участке отсутствует травянистая растительность,

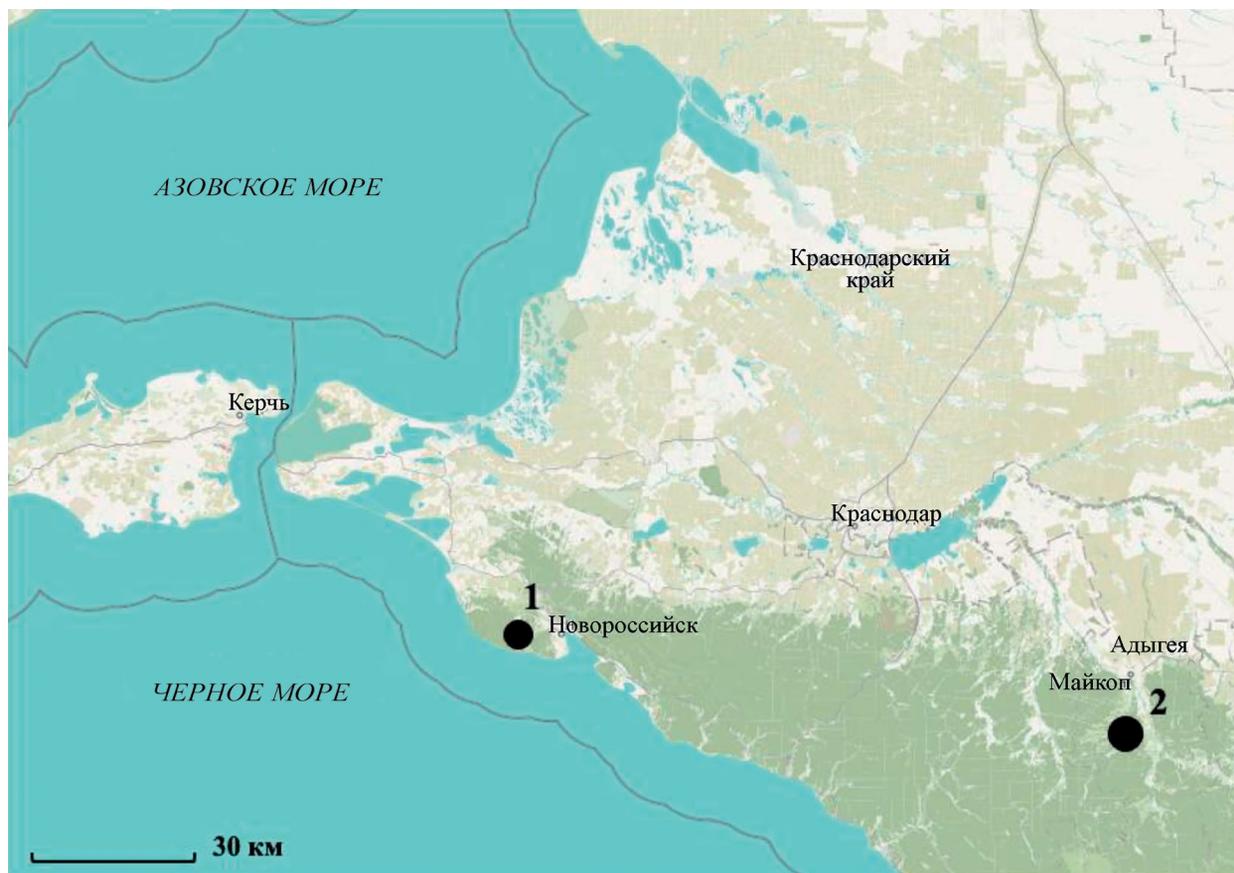


Рис. 1. Картограмма местоположения исследуемых участков: 1 – государственный природный заповедник “Утриш”, 2 – Хамышинское лесничество.

Таблица 1. Описание исследуемых участков

Характеристика	Постпирогенная коричневая почва	Постпирогенный бурозем
Местоположение	Государственный природный заповедник “Утриш”, Краснодарский край	Хамышинское участковое лесничество, Республика Адыгея
Тип леса	Ксерофитный	Мезофитный
Географические координаты	44.73029° N, 37.43235° E	44.03466° N 40.10600° E
Высота участка над уровнем моря, м. н.у.м.	77	651
Крутизна склона и экспозиция	5° Ю	23–24° ЮЗ
Время после пожара, лет	2	4
Тип пожара	Верховой	Низовой
Наличие золы и угля на поверхности почвы	+	–
Диагностические признаки пирогенного повреждения	Стволы и ветви стоящих деревьев полностью обуглены, некоторые деревья выжжены до корней, живых деревьев нет; на поверхности почвы большое количество золы, пепла, углей	Обуглены нижние части стволов до 2 м; угнетенные сухие деревья; на поверхности почвы единичные включения в виде небольших углей

отмечено разрастание рододендрона понтийского (*Rhododendron ponticum* L.), встречается черника кавказская (*Vaccinium arctostaphylos* L.), редкий подрост ольхи черной (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.). Диагностические признаки пирогенного повреждения представлены в табл. 1.

В первые несколько лет прямые последствия пожара нивелируются, в ходе восстановительной сукцессии доступно изучение только косвенных последствий. Именно по этой причине, несмотря на разные виды пожаров (верховой и низовой), сравнение полученных данных уместно.

Фотографии постпирогенных и контрольных участков представлены в дополнительных материалах.

Образцы почв отбирали в слое 0–3 и 3–10 см, поскольку непосредственному пирогенному воздействию подвержен только поверхностный слой почвы [16, 38]. Отбор образцов проводили рандомизировано в трехкратной повторности для каждой исследуемой мониторинговой площадки. Масса одного образца, взятого с мониторинговой площадки, составила 500 г. Почву высушивали в тени на воздухе, отбирали органические остатки и включения, перетирали и просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм. Исследование ферментативной активности почв проводили в первые 2 недели после отбора проб. В качестве контроля использовали образцы почв на расположенных рядом участках леса, не подвергшихся воздействию пожара. Контрольные образцы отбирали для каждого слоя и типа почв.

**Исследование биологической активности почв.** Аналитические исследования были выполнены с использованием распространенных в почвоведении и биологии методов [10]. Определение активности каталазы почв (навеска почвы 1 г) основано на определении объема кислорода, выделяющегося при разложении 3%  $H_2O_2$ . Активность уреазы (навеска почвы 1 г) определяли по количеству аммонийного азота, образующегося при гидролизе 3% мочевины колориметрическим методом с реактивом Несслера. Активность инвертазы (навеска почвы 1 г) исследовали по изменению оптических свойств 3%-ного раствора сахарозы модифицированным колориметрическим методом с реактивом Феллинга. Активность фосфатазы (навеска почвы 1 г) определяли методом Табатабая и Бремнера [53], метод основан на учете фосфора при гидролизе *n*-нитрофенилфосфата натрия. Активность почвенных ферментов измеряли в водных растворах без использования буферов, как рекомендовано для целей биодиагностики [6, 10, 36]. Контролем абиотической реакции служили субстраты без почвы и субстрат с почвой, стерилизованной сухим жаром при 180°C в течение 3 ч. Значения контроля абиотической реакции вычитали

из фактических значений. Содержание органического углерода (навеска почвы 0.1 г) определяли по окисляемости хромовой смесью со спектрофотометрическим окончанием методом Тюрина в модификации Никитина [18]. Определение реакции почвенной среды (рН) проводили потенциометрическим методом (навеска почвы 10 г) при соотношении почва : вода 1 : 2.5 для коричневых почв, почва : солевая суспензия (1 М KCl) в соотношении 1 : 2.5 для бурозема.

**Статистическая обработка данных.** Для выявления структуры связи внутри набора наблюдаемых переменных проводили факторный анализ. Данные статистически обрабатывали с помощью пакета Statistica 13.3. При обсуждении результатов учитывали статистически достоверные различия с уровнями значимости 0.1–5% ( $p < 0.001, 0.01$  и  $0.05$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам проведенных исследований постпирогенных коричневых почв заповедника “Утриш” для слоя 0–3 см установлено ингибирование активности каталазы, инвертазы и уреазы в среднем на 73% по сравнению с контролем. Экзоферменты являются термолабильными веществами, их активность сохраняется при низких температурах и высушивании почвы [7, 34]. Однако при высоких температурах почвенные ферменты инактивируются. Даже спустя 10 лет активность почвенных ферментов отличается от контрольных значений [5]. Для активности фосфатазы, наоборот, отмечено стимулирование активности на 42% (рис. 2а, 2б, 2с коричневая почва). Фосфатазы продуцируются растениями при недостатке фосфора и ингибируются при повышении его доступности [14]. Снижение содержания фосфора, вероятно, может быть связано с его использованием травянистой растительностью. Полученные данные согласуются с результатами работы [46] при изучении влияния количества, типа и пространственной структуры растительности на изменение активности внеклеточных почвенных ферментов (фосфатазы и уреазы) в подверженных пожарам кустарниковых зарослях на востоке Испании. Установлено повышение активности уреазы в 1.5 и фосфатазы 1.7 в почвах на постпирогенных участках с произрастающей растительностью. В других работах также показано увеличение активности некоторых ферментов после пирогенного воздействия [39, 50].

Для слоя 0–3 см постпирогенного бурозема Республики Адыгея отмечено ингибирование активности каталазы, инвертазы и фосфатазы в среднем на 35% по сравнению с контрольными значениями (рис. 2а, 2с, 2d бурозем). На поверхности почвы исследуемого участка отмечали большое количество деревьев, упавших в результате ветровала,

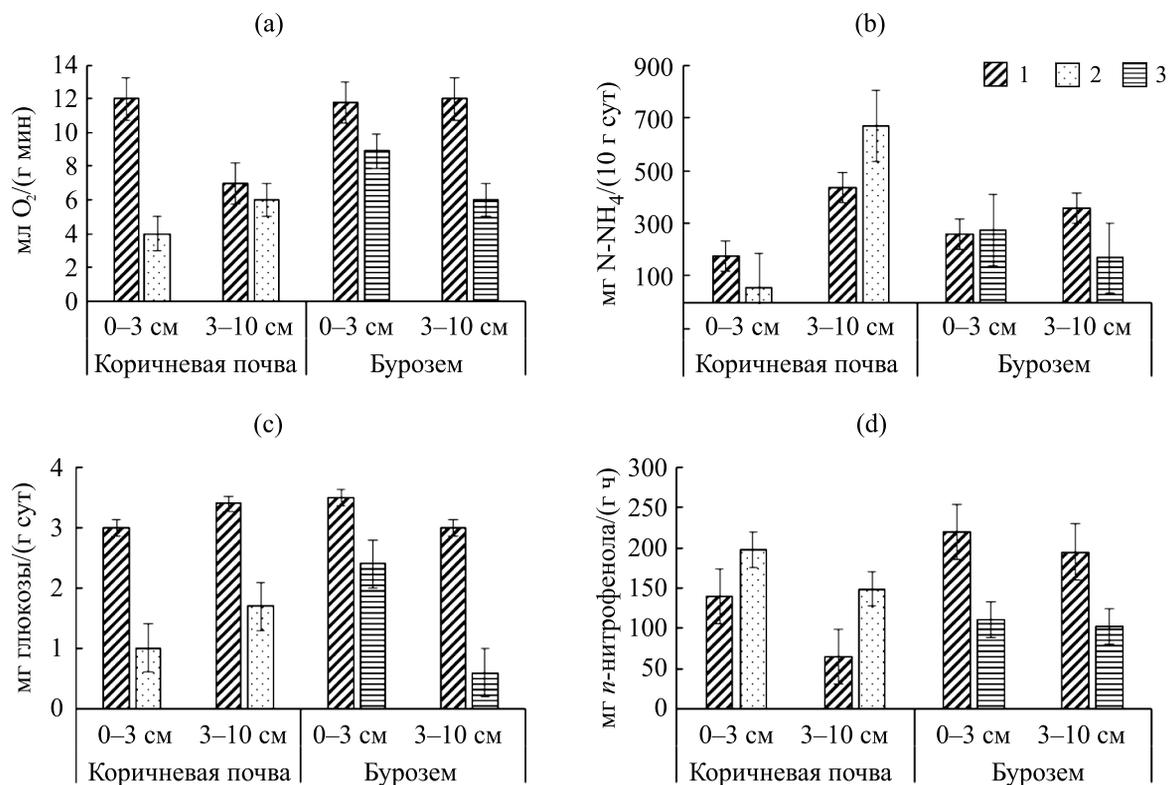


Рис. 2. Активность каталазы (а), уреазы (б), инвертазы (с), фосфатазы (д) коричневых почв и бурозема из слоев 0–3 и 3–10 см: 1 – контроль, 2 – постпирогенная коричневая почва, 3 – постпирогенный бурозем.

возникшего из-за ослабленной обгоревшей прикорневой зоны. В случае уреазы отмечено незначительное повышение активности (рис. 2b бурозем). Меньшую чувствительность активности уреазы постпирогенных почв по сравнению с активностью каталазы отмечали для черноземов в модельных экспериментах [21]. Повышение активности гидролаз можно объяснить бурным развитием травянисто-кустарниковой растительности на оголенных участках. В результате роста растительности активизируется дерновый процесс и повышается биологическая активность почв [41].

Установлено уменьшение содержания органического углерода для постпирогенных коричневых почв и бурозема в слое 0–3 см на 12% по сравнению с контрольными значениями (рис. 3а). Потеря органического вещества обусловлена повышенной скоростью смыва и отсутствием защитного действия деревьев и лесной подстилки в первый год после пожара. Следует отметить, что в результате неполного сгорания органического вещества образуется пирогенный углерод, который не может быть использован микроорганизмами. Изменилась реакция почвенной среды двух типов постпирогенных почв в слое 0–3 см в сторону повышения до 5.8 ед. для бурозема (рН контроля 4 ед.) и до 8 ед.

для коричневых почв (рН контроля 7 ед.) (рис. 3b). В результате лесных пожаров на поверхности почвы образуется уголь и зола, что обогащает почвы элементами питания и способствует снижению кислотности [12, 33].

Для слоя 3–10 см отмечено ингибирование активности каталазы и инвертазы в коричневой почве в среднем на 30% по сравнению с контрольными значениями (рис. 2а, 2с коричневые почвы), что в 1.6–1.7 раз превышает активность этих ферментов в слое 0–3 см. Активность уреазы и фосфатазы, наоборот, существенно выше контрольных значений на 92% (рис. 2b, 2d коричневые почвы). Активность уреазы в слое 3–10 см превышает в 2.6 раза активность этого фермента в слое 0–3 см. Некоторые исследователи отмечают восстановление активности уреазы до контрольных значений уже спустя год после пожара [35]. Активность фосфатазы снижена относительно поверхностного слоя в 1.3 раза по причинам, описанным ранее. При изучении ферментативной активности постпирогенного бурозема установлено ингибирование активности всех изученных ферментов по отношению к контролю в среднем на 59% (рис. 2а, 2b, 2с, 2d бурозем). При этом относительно поверхностного слоя отмечено снижение показателей в 1.6

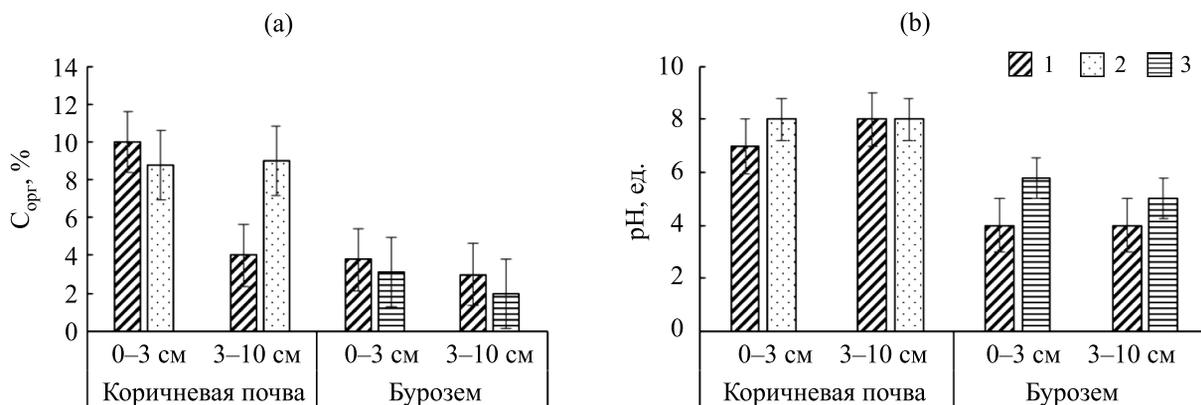


Рис. 3. Содержание органического углерода (а) и рН (б) коричневых почв и бурозема из слоев 0–3 и 3–10 см: 1 – контроль, 2 – постпирогенная коричневая почва, 3 – постпирогенный бурозем.

раз для каталазы и уреазы, в 4 раза для инвертазы, в 1.1 раза для фосфатазы.

Для слоя 0–10 см почв разных типов установлено различие постпирогенных изменений содержания органического углерода. После пирогенного воздействия на ранних стадиях сукцессии содержание органического углерода коричневых почв в слое 3–10 см увеличилось на 107%, в то время как для постпирогенного бурозема отмечено снижение на 34% (рис. 3а). Содержание органического углерода двух типов постпирогенных почв с глубиной достоверно не изменилось. Другими исследователями также выявлена тенденция к увеличению запасов углерода в минеральном горизонте на более поздних сроках постпирогенного восстановления [15]. Значения рН для коричневых почв достоверно не изменились, а для бурозема отмечено повышение на 26% (рис. 3б). Увеличение значений рН с глубиной связано с миграцией продуктов горения вниз по профилю почвы, что снижает кислотность. В литературных данных можно встретить информацию о накоплении органического углерода как в постпирогенных [28, 54], так и в минеральных горизонтах [15, 17, 24].

Интересна выявленная инверсия для активности каталазы постпирогенных коричневых почв. Под инверсией понимаем явление изменения профильного распределения биологической активности, т.е. в нижних слоях почвы активность выше, чем в верхних. Однако наблюдаемая инверсия мнима: в результате пожара поверхностный слой подвергается более жесткому пирогенному воздействию, при котором ферментативная активность инактивируется, в то время как в нижнем слое сохраняется исходные значения показателя. По этой причине спустя годы после пожара ферментативная активность поверхностного слоя гораздо меньше, чем нижележащих слоев. Для других ферментов изменения с глубиной совпадают

с аналогичными для контроля. Предыдущими исследованиями установлено влияние пирогенного фактора на поверхностный слой почвы 3–5 см, с глубиной отмечена инверсия ферментативной активности [39]. Для бурозема с глубиной установлено снижение исследуемых показателей. Под лесным опадом для верхнего слоя бурозема создаются благоприятные гидротермические условия, а промывной тип водного режима обуславливает снижение биологической активности уже в слое 3–10 см [4, 23]. В коричневых почвах характер профильного распределения биологической активности снижается плавно, а в буроземах более резко по типично лесному типу профильного изменения гумуса и биологической активности [4, 11].

Представлены графики факторных координат для изученных показателей в слое 0–3 см для коричневых почв (рис. 4а) и бурозема (рис. 4б). Так как данный анализ основан на корреляциях, значения координаты не превышают 1.0. Все переменные расположены близко к линии единичной окружности, особенно каталаза, фосфатаза, инвертаза и рН, следовательно, можно сделать вывод, что в системе найденных координат они воспроизводятся хорошо (рис. 4а). При этом факторы 1 и 2 объясняют 71% общей дисперсии. Видно, что с увеличением значений реакции почвенной среды увеличивается активность таких ферментов, как каталаза, инвертаза и фосфатаза. При этом для уреазы связь полностью противоположна.

На рис. 4б все исследуемые показатели, кроме  $C_{орг}$ , хорошо воспроизводимы в системе координат. Факторы 1 и 2 объясняют 84% общей дисперсии. Для бурозема отмечена значительная положительная корреляционная связь между рН и активностью каталазы, а также значительная отрицательная корреляционная связь между активностью инвертазы. Тесная взаимосвязь установлена между активностью уреазы и содержанием органического углерода.

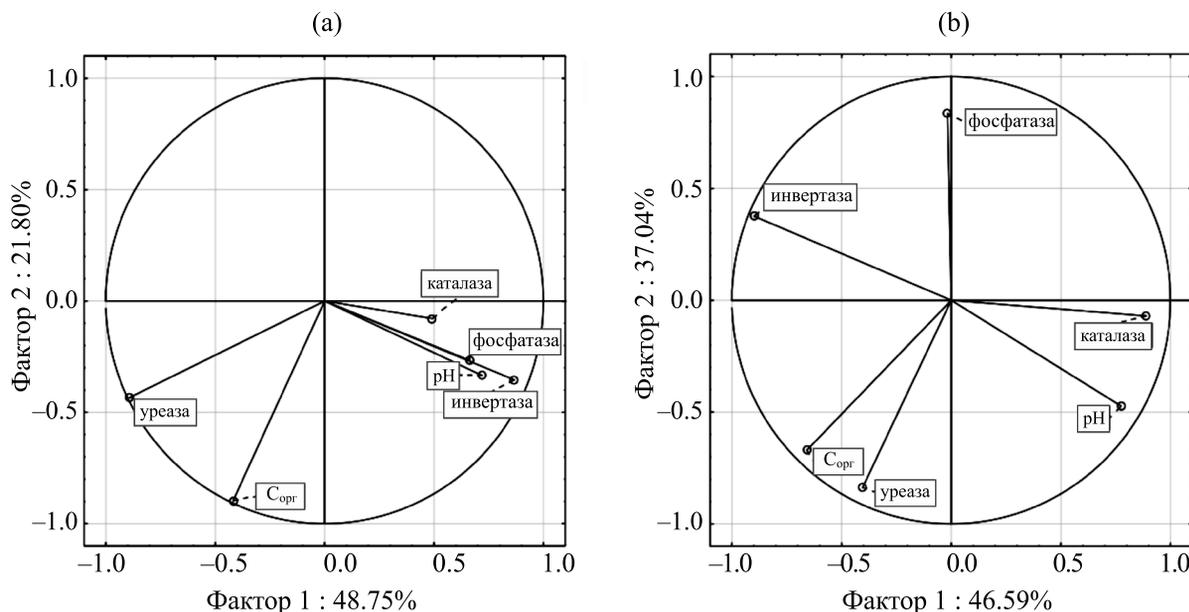


Рис. 4. Проекция переменных на факторную плоскость на основе корреляций для постпирогенных коричневых почв (а) и бурозема (б) из слоя 0–3 см.

Ферменты могут закрепляться в почве, создавая ферментогумусовые комплексы с гуминовыми кислотами почв, при этом активность фермента сохраняется и становится защищенной от действия протеаз микроорганизмами [27, 32]. В других работах установлен подавляющий эффект гуминовых кислот на активность почвенных ферментов [47].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В первые годы после пожара для ксерофитных и мезофитных лесов установлены значительные изменения активности ферментов коричневой почвы и бурозема. В ходе сукцессии на ранее оголенных участках появилась травянистая растительность, что сказывается на ферментативной активности почв. Эдафические различия обуславливают выявленные изменения активности почвенных ферментов на пирогенное воздействие, что подтверждают результаты факторного анализа. Реакция почвенной среды и содержание органического углерода имеют наиболее явные и существенные отличия изученных почв между собой. Установлено снижение активности каталазы и инвертазы поверхностного слоя для двух типов постпирогенных почв, в то время как реакция фосфатазы и уреазы меняется в зависимости от типа почв.

Активность ферментов в поверхностном слое постпирогенных коричневых почв приближается к контрольным значениям, но не достигает их, в ряду: фосфатаза > каталаза = инвертаза > уреазы, а для бурозема: уреазы > каталаза > инвертаза > фосфатаза.

Полученные данные могут быть использованы при оценке степени повреждения почв после

пожаров, а также при моделировании лесных пожаров, что в дальнейшем позволит прогнозировать реакцию экосистем на пирогенное воздействие.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам ФГБУ Государственный заповедник “Утриш” и Хамышинского лесничества за предоставленную возможность и помощь при проведении полевых исследований. Отдельная благодарность научному сотруднику Института географии РАН Е.А. Грабенко за помощь при описании растительности изучаемых участков на территории Хамышинского лесничества.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Дополнительная информация включает фотографии изученных участков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александрова А.М.* Степень изученности почв в заповеднике “Бастак” и перспективы их исследования // Региональные проблемы. 2019. № 4. С. 62–68.
2. *Богданович А.Ю., Липка О.Н., Крыленко М.В., Андреева А.П., Добролюбова К.О.* Климатические угрозы на Северо-Западе Черноморского побережья Кавказа: современные тренды // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. № 4. С. 46–72.
3. *Бочарников М.В.* Фитоценотическое разнообразие и пространственная структура растительного покрова Водопадной щели (заповедник “Утриш”) // Наземные и морские экосистемы полуострова Абрау: история, состояние, охрана. 2021. С. 69–78.
4. *Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И.* Почвы Юга России. Ростов-на-Дону: Эверест, 2008. 276 с.
5. *Вилкова В.В., Казеев К.Ш., Шабунина В.В., Колесников С.И.* Ферментативная активность постпирогенных почв заповедника “Утриш” // Бюл. ГНБС. 2021. № 138. С. 71–77. <https://doi.org/10.36305/0513-1634-2021-138-71-77>
6. *Галстян А.Ш.* Унификация методов исследования активности ферментов почв // Почвоведение. 1978. № 2. С. 107–114.
7. *Галстян А.Ш.* Об устойчивости ферментов почв // Почвоведение. 1982. № 4. С. 108–110.
8. *Гераськина А.П., Тебенькова Д.Н., Ершов Д.В., Ручинская Е.В., Сибирицева Н.В., Лукина Н.В.* Пожары как фактор утраты биоразнообразия и функций лесных экосистем // Вопросы лесной науки. 2021. № 2. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202142-11>
9. *Дымов А.А., Дубровский Ю.А., Габов Д.Н.* Пирогенные изменения подзолов иллювиально-железистых (средняя тайга, Республика Коми) // Почвоведение. 2014. № 2. С. 144–154. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14020051>
10. *Дутов А.А., Dubrovsky Yu.A., Gabov D.N.* Pyrogenic Changes in Iron-Illuvial Podzols in the Middle Taiga of the Komi Republic // Eurasian Soil Science. 2014. V. 47. № 2. P. 47–56. <https://doi.org/10.1134/S1064229314020045>
11. *Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В.* Методы диагностики наземных экосистем. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2016. 356 с.
12. *Казеев К.Ш., Колесников С.И., Быхалова О.Н.* Коричневые почвы заповедника “Утриш” // Биоразнообразие государственного природного заповедника “Утриш”. 2013. С. 154–163.
13. *Краснощечков Ю.Н.* Влияние пирогенного фактора на серогумусовые почвы сосновых лесов в Центральной экологической зоне Байкальской природной территории // Сибирский лесной журнал. 2014. № 2. С. 43–52.
14. *Кузнецова Е.И.* Можжевельниковые леса и редколесья полуострова Абрау (Северо-Западный Кавказ) // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, география. 2009. № 2. С. 76–80.
15. *Макаров М.И., Леошкина Н.А.* Фосфор фульватной фракции органического вещества почв // Почвоведение. 2009. № 3. С. 301–308.
16. *Маслов М.Н., Маслова О.А., Копейна Е.И.* Динамика общего и лабильного пулов органического углерода почв при постпирогенной сукцессии экосистем горной тундры Хибин // Почвоведение. 2020. № 3. С. 330–339. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20030041>
17. *Maslov M.N., Maslova O.A., Kopeina E.I.* Changes in the Pools of Total and Labile Soil Organic Carbon during Post-Fire Succession in the Khibiny Mountain Tundra Ecosystems // Eurasian Soil Science. 2020. V. 53. № 3. P. 330–338. <https://doi.org/10.1134/S1064229320030047>
18. *Медведева М.В., Бахмет О.Н., Ананьев В.А., Мошников С.А., Мамай А.В., Мошкина Е.В., Тимофеева В.В.* Изменение биологической активности почв в хвойных насаждениях после пожара в средней тайге Карелии // Лесоведение. 2020. № 6. С. 560–574. <https://doi.org/10.31857/S0024114820060066>
19. *Мергелов Н.С.* Постпирогенная трансформация почв и запасов почвенного углерода в предтундровых редколесьях Колымской низменности: каскадный эффект и обратные связи // Известия РАН. Сер. Географическая. 2015. № 3. С. 129–140. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2015-3-129-140>
20. *Никитин Б.А.* Методика определения содержания гумуса в почве // Агрохимия. 1972. № 3. С. 123–125.
21. *Омарова П.К., Асадулаев З.М.* Постпирогенная динамика растительности буково-тисового леса предгорного Дагестана // Лесоведение. 2016. № 3. С. 209–215.
22. *Петрушина М.Н., Сулова Е.Г.* Постпирогенная динамика субсредиземноморских ландшафтов полуострова Абрау // Природа и общество: интеграционные процессы. 2022. С. 233–238.
23. *Приходько В.Д., Казеев К.Ш., Вилкова В.В., Нижельский М.С., Колесников С.И.* Изменение активности ферментов в постпирогенных почвах (физический модельный эксперимент) // Почвоведение. 2023. № 1. С. 118–128. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22600743>

24. *Prikhodko V.D., Kazeev K.Sh., Vilkoval V.V., Nizhelskiy M.S., Kolesnikov S.I.* Changes in Enzyme Activity in Postpyrogenic Soils (Physical Model Experiment) // *Eurasian Soil Science*. 2023. V. 56. № 1. P. 101–109. <https://doi.org/10.1134/S1064229322601640>
25. *Соколова Г.В.* Влияние лесных пожаров на погоду // *Известия ВУЗов. Лесной журнал*. 2006. № 6. С. 128–131.
26. *Ставрова Н.И., Калимова И.Б., Горшков В.В., Дроздова И.В., Алексеева-Попова Н.В., Баккал И.Ю.* Долговременные послепожарные изменения характеристик почв в темнохвойных лесах европейского Севера // *Почвоведение*. 2019. № 2. С. 246–256. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19020138>
27. *Stavrova N.I., Kalimova I.B., Gorshkov V.V., Drozdova I.V., Alekseeva-Popova N.V., Bakkaal I.Yu.* Long-Term Postfire Changes of Soil Characteristics in Dark Coniferous Forests of the European North // *Eurasian Soil Science*. 2019. V. 52. № 2. P. 218–227. <https://doi.org/10.1134/S1064229319020133>
28. *Старцев В.В., Дымов А.А., Прокушкин А.С.* Почвы постпирогенных лиственничников средней Сибири: морфология, физико-химические свойства и особенности почвенного органического вещества // *Почвоведение*. 2017. № 8. С. 912–925. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17080111>
29. *Startsev V.V., Dymov A.A., Prokushkin A.S.* Soils of Postpyrogenic Larch Stands in Central Siberia: Morphology, Physicochemical Properties, and Specificity of Soil Organic Matter // *Eurasian Soil Science*. 2017. V. 50. № 8. P. 885–897. <https://doi.org/10.1134/S1064229317080117>
30. *Тих И.П., Агиров А.Х.* Ферментативная активность различных типов почв лесостепного пояса в условиях западного Кавказа // *Новые технологии*. 2009. № 4. С. 63–67.
31. *Ткаченко Ю.Ю., Денисов В.И.* Климат // Государственный природный заповедник “Утриш”. 2013. С. 32–37.
32. *Хазиев Ф.Х.* Экологические связи ферментативной активности почв // *Экобиотех*. 2018. Т. 1. С. 80–92.
33. *Цибарт А.С., Геннадиев А.Н.* Влияние пожаров на свойства лесных почв Приамурья (Норский заповедник) // *Почвоведение*. 2008. № 7. С. 783–792.
34. *Acosta-Martinez V., Cano A., Johnson J.* Simultaneous determination of multiple soil enzyme activities for soil health-biogeochemical indices // *Applied Soil Ecology*. 2018. V.126. P. 121–128. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.11.024>
35. *Baltzer J.L., Day N.J., Walker X.J., Greene D., Mack M.C., Heather D.A.* Increasing fire and the decline of fire adapted black spruce in the boreal forest // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2021. V. 118 (45). <https://doi.org/10.1073/pnas.2024872118>
36. *Barreiro A., Díaz-Raviña M.* Fire impacts on soil microorganisms: Mass, activity, and diversity // *Current Opinion in Environmental Science & Health*. 2021. V. 22. P. 100–264. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100264>
37. *Bastida F., Jindo K., Moreno J., Hernández T., Garcia C.* Effects of organic amendments on soil carbon fractions, enzyme activity and humus–enzyme complexes under semi-arid conditions // *European Journal of Soil Biology*. 2012. V. 53. P. 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2012.09.003>
38. *Caon L., Vallejo R., Ritsema C., Geissen V.* Effects of wildfire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems // *Earth-Science Reviews*. 2014. V. 139. P. 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.09.001>
39. *Dadenko E.V., Kazeev K. Sh., Kolesnikov S.I., Val'kov V.F.* Changes in the Enzymatic Activity of Soil Samples upon Their Storage // *Eurasian Soil Science*. 2009. V. 42 (12). P. 1380–1385. <https://doi.org/10.1134/S1064229309120084>
40. *Gabbasova I.M., Garipov T.T., Komissarov M.A. Suleimanov R., Suyundukov Ya.T., Khasanova R.F., Sidорова L.V., Komissarov A.V., Suleymanov A., Nazyrova F.I.* The Impact of Fires on the Properties of Steppe Soils in the Trans-Ural Region // *Eurasian Soil Science*. 2019. V. 52. P. 1598–1607. <https://doi.org/10.1134/S1064229319120044>
41. *German D.P., Weintraub M.N., Grandy A.S., Lauber C.L., Rinkes Z.L., Allison S.D.* Optimization of hydrolytic and oxidative enzyme methods for ecosystem studies // *Soil Biology and Biochemistry*. 2011. V. 43. P. 1387–1397.
42. *Hagmann R.K., Hessburg P.F., Prichard S.J., Povak N.A., Brown P., Fulé P.Z., Keane R., Knapp E., et al.* Evidence for widespread changes in the structure, composition, and fire regimes of western North American forests // *Ecological Applications*. 2021. V. 31. P. e02431. <https://doi.org/10.1002/eap.2431>
43. *Kazeev K. Sh., Odobashyan M. Yu., Trushkov A.V., Kolesnikov S.I.* Assessment of the Influence of Pyrogenic Factors on the Biological Properties of Chernozems // *Eurasian Soil Science*. 2020. V. 53(11). P. 1610–1619. <https://doi.org/10.1134/S106422932011006X>
44. *Kazeev K. Sh., Poltoratskaya T.A., Yakimova A.S., Odobashyan M. Yu., Shkhatpatsev A.K., Kolesnikov S.I.* Post-fire changes in the biological properties of the brown soils in the Utrish State Nature Reserve (Russia) // *Nature Conservation Research*. 2019. V. 4. P. 93–104. <https://doi.org/10.24189/ncr.2019.055>

45. Kazeev K. Sh., Vilкова V.V., Shkapatsev A., Bykhalova O., Rudenok Y., Nizhelskiy M.S., Kolesnikov S., Minkina T., Sushkova S., Mandzhieva S., Rajput V.D. Consequences of the catastrophic wildfire in 2020 for the soil cover of the Utrish State Nature Reserve // *Sains Tanah – J. Soil Science and Agroclimatology*. 2022. V. 19(1). P. 52–59. <https://doi.org/10.20961/stjssa.v19i1.58709>
46. Kazeev K. Sh., Soldatov V.P., Shkapatsev A.K., Shevchenko N.Y., Grabenko Y.A., Yermolaeva O. Yu., Kolesnikov S.I. Changes in the Properties of Calcareous Soils after Clearcutting in the Coniferous-Deciduous Forests of the Northwestern Caucasus // *Rus. J. Forest Sci.* 2021. V. 4(4). P. 426–436. <https://doi.org/10.31857/S0024114821040069>
47. Kooch Y., Ehsani S., Akbarinia M. Stoichiometry of microbial indicators shows clearly more soil responses to land cover changes than absolute microbial activities // *Ecol. Eng.* 2019. V. 131. P. 99–106. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.03.009>
48. Köster K., Aaltonen H., Berninger F., Heinonsalo J., Köster E., Ribeiro-Kumara C., Sun H., Tedersoo L., Zhou X., Pumpanen J. Impacts of wildfire on soil microbiome in Boreal environments // *Current Opinion in Environmental Science Health*. 2021. V. 22. P. 100258. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100258>
49. Lombao A., Barreiro A., Fonturbel M.T., Martin A., Carballas T., Díaz-Raviña M. Effect of repeated soil heating at different temperatures on microbial activity in two burned soils // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 799. P. 149440. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149440>
50. Ma W., Li G., Wu J., Xu G., Wu J. Response of soil labile organic carbon fractions and carbon-cycle enzyme activities to vegetation degradation in a wet meadow on the Qinghai–Tibet Plateau // *Geoderma*. 2020. V. 377. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114565>
51. Mayor A.G., Goiran S.B., Vallejo V.R., Bautista S. Variation in soil enzyme activity as a function of vegetation amount, type, and spatial structure in fire-prone Mediterranean shrublands // *Sci. Total Environ.* 2016. V. 573. P. 1209–1216. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.139>
52. McLaren A. D., Pukite A.H., Barshad I. Isolation of humus with enzymatic activity from soil // *Soil Sci.* 1975. V. 119 (2). P. 178–180.
53. Nizhelskiy M.S., Kazeev K. Sh., Vilкова V.V., Kolesnikov S.I. Inhibition of enzymatic activity of ordinary chernozem by gaseous products of plant matter combustion // *Eurasian Soil Science*. 2022 V. 55. P. 802–809. <https://doi.org/10.1134/S1064229322060096>
54. Raiesi F., Beheshti A. Microbiological indicators of soil quality and degradation following conversion of native forests to continuous croplands // *Ecological Indicators*. 2015. V. 50. P. 173–185. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.11.008>
55. Raiesi F., Pejman M. Assessment of post-wildfire soil quality and its recovery in semi-arid upland rangelands in Central Iran through selecting the minimum data set and quantitative soil quality index // *Catena*. 2021. V. 201. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105202>
56. Singh D., Sharma P., Kumar U., Daverey A., Arunachalam K. Effect of forest fire on soil microbial biomass and enzymatic activity in oak and pine forests of Uttarakhand Himalaya, India // *Ecological Processes*. 2021. V. 10. <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00293-6>
57. Sinsabaugh R.L., Lauber C.L., Weintraub M.N., Ahmed B., Allison S.D., Crenshaw C., Contosta A.R. et al. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale // *Ecology Letters*. 2008. V. 11. P. 1252–1264. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01245.x>
58. Tabatabai M.A. Soil Enzymes // *Methods Soil Analysis Part 2: Microbiology Biochemistry Properties*. 1994. V. 5. P. 775–833. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106362>
59. Vilкова V.V., Kazeev K.S., Kolesnikov S.I., Shkapatsev A.K. 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. V. 1. P. 93–98. <https://doi.org/10.1134/S2079096122010139>
60. WRB IUSS. World Reference Base for Soil Resources 2014 // *World Soil Resources Reports*. 2015. V. 106. P. 192.

## **Influence of Fires on the Enzymatic Activity of Brown Soils and Burozems of the Western Caucasus**

**V. V. Vilкова<sup>1, \*</sup>, K. Sh. Kazeev<sup>1</sup>, M. S. Nizhelskiy<sup>1</sup>, D. A. Privizentseva<sup>1</sup>,  
A. N. Fedorenko<sup>1</sup>, S. I. Kolesnikov<sup>1</sup>, and A. K. Shkhatpatsev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090 Russia*

<sup>2</sup>*Maikop State Technological University, Maikop, 385000 Russia*

*\*e-mail: lera.vilkova.00@mail.ru*

The results of studying the effect of fires on the biological properties of brown soils of xerophytic forests (Skeletal Leptic Cambisol) of the Utrish State Nature Reserve, Krasnodar Territory (crown fire of 2020), and burozem of mesophytic forests (Haplic Cambisol (Loamic)) of the Khamyshinsky forestry, Republic of Adygea (ground fire of 2018) are presented. Changes in the reaction of the soil environment, the content of organic carbon, and the activity of such enzymes as catalase, urease, phosphatase, and invertase involved in the cycle of carbon, phosphorus, and nitrogen have been studied. The reaction of enzymes to pyrogenic effects depends on the type of enzyme and the type of soil. A factor analysis was also carried out. The activity of catalase and invertase for two types of soils in a layer of 0–3 cm decreased by an average of 47%, while the reaction of phosphatase and urease differed depending on the soil type. Two years after the fire, the phosphatase activity of the surface layer of post-pyrogenic brown soils approached the control values; urease activity recovered more slowly compared to other enzymes. Four years after the fire, in the 0–3 cm layer, for the post-pyrogenic acid burozem, on the contrary, the values of urease activity approached the control values. An increase in pH values by an average of 30% and a decrease in the content of C<sub>org</sub> by an average of 12% were also established for two types of soils. In the 3–10 cm layer, for brown soils, an average increase in the activity of all the studied enzymes was noted, while for acid burozem, on the contrary, a decrease. Factor analysis showed the presence of a relationship between the reaction of the soil environment, the content of organic carbon and the activity of enzymes, while the tightness and nature of the relationship differed depending on the type of soil. The results obtained indicate the influence of the edaphic features of the studied soils on the response of enzymatic activity to pyrogenic exposure.

*Keywords:* pyrogenic factor, biodiagnostics, soil enzymes, oxidases, hydrolases