

УДК 631.46:574.4:630\*43

## ПОСЛЕДСТВИЯ ПОЖАРА ДЛЯ ПОЧВ МЕЗОФИТНЫХ ЛЕСОВ ЗАПАДНОГО КAVКАЗА<sup>1</sup>

© 2025 г. В. В. Вилкова<sup>а, \*</sup>, К. Ш. Казеев<sup>а</sup>, М. С. Нижельский<sup>а</sup>, Е. А. Грабенко<sup>б, с</sup>,  
О. Ю. Ермолаева<sup>а</sup>, С. И. Колесников<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Южный федеральный университет, просп. Стачки, д. 194/1, Ростов-на-Дону, 344090 Россия

<sup>б</sup>Институт географии РАН, Старомонетный пер., д. 29, Москва, 119017 Россия

<sup>с</sup>Адыгейский государственный университет, ул. Первомайская, д. 208, Майкоп, 385000 Россия

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

Поступила в редакцию 08.02.2024 г.

После доработки 23.04.2024 г.

Принята к публикации 15.11.2024 г.

Ежегодно по всему миру в результате пожаров сгорают обширные территории лесов. В литературе имеются противоречивые данные о последствиях влияния пожаров на отдельные компоненты экосистем, в частности на почвы. Это обуславливает необходимость проведения исследований последствий пожаров в разных климатических и почвенных условиях. Цель работы — изучить последствия влияния низового пожара на свойства бурозема Хамышинского участкового лесничества Республики Адыгеи спустя 4 года после воздействия. Изучены химические (сумма поглощенных оснований, гидролитическая кислотность, рН, содержание органического углерода и активного углерода) и биологические (активность каталазы, дегидрогеназ, инвертазы, уреазы, фосфатазы) свойства постпирогенных почв одного участка гари и двух участков горельников. Низовой пожар не вызвал значительных изменений в составе древостоя для участков гари № 2 (1159 м над ур. м.) и № 3 (1359 м над ур. м.), в то время как на участке гари № 1 (651 м над ур. м.) отмечены полностью обугленное дерево, обильное разрастание **рододендрона понтийского** и слабо развитая травянистая растительность. Установлено снижение активности каталазы трех участков на 51% относительно контроля. Активность дегидрогеназ и уреазы постпирогенных почв превышает контрольные значения в среднем на 62%. Активность инвертазы и фосфатазы отличается в зависимости от участка исследования. В целом отмечена тенденция к повышению активности данных ферментов. При этом обнаружено высокое пространственное варьирование активности дегидрогеназ и инвертазы почв для участка гари № 1. Установлено повышение гидролитической кислотности в среднем на 43% относительно контрольных значений. Сумма поглощенных оснований, содержание органического и активного углерода спустя 4 года после пожара в меньшей степени отличаются от контрольных значений. Показатель кислотности (рН) участка, лишенного травянистой растительности, достигает 5.8 ед., при контрольных значениях — 4 ед. При этом более высоким значениям реакции почвенной среды соответствуют более высокие значения суммы поглощенных оснований. Факторный анализ показал, что изменения ферментативной активности постпирогенного бурозема связаны с особенностями химических свойств почв. Активность гидролаз (уреаза, фосфатаза) тесно связана с содержанием органического углерода, а активность остальных ферментов — с суммой поглощенных оснований, гидролитической кислотностью и значениями рН. Содержание активного углерода изменяется незначительно и не оказывает влияния на ферментативную активность.

*Ключевые слова:* пирогенный фактор, ферментативная активность, химические свойства, бурозем, биоиндикация.

DOI: 10.31857/S0024114825010019 EDN: EDZGDK

<sup>1</sup>Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (№ FENW-2023-0008).

Интенсивность распространения лесных пожаров существенно увеличилась за последние десятилетия. В 2023 г., по данным ФБУ «Авиалесоохрана», только на территории России площадь,

пройденная огнем, составила 11,8 млн га. Леса являются самым большим стоком углерода среди экосистем суши (Sitch et al., 2008). Во время лесных пожаров в атмосферу в большом количестве попадает диоксид углерода, который вносит основной вклад в повышение концентрации парниковых газов, что в свою очередь приводит к изменению климата (Sommers et al., 2014; Oertel et al., 2016; Кухар и др., 2019; Mansoor et al., 2022). Дальнейшее увеличение объемов выбросов парниковых газов может заставить рассматривать леса не как поглотитель углерода, а как его источник (Швиденко, Щепашенко, 2014; Ponomarev et al., 2023; Fan et al., 2023). На территории Западного Кавказа наиболее уязвимы к пожарам ксерофитные леса Черноморского побережья (Kazeev et al., 2019; Vilkova et al., 2022; Вилкова и др., 2023), в то время как в мезофитных лесах пожарные риски ниже (Baltzer et al., 2021; Богданович и др., 2021).

Почва — один из наиболее ценных природных ресурсов, участвующих в круговороте питательных веществ. Деградация биологических, химических и физических свойств лесных почв, причиной которой становятся пожары, снижает их способность полноценно выполнять экологические функции. Так, при исследовании свойств постпирогенных почв отмечают изменения запаса углерода (Akburak et al., 2018), значений реакции почвенной среды (Francos et al., 2019; Hinojosa et al., 2021), суммы обменных оснований (Гынинова и др., 2018), гидролитической кислотности (Красношеков, 2018; Горбунова, Девятова, 2019) и ферментативной активности (Kazeev et al., 2019; Vilkova et al., 2022; Вилкова и др., 2023). При этом характер изменений во многом зависит от вида пожара, его длительности и интенсивности, а также от особенностей рельефа местности, типа растительности и изначальных свойств почв (Сапожников и др., 2001; Шарагин, 2011; Alcañiz et al., 2018; Lucas-Borja et al., 2020; Vilkova et al., 2024). Стоит отметить, что пожар является комплексным фактором, поэтому на качество почвы существенное воздействие оказывает не только термический фактор, но и дым (Нижельский и др., 2022).

Несмотря на большое количество исследований по данной тематике, существуют противоречивые результаты по оценке послепожарных изменений, к тому же все еще актуальными являются вопросы оценки влияния пожаров на почвы разных лесных зон. Цель настоящей работы — оценить последствия влияния низового пожара на свойства буроземов Западного Кавказа спустя 4 года после пирогенного воздействия.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Объекты исследования находятся на территории Хамышинского участкового лесничества

(Республика Адыгея). Данная территория относится к Западной горной провинции Большого Кавказа. Среднегодовое количество осадков составляет 1200 мм, среднегодовая температура +10,3°C. Лесной пояс северного макросклона представлен мезофитными широколиственными (буковые, дубово-грабовые) и темнохвойными (преимущественно буково-пихтовые) лесами (Акатов, 2014, 2018; Акатов и др., 1990; Литвинская, 2020). Почвенный покров сформирован бурыми лесными почвами, Cambisols (WRB, 2014), подстилка маломощная. На данной территории наиболее изученными являются почвы сукцессий после рубок леса (Лукина и др., 2018; Шевченко и др., 2019; Казеев и др., 2021; Шхапацев и др., 2022), в то время как послепожарные сукцессии остаются малоизученными.

В июне 2022 г. в результате полевых исследований на территории Хамышинского участкового лесничества были заложены 3 мониторинговые площадки, пострадавшие от пожара в 2018 г. Низовой пожар не вызвал значительных изменений в составе древостоя на участках горельников № 2, 3; на этих участках уничтожена лесная подстилка, обуглены нижние части стволов деревьев до 15 см. При этом участок гари № 1 пострадал в большей степени, здесь отмечены полностью обугленные деревья. На платообразном участке № 1 в окружении плотных зарослей из подроста ольхи клейкой (*Alnus glutinosa* L.) (до 4–5 м) с участием клена красивого (*Acer laetum* C.A. Mey) и рододендрона понтийского (*Rhododendron ponticum* L.) растительность представлена пихтово-буковым лесом с подлеском из реликтового кустарника. Основу первого древесного яруса А (до 50 м) составляет пихта кавказская (*Abies nordmanniana* (Steven) Spach), ей содоминирует бук восточный (*Fagus orientalis* Lipsky). Формула древостоя — 6Пх4Бк. Второй древесный ярус В выражен плохо, в его составе изредка отмечены те же древесные породы: пихта кавказская и бук восточный. Кустарниковый ярус С выражен умеренно (до 30–40%). Его основу составляет рододендрон понтийский, единично отмечены рододендрон желтый (*Rhododendron luteum* Sweet), черника кавказская (*Vaccinium arctostaphylos* L.). В составе кустарникового яруса также обычен подрост древесных пород: пихты кавказской, ольхи клейкой, клена красивого, клена остролистного (*Acer platanoides* L.), бука восточного, липы (*Tilia begonifolia* Stev.), единично отмечен подрост сосны крючковатой (*Pinus sylvestris* L. subsp. *hamata*). Травянистый покров развит слабо (до 30%), в основном на более открытых участках площадки. Его основу составляет овсяница горная (*Festuca drymeja* Mert. & W.D.J. Koch), рассеянно отмечены овсяница гигантская (*Festuca gigantea* (L.) Vill.), козлятник восточный (*Galega orientalis* Lam.), чина золотистая (*Lathyrus aureus* (Steven) Barandza).

В качестве контроля был выбран участок леса, не затронутый влиянием пирогенного фактора. Тип леса, как и тип почвы всех трех участков и контроля, схож: лес — пихтово-буково-грабовый, почва — бурозем (Cambisols). Некоторые различия в растительности отмечены только на участке гари № 1, так как данный участок пострадал от

пирогенного воздействия в большей степени, травянистый покров все еще слабо развит. Местоположение и описание исследуемых участков представлены на рис. 1, в табл. 1.

Площадки для отбора образцов закладывали случайно в трехкратной повторности для каждого исследуемого мониторингового участка. Образцы



Рис. 1. Местоположение исследуемых участков на территории Хамышинского лесничества (Республика Адыгея): 1 — контроль; 2 — гарь № 1; 3 — горельник № 2; 4 — горельник № 3.

Таблица 1. Описание исследуемых участков на территории Хамышинского участкового лесничества, Республика Адыгея

Участок	Географические координаты	Высота над уровнем моря, м	Крутизна склона, экспозиция	Растительность
Контроль	N 44°04.165', E 040°10.954'	932	3° Ю	Мертвопокровный лес, <i>Fagus orientalis</i> Lipsky, <i>Carpinus betulus</i> L., <i>Tilia begoniifolia</i> Stev.
Гарь № 1	N 44°03.466', E 040°10.600'	651	24° ЮЗ	Редина, разрастание <i>Rhododendron ponticum</i> L., встречается <i>Vaccinium arctostaphylos</i> L., редкий подрост <i>Alnus glutinosa</i> L., травянистый покров развит слабо
Горельник № 2	N 44°06.272', E 040°10.470'	1159	3° Ю	<i>Betula pubescens</i> Ehrh., <i>Fagus orientalis</i> Lipsky. Травянисто-кустарниковая растительность представлена <i>Rubus</i> sp., <i>Sambucus</i> sp., подрост <i>Alnus glutinosa</i> L., злаковое разнотравье
Горельник № 3	N 44°05.692', E 040°12.044'	1359	10° З	Редина, разрастание <i>Rubus</i> sp., подрост <i>Carpinus betulus</i> L., <i>Alnus glutinosa</i> L., высотой до 0.5 м, <i>Abies nordmanniana</i> (Steven) Spach, <i>Fagus orientalis</i> Lipsky



почв отбирали по почвенному профилю, но основное внимание уделили слою 0–3 см в трехкратной повторности для каждой исследуемой мониторинговой площадки. По литературным данным, пирогенному воздействию подвержен только поверхностный слой почвы (Kazeev et al., 2020; Медведева и др., 2020). Почву высушивали в тени на воздухе, отбирали органические остатки и включения, перетирали и просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм. Исследования ферментативной активности почв проводили в первые 2 недели после отбора проб, почву хранили в воздушно-сухом состоянии при комнатной температуре.

Аналитические исследования были выполнены с использованием распространенных в почвоведении и биологии методов (Казеев и др., 2016). Активность каталазы почв определяли по объему выделившегося кислорода при разложении 3% перекиси водорода. Активность уреазы определяли по количеству аммонийного азота, образующегося при гидролизе 3% мочевины колориметрическим методом с реактивом Несслера, активность инвертазы – модифицированным колориметрическим методом с реактивом Фелинга. Активность фосфатазы определена колориметрическим методом на учете фосфора, образующегося при гидролизе п-нитрофенилфосфата натрия. Активность почвенных ферментов измеряли в водных растворах без использования буферов, как рекомендовано для целей биодиагностики (Галстян и др., 1978; Казеев и др., 2016), навеска почвы для каждого исследуемого фермента составила 1 г. Содержание органического углерода (навеска почвы 0.1 г) определяли по окисляемости хромовой смесью со спектрофотометрическим окончанием методом И.В. Тюрина в модификации Б.А. Никитина (1972). Активный углерод (подвижный гумус) определяли модифицированным методом Блейра с обработкой почвы (навеска 2.5 г) 0.1 н раствором перманганата калия, что дает представление о содержании наиболее легкоокисляемых веществ, доступных для микроорганизмов (Blair et al., 1995; Moebius-Clune et al., 2016). Определение реакции почвенной среды (pH) проводили потенциометрическим методом (навеска почвы 10 г) при соотношении почва : раствор KCl 1 н – 1 : 2.5. Гидролитическая кислотность определена методом Каппена (в модификации ЦИНАО), который основан на измерении pH почвенной суспензии на основе 1 М раствора уксуснокислого натрия при отношении почвы к раствору 1 : 2.5 (Практикум по агрохимии, 2001). Метод определения суммы обменных оснований по Каппену–Гильковичу построен на вытеснении обменных оснований ионом водорода 0.1 н раствора соляной кислоты (Практикум по агрохимии, 2001).

Геоботанические описания проводили по общепринятым методикам в соответствии со

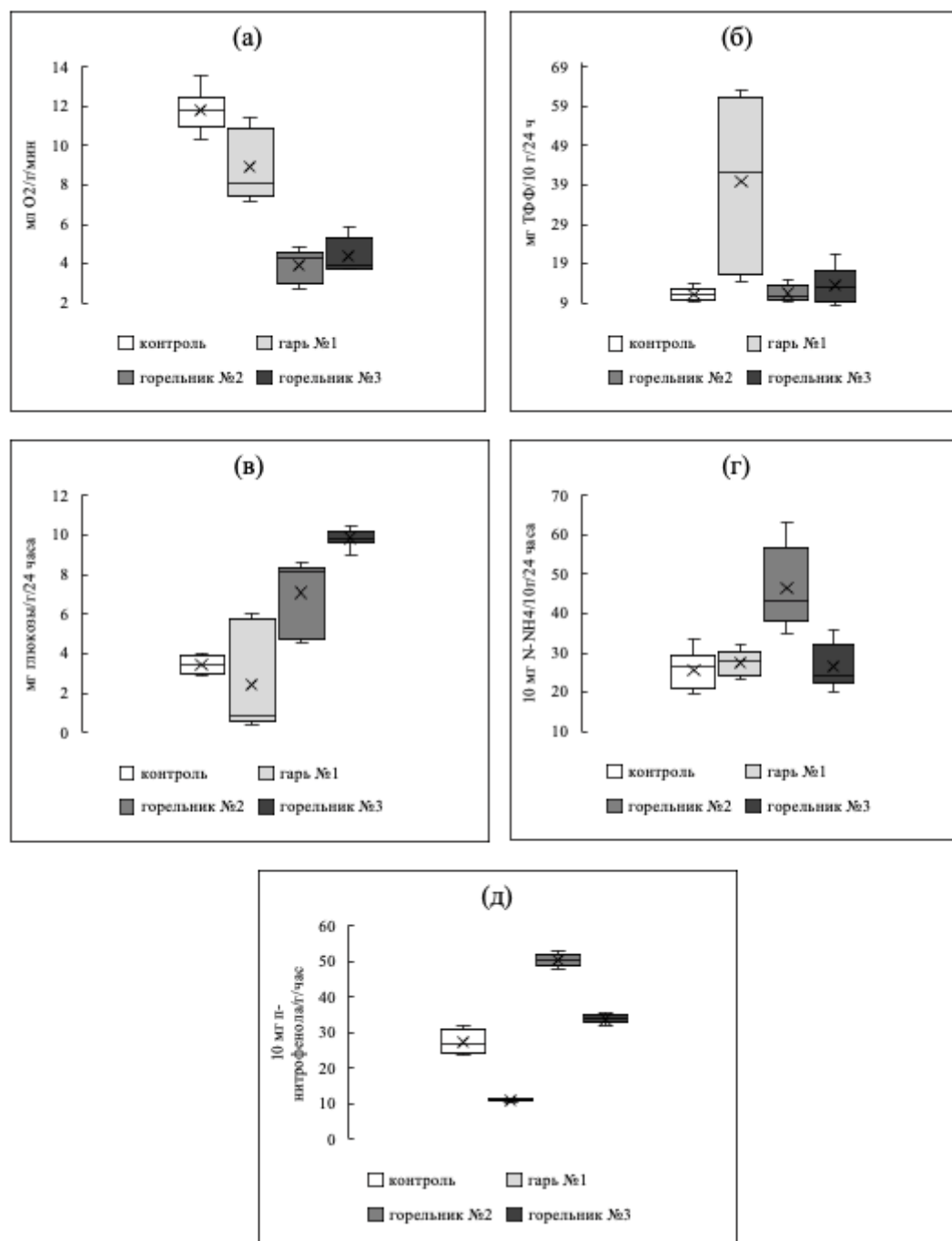
стандартными подходами (Миркин, Наумова, 2012). Видовую принадлежность растений определяли по региональным определителям (Косенко, 1970; Зернов, 2006). Названия видов приведены по работе “Сосудистые растения России и сопредельных государств” (Черепанов, 1995).

Проведен факторный анализ для выявления структуры корреляции внутри набора наблюдаемых переменных. Статистическая обработка данных выполнена посредством пакета Statistica 13.3 и MS Excel. При обсуждении результатов учитывали статистически достоверные различия с уровнем значимости 5% ( $p < 0.05$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенных исследований ферментативной активности постпирогенного бурозема Хамышинского участкового лесничества спустя 4 года после пожара для средних значений по каждому участку установлено достоверное снижение активности каталазы для почв гари № 1 на 25% относительно контрольных значений, для почв горельников № 2, 3 в среднем на 65% (рис. 2, а).

Совокупность данных по всем трем участкам и контролю достаточно однородная, коэффициент вариации составляет от 9 до 20%. В других работах также отмечают пролонгированное ингибирование активности ферментов из класса оксидаз после пожаров и антропогенных нарушений (Казеев и др., 2021; Вилкова и др., 2023). Для дегидрогеназ отмечено повышение активности фермента относительно контрольных значений для почв гари № 1 на 257%, для горельника № 3 – на 21% (рис. 2, б). При этом установленные различия для горельника № 2 недостоверны. Коэффициент вариации признака для гари № 1 составляет 50%, что говорит о большой вариабельности полученных значений, для других участков коэффициент вариации не превышает 33%. Так как дегидрогеназы активны только в живых клетках, повышение значений данного фермента свидетельствует о микробиологическом характере разложения органического вещества (Казеев и др., 2016). Активность инвертазы снижена для почв гари № 1 на 31%, для двух других участков установлено повышение активности в среднем на 143% относительно контрольных значений (рис. 2, в). Коэффициент вариации признака для гари № 1 составляет 107%, что говорит о высокой вариабельности значений показателя, для других участков коэффициент вариации не превышает 25%. Активность уреазы для почв горельника № 2 выше относительно контрольных значений на 80%, для двух других участков выявленные различия недостоверны (рис. 2, г). Активность фосфатазы существенно снижена для почв участка гари № 1 на 50%, для участка горельника № 2 активность фермента повышена на 84%, а для горельника № 3 –



**Рис. 2.** Ферментативная активность постпирогенного бурозема Хамышинского лесничества спустя 4 года после пожара: а – активность каталазы; б – активность дегидрогеназ; в – активность инвертазы; г – активность уреазы; д – активность фосфатазы.

на 24% (рис. 2, д). Совокупность значений активности уреазы и фосфатазы абсолютно однородная, коэффициент вариации не превышает 22%. Такие отличия в характере изменений ферментативной активности почв между участками связаны как с неоднородностью самого процесса горения, так и с различными особенностями восстановления

спустя 4 года после воздействия. Биологические свойства почв находятся в непосредственной зависимости от глубины прогорания органических горизонтов, а также от степени обгорания корневой системы деревьев, что характерно для лесных фитоценозов (Усень и др., 2018).

Несмотря на то, что установленные различия по средним значениям достоверны, пространственное варьирование показателей в пределах одного участка существенно, что можно объяснить особенностями почв, гидротермических условий и микрорельефа местности. Выявленные различия ферментативной активности обусловлены процессами восстановления свойств почв после воздействия пирогенного фактора. Действительно, последствия пожара нивелируются в первый год после воздействия фактора, затем больший вклад вносит развитие дернового процесса, что в свою очередь снижает риски развития эрозии (Комиссаров, Габбасова, 2017).

При исследовании химических свойств постпирогенных почв установлено достоверное повышение средних значений суммы поглощенных оснований для почв гари № 1 относительно средних значений контроля. Выявленные отличия для остальных участков недостоверны. Средние значения гидролитической кислотности достоверно выше на 96% на участке гари № 1, на 32% для горельников № 2, 3 отличия недостоверны. Реакция почвенной среды солевой суспензии для гари № 1 повысилась до 5.8 единиц, а для горельников № 2, 3 – до 4.1 и 4.2 единиц соответственно. Повышение значений pH связывают с озолением подстилки и насыщением поглощающего комплекса пирогенных почв основаниями (Хуе et al., 2014; Журкова, Щербов, 2016; Маслов и др., 2018). Более высоким значениям pH соответствуют высокие значения суммы поглощенных оснований, что согласуется с литературными данными (Соколова и др., 2012). Несмотря на то, что изменения химических показателей сохраняются недолго (Максимова и др., 2014), отмечено пролонгированное подщелачивание почв гари № 1, что нехарактерно для почв двух других постпирогенных участков. Вероятно, воздействие на гари № 1 было более интенсивным, к тому же этот участок все еще не покрыт травянистой растительностью. Установлено снижение содержания органического углерода ( $C_{орг}$ ) на 18% по средним значениям для почв участка гари

№ 1, для горельников № 2, 3 выявленные отличия от контрольных значений недостоверны. Резкое снижение содержания гумуса и его энергозапасов отмечали в буроземах Приамурья после пожара в лиственничном лесу (Пуртова и др., 2012). Содержание активного углерода ( $C_{акт}$ ) достоверно снижено для почв гарей № 1, 3 на 6 и 7% соответственно по сравнению с контрольными значениями, отличия показателя для почв горельника № 2 недостоверны. После пожаров происходит усиление минерализации органического углерода, что приводит к снижению его содержания. Это связано с уничтожением органогенных горизонтов, минерализацией корневых остатков, к тому же поступившее в почву органическое вещество обуглено, разлагается медленно и недоступно для микроорганизмов (Дымов и др., 2014; Ставрова и др., 2019; Singh et al., 2021). Абсолютные значения химических свойств почв представлены в табл. 2.

Для выявления характера и тесноты связи показателей друг с другом проведен корреляционный анализ. Между активностью каталазы, инвертазы и фосфатазы отмечена средняя отрицательная корреляционная связь ( $r = -0.70$ ). Слабая отрицательная корреляционная связь установлена между активностью дегидрогеназ и фосфатазы ( $r = -0.50$ ). Инвертаза средне и положительно коррелирует с активностью фосфатазы ( $r = 0.70$ ). Слабая положительная корреляционная связь отмечена между активностью уреазы и фосфатазы ( $r = 0.47$ ). Сумма поглощенных оснований постпирогенного бурозема средне и положительно коррелирует с гидролитической кислотностью, pH, активностью дегидрогеназ ( $r = 0.38-0.69$ ), высокая положительная корреляционная связь отмечена с активностью каталазы ( $r = 0.75$ ). Средняя и сильная корреляционные связи установлены между гидролитической кислотностью, суммой поглощенных оснований с активностью инвертазы ( $r = -0.56...-0.78$ ). Средняя отрицательная корреляция установлена между суммой поглощенных оснований и активностью фосфатазы ( $r = -0.60$ ). Средняя положительная корреляционная связь отмечена между

**Таблица 2.** Свойства постпирогенного бурозема Хамышинского участкового лесничества спустя 4 года после пожара

Участок	Сумма поглощенных оснований, мг-экв/100 г	Гидролитическая кислотность, ммоль/100 г	pH, ед.	$C_{орг}$ , %	$C_{акт}$ , 100 мгС/кг
Контроль	$9.3 \pm 0.23$	$6.5 \pm 0.02$	$4 \pm 0.04$	$3.8 \pm 0.10$	$7.3 \pm 0.41$
Гарь № 1	$19.1 \pm 2.45$	$7.1 \pm 0.12$	$5.8 \pm 0.37$	$3.3 \pm 0.15$	$6.8 \pm 0.42$
Гарь № 2	$9.3 \pm 0.37$	$6.4 \pm 0.03$	$4.1 \pm 0.09$	$4.7 \pm 0.27$	$7.3 \pm 0.83$
Гарь № 3	$6.3 \pm 1.31$	$6.5 \pm 0.01$	$4.2 \pm 0.13$	$3.4 \pm 0.23$	$6.8 \pm 0.47$

активностью дегидрогеназ и рН (0.38), при этом корреляция рН с активностью инвертазы средняя отрицательная ( $r = -0.35$ ). Содержание органического углерода средне и положительно коррелирует с активностью уреазы и фосфатазы ( $r = 0.47-0.54$ ).

На рис. 3 представлен график факторных координат, основанный на корреляции, для всех изученных показателей свойств постпирогенного бурозема.

Такие показатели, как активность каталазы, инвертазы, дегидрогеназ, а также содержание органического углерода и активного углерода, находятся достаточно близко к линии единичной окружности, следовательно, эти показатели хорошо воспроизводимы в системе найденных координат (рис. 3). При этом факторы 1 и 2 объясняют 67% общей дисперсии. С повышением рН почв повышаются гидролитическая кислотность и сумма поглощенных оснований. Эта же связь с активностью инвертазы, уреазы и фосфатазы противоположна. Установлена тесная взаимосвязь между активностью инвертазы, уреазы и фосфатазы с содержанием органического углерода и активным углеродом. Связь  $C_{орг}$  с активностью дегидрогеназ противоположна. При этом  $C_{акт}$  не имеет достоверной корреляционной связи ни с одним изученным показателем, поэтому в данной системе координат находится вдали от линии окружности. В изменении ферментативной активности гидролаз большую роль играет содержание органического углерода,

а в изменении активности оксидаз — значения рН, гидролитической кислотности и суммы поглощенных оснований.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мезофитные леса Западного Кавказа редко подвергаются воздействию пирогенного фактора. Однако даже низкоинтенсивные пожары на данной территории наносят катастрофический ущерб всей экосистеме и почве в частности. Так, спустя 4 года после низкоинтенсивного пожара на территории Хамышинского участкового лесничества Республики Адыгеи отмечено изменение активности ферментов бурозема из класса оксидаз (дегидрогеназы, каталаза) и гидролаз (инвертаза, уреазы, фосфатаза). Установлено пролонгированное снижение активности каталазы, для остальных ферментов отмечена тенденция к повышению активности относительно контроля, но это не говорит о полном восстановлении свойств почв, а свидетельствует только о благоприятных гидротермических условиях для развития микроорганизмов почв восстановительной сукцессии. Тенденцию ферментов к повышению активности можно представить в ряду: дегидрогеназы > инвертаза > уреазы > фосфатаза > каталаза. Во многом изменения биологических свойств почв обусловлены особенностями химических свойств, что подтверждает факторный анализ.



**Рис. 3.** Проекция переменных на факторную плоскость свойств постпирогенного бурозема Хамышинского лесничества спустя 4 года после пожара: 1 — сумма поглощенных оснований; 2 — гидролитическая кислотность; 3 — рН; 4 —  $C_{орг}$ ; 5 —  $C_{акт}$ ; 6 — каталаза; 7 — дегидрогеназы; 8 — инвертаза; 9 — уреазы; 10 — фосфатаза.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акатов В.В.* Состав, видовое богатство и размер видового пула моно- и олигодоминантных древостоев Западного Кавказа // Растительность России. 2018. № 32. С. 3–18. <https://doi.org/10.31111/vegrus/2018.32.3>
- Акатов В.В.* Структура доминирования в древостоях лесов Западного Кавказа: факторы и механизмы // Успехи современной биологии. 2014. Т. 134. № 3. С. 257–269.
- Акатов В.В., Голгофская К.Ю., Горчарук Л.Г. и др.* Кавказский заповедник // Заповедники СССР. Заповедники Кавказа. М.: Мысль, 1990. С. 69–100.
- 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. Т. 7. № 4. С. 46–72. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-4-44-70>
- Вилкова В.В., Казеев К.Ш., Привизенцева Д.А., Нижельский М.С., Колесников С.И.* Изменение активности ферментов постпирогенных почв заповедника “Утриш” (Россия) на ранних стадиях сукцессии // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2023. Т. 8. № 3. С. 10–23. <https://doi.org/10.24189/ncr.2023.019>
- Галстян А.Ш.* Унификация методов исследования активности ферментов почв // Почвоведение. 1978. № 2. С. 107–114.
- Горбунова Ю.С., Девятова Т.А.* Динамика показателей поглотительной способности почв после пирогенного воздействия // Сорбционные и хроматографические процессы. 2019. Т. 19. № 6. С. 718–725. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2019.19/2235>
- Гынинова А.Б., Дыржинов Ж.Д., Гончиков Б.М.Н., Хамнуева Т.Р.* Особенности трансформации почв под влиянием пожаров в сосновых лесах Прибайкалья // Вестник Бурятского гос. ун-та. Биология. География. 2018. № 1. С. 44–53. <https://doi.org/10.18101/2587-7143-2018-1-44-53>
- 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>
- Журкова И.С., Щербов Б.Л.* Миграция химических элементов при лесном низовом пожаре (Алтайский край) // Известия Иркутского государственного университета. Сер.: Науки о Земле. 2016. Т. 16. С. 30–41.
- Зернов А.С.* Флора Северо-Западного Кавказа. М.: Издательство научных изданий КМК, 2006. 664 с.
- Казеев К.Ш., Солдатов В.П., Шхапацев А.К. и др.* Изменение свойств дерново-карбонатных почв после сплошной рубки в хвойно-широколиственных лесах Северо-Западного Кавказа // Лесоведение. 2021. Т. 4. № 4. С. 426–436. <https://doi.org/10.31857/S0024114821040069>
- Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В.* Методы биодиагностики наземных экосистем. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2016. 356 с.
- Комиссаров М.А., Габбасова И.М.* Эрозия агрочерноземов при орошении дождеванием и моделировании осадков в Южной лесостепи Башкирского Предуралья // Почвоведение. 2017. № 2. С. 264–272. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17020071>
- Косенко И.С.* Определитель высших растений Северо-Западного Кавказа и Предкавказья. М.: Колос, 1970. 614 с.
- Краснощекоев Ю.Н.* Почвы горных лесов Прибайкалья и их трансформация под влиянием пожаров // Почвоведение. 2018. № 4. С. 387–401. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18040019>
- Кухар И.В., Бердникова Л.Н., Орловский С.Н. и др.* Влияние вредных и опасных факторов лесных пожаров на окружающую среду // Хвойные бореальной зоны. 2019. Т. 37. № 5. С. 307–312.
- Литвинская С.А.* Флорофитоценоотическое разнообразие Западного Кавказа // Юг России: экология, развитие. 2020. Т. 15. № 1. С. 37–48. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2020-1-37-48>
- Лукина Н.В., Тихонова Е.В., Шевченко Н.Е. и др.* Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2018. 187 с.
- Максимова Е.Ю., Цибарт А.С., Абакумов Е.В.* Свойства почв Тольяттинского соснового бора после катастрофических пожаров 2010 г. // Почвоведение. 2014. № 9. С. 1131–1144. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14090081>
- Маслов М.Н., Маслова О.А., Поздняков Л.А., Копецна Е.И.* Биологическая активность почв горно-тундровых экосистем при постпирогенном восстановлении // Почвоведение. 2018. № 6. С. 728–737. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18060096>
- Медведева М.В., Бахмет О.Н., Ананьев В.А. и др.* 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>
- Миркин Б.М., Наумова Л.Г.* Современное состояние основных концепций науки о растительности. Уфа: Гилем, 2012. 488 с.
- Нижельский М.С., Казеев К.Ш., Вилкова В.В., Колесников С.И.* Ингибирование ферментативной активности чернозема обыкновенного газообразными продуктами горения растительных материалов // Почвоведение. 2022. № 6. С. 728–736. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22060090>
- Никитин Б.А.* Методика определения содержания гумуса в почве // Агрохимия. 1972. № 3. С. 123–125.
- Практикум по агрохимии / Под ред. В.Г. Минеева. М.: МГУ, 2001. 689 с.
- Пуртова Л.Н., Костенков Н.М., Брянин С.В.* Влияние лесных пожаров на гумусово-энергетическое



- состояние буроземов Приамурья // Вестник КрасГАУ. 2012. № 5. С. 121–124.
- Сапожников А.П., Карпачевский Л.О., Ильина Л.С. Послепожарное почвообразование в кедрово-широколиственных лесах // Лесной вестник. 2001. № 1. С. 132–165.
- Соколова Т.А., Толпешта И.И., Трофимов С.Я. Почвенная кислотность. Кислотно-основная буферность почв. Соединения алюминия в твердой фазе почвы и в почвенном растворе. Тула: Гриф и К, 2012. 124 с.
- Ставрова Н.И., Калимова И.Б., Горшков В.В. и др. Долговременные послепожарные изменения характеристик почв в темнохвойных лесах Европейского Севера // Почвоведение. 2019. № 2. С. 246–256. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19020138>
- Усень В.В. Послепожарное состояние и восстановление лесных фитоценозов на территории Республики Беларусь // Известия Национальной академии наук Беларуси. Сер. биол. наук. 2018. Т. 63. № 3. С. 316–327. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2018-63-3-316-327>
- Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств. СПб.: Мир и семья, 1995. 992 с.
- Шарагин А.М. Влияние лесных пожаров на экологическую ситуацию // Успехи современного естествознания. 2011. № 7. С. 236.
- Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г. Углеродный бюджет лесов России // Сибирский лесной журнал. 2014. № 1. С. 69–92.
- Шевченко Н.Е., Кузнецова А.И., Тебенькова Д.Н. и др. Сукцессионная динамика растительности и запасы почвенного углерода в хвойно-широколиственных лесах Северо-Западного Кавказа // Лесоведение. 2019. Т. 3. С. 163–176. <https://doi.org/10.1134/S0024114819030082>
- Шхапацев А.К., Грабенко Е.А., Казеев К.Ш. Биологическая активность буроземов в молодых “окнах” полого леса Кавказского биосферного заповедника // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 4–2. С. 139–147. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2022-4-2-139-147>
- Akburak S., Son Y., Makineci E., Çakir M. Impacts of low-intensity prescribed fire on microbial and chemical soil properties in a Quercus frainetto forest // Journal of Forestry Research. 2018. V. 29. № 3. P. 687–696. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0486-4>
- Alcañiz M., Outeiro L., Francos M., Úbeda X. Effects of prescribed fires on soil properties: A review // Science of the Total Environment. 2018. V. 613. P. 944–957. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.144>
- Baltzer J.L., Day N.J., Walker X.J. et al. 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. P. e2024872118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2024872118>
- Blair G.J., Lefroy R.D.B., Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems // Australian Journal of Agricultural Research. 1995. V. 46. № 7. P. 1459–1466.
- Fan L., Wigneron J.P., Ciais P. et al. Siberian carbon sink reduced by forest disturbances // Nature Geoscience. 2023. V. 16. № 1. P. 56–62. <https://doi.org/10.11888/Terre.tpd.272842>
- Francos M., Stefanuto E.B., Úbeda X., Pereira P. Long-term impact of prescribed fire on soil chemical properties in a wildland-urban interface. Northeastern Iberian Peninsula // Science of the Total Environment. 2019. V. 689. P. 305–311. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.434/>
- Hinojosa M.B., Albert-Belda E., Gomez-Munoz B., Moreno J.M. High fire frequency reduces soil fertility underneath woody plant canopies of Mediterranean ecosystems // Science of the Total Environment. 2021. V. 752. P. 141877. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141877>
- 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. 2020. V. 53. № 11. P. 1610–1619. <https://doi.org/10.1134/S106422932011006X>
- Kazeev K.Sh., Poltoratskaya T.A., Yakimova A.S. et al. Post-fire changes in the biological properties of the brown soils in the Utrish State Nature Reserve (Russia) // Nature Conservation Research. 2019. V. 4. № 1. P. 93–104. <https://doi.org/10.24189/ncr.2019.055>
- Lucas-Borja M.E., Ortega R., Miralles I., Plaza-Álvarez P.A., González-Romero J., Peña-Molina E., de las Heras J. Effects of wildfire and logging on soil functionality in the short-term in *Pinus halepensis* M. forests // European Journal of Forest Research. 2020. V. 139. P. 935–945.
- Mansoor S., Farooq I., Kachroo M.M. et al. Elevation in wildfire frequencies with respect to the climate change // J. of Environmental management. 2022. V. 301. P. 113769. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113769>
- Moebius-Clune B.N., Moebius-Clune D.J., Gugino B.K. et al. Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework. Edition 3.2. New York: Cornell University. Geneva, 2016.
- Oertel C., Matschullat J., Zurba K., Zimmermann F., Erasmí S. Greenhouse gas emissions from soils – A review // Geochemistry. 2016. V. 76. № 3. P. 327–352. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002>
- Ponomarev E.I., Zabrodin A.N., Shvetsov E.G., Ponomareva T.V. Wildfire Intensity and Fire Emissions in Siberia // Fire. 2023. V. 6. № 7. P. 246. <https://doi.org/10.3390/fire6070246>
- 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. № 1. P. 29. <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00293-6/>
- Sitch S., Huntingford C., Gedney N. et al. Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate–carbon cycle feedbacks using five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs) // Global Change

Biology. 2008. V. 14. P. 2015–2039.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01626.x>

Sommers W.T., Loehman R.A., Hardy C.C. Wildland fire emissions, carbon, and climate: Science overview and knowledge needs // Forest Ecology and Management. 2014. V. 317. P. 1–8.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.12.014>

Vilkova V.V., Kazeev K.Sh., Shkhapatsev 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. V. 12.

№ 1. P. 93–98.

<https://doi.org/10.1134/S2079096122010139>

Vilkova V.V., Kazeev K.Sh., Nizhelskiy M.S. et al. Influence of fires on the enzymatic activity of cinnamonic soils and burozems in the Western Caucasus // Eurasian Soil Science. 2024. V. 57. № 2. P. 266–274.

<https://doi.org/10.1134/S1064229323602834>

Xue L., Li Q., Chen H. Effects of a wildfire on selected physical, chemical and biochemical soil properties in a *Pinus massoniana* forest in South China // Forests. 2014. V. 5. № 12. P. 2947–2966. <https://doi.org/10.3390/f5122947>

## Aftermath of Fires for Mesophytic Forests' Soils in Western Caucasus

V. V. Vilkova<sup>1, \*</sup>, K. Sh. Kazeev<sup>1</sup>, M. S. Nizhelskiy<sup>1</sup>, E. A. Grabenko<sup>2, 3</sup>,  
 O. Yu. Yermolayeva<sup>1</sup>, S. I. Kolesnikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Southern Federal University,  
 Stachki ave. 194/1, Rostov-on-Don, 344090 Russian Federation

<sup>2</sup>Institute of Geography of the RAS,  
 Staromonetnyi ln. 29, Moscow, 119017 Russian Federation

<sup>3</sup>Adyghe State University,  
 Pervomayskaya st. 208, Maykop, 385000 Russian Federation

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

Every year, vast areas of forests burn down during fires all over the world. The literature contains contradictory data on the effects of fires on individual components of ecosystems, in particular on soils. This necessitates the study of the aftermath of fires in different climatic and soil conditions. The aim of this work is studying the consequences of a ground fire on the properties of phaeozems of the Khamyshinsky district forestry unit of the Adyghe Republic 4 years after the impact. The chemical (CEC, hydrolytic acidity, pH, organic carbon and active carbon content) and biological (activity of catalase, dehydrogenases, invertase, urease, phosphatase) properties of post-pyrogenic soils on one fully and two partially burnt areas have been studied. The ground fire did not cause significant changes in the composition of the forest stand for burnt areas No. 2 (1159 m above sea level) and No. 3 (1359 m above sea level), while the burnt area No. 1 (651 m above sea level) was characterised by completely charred trees, abundant growth of pontic rhododendron, and poorly developed herbaceous vegetation. A 51% decrease in catalase activity compared to the control was found in the three areas. The activity of dehydrogenases and urease in post-pyrogenic soils exceeded the control values by an average of 62%. The activity of invertase and phosphatase varied depending on the study area. In general, there was a tendency toward an increase in the activity of these enzymes. At the same time, a high spatial variation in the activity of soil dehydrogenases and invertase was found for burnt-out area No. 1. There also was an increase in hydrolytic acidity by an average of 43% compared to the control values. The CEC, the content of organic and active carbon differs to a lesser extent from the control values 4 years after the fire. The acidity index (pH) of the area devoid of grassy vegetation reaches 5.8, with control having pH of 4. Notably, higher values of the CEC correspond to higher pH values. Factor analysis showed that changes in the enzymatic activity of post-pyrogenic phaeozem are associated with the peculiarities of the soils' chemical properties. The activity of hydrolases (urease, phosphatase) is closely related to the content of organic carbon, and the activity of other enzymes – to the CEC, hydrolytic acidity and pH. The content of active carbon changes insignificantly and does not affect the enzymatic activity.

**Keywords:** pyrogenic factor, enzymatic activity, chemical properties, phaeozem, bioindication.

**Acknowledgements:** The study has been carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of a state contract for scientific activity (№ FENW-2023-0008).

## REFERENCES

- Akatov V.V., Sostav, vidovoe bogatstvo i razmer vidovogo pula mono- i oligodominantnykh drevostoev Zapadnogo Kavkaza (The composition, species richness and species pool size of mono- and oligodominant forest stands of The Western Caucasus), *Rastitel'nost' Rossii*, 2018, No. 32, pp. 3–18. <https://doi.org/10.31111/vegrus/2018.32.3>
- Akatov V.V., Struktura dominirovaniya v drevostoyakh lesov Zapadnogo Kavkaza: faktory i mekhanizmy (Structure of dominance in forest stands of the Western Caucasus: Factors and mechanisms), *Uspekhi sovremennoi biologii*, 2014, Vol. 134, No. 3, pp. 257–269.
- Akatov V.V., Golgofskaya K.Yu., Gorcharuk L.G. et al., Kavkazskii zapovednik (Caucasian Reserve), In: *Zapovedniki SSSR. Zapovedniki Kavkaza* (Reserves of the USSR. Reserves of the Caucasus), Moscow: Mysl', 1990, pp. 69–100.
- Akburak S., Son Y., Makineci E., Çakir M., Impacts of low-intensity prescribed fire on microbial and chemical soil properties in a *Quercus frainetto* forest, *J. of Forestry Research*, 2018, Vol. 29, No. 3, pp. 687–696. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0486-4>
- Akkumulyatsiya ugleroda v lesnykh pochvakh i suksessionnyi status lesov (Carbon accumulation in forest soils and forest succession status). Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2018, 232 p.
- Alcañiz M., Outeiro L., Francos M., Úbeda X., Effects of prescribed fires on soil properties: A review, *Science of the Total Environment*, 2018, Vol. 613, pp. 944–957. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.144>
- Baltzer J.L., Day N.J., Walker X.J. et al., Increasing fire and the decline of fire adapted black spruce in the boreal forest, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, Vol. 118, No. 45, pp. e2024872118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2024872118>
- Blair G.J., Lefroy R.D.B., Lisle L., Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems, *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, Vol. 46, No. 7, pp. 1459–1466.
- Bogdanovich A.Yu., Lipka O.N., Krylenko M.V., Andreeva A.P., Dobrolyubova K.O., Klimaticheskie ugrozy na Severo-Zapade Chernomorskogo poberezh'ya Kavkaza: sovremennye trendy (Climate threats in the North-West Caucasus Black Sea coast: Modern trends), *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2021, Vol. 7, No. 4, pp. 46–72. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-4-44-70>
- Czerepanov S.K., *Vascular plants of Russia and adjacent states (the former USSR)*, Cambridge: Cambridge university press, 1995, 516 p.
- Dymov A.A., Dubrovsky Y.A., Gabov D.N., Pyrogenic changes in iron-illuvial podzols in the middle taiga of the Komi Republic, *Eurasian Soil Science*, 2014, Vol. 47, No. 2, pp. 47–56.
- Fan L., Wigneron J.P., Ciais P. et al., Siberian carbon sink reduced by forest disturbances, *Nature Geoscience*, 2023, Vol. 16, No. 1, pp. 56–62. <https://doi.org/10.11888/Terre.tpd.272842>
- Francos M., Stefanuto E.B., Úbeda X., Pereira P., Long-term impact of prescribed fire on soil chemical properties in a wildland-urban interface. Northeastern Iberian Peninsula, *Science of the Total Environment*, 2019, Vol. 689, pp. 305–311. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.434>
- Galstyan A.Sh., Unifikatsiya metodov issledovaniya aktivnosti fermentov pochv (Unification of methods for studying the activity of soil enzymes), *Pochvovedenie*, 1978, No. 2, pp. 107–114.
- Gorbunova Yu.S., Devyatova T.A., Dinamika pokazatelei poglotitel'noi sposobnosti pochv posle pirogennogo vozdeistviya (Dynamics of soil absorption capacity after pyrogenic impacts), *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2019, Vol. 19, No. 6, pp. 718–725. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2019.19/2235>
- Gyninova A.B., Dyrzhinov Zh.D., Gonchikov B.M.N., Khamnueva T.R., Osobennosti transformatsii pochv pod vliyaniem pozharov v sosnovykh lesakh Pribaikal'ya (Features of the transformation of soils under the influence of fires in the pine forests of the Baikal region), *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. Geografiya*, 2018, No. 1, pp. 44–53. <https://doi.org/10.18101/2587-7143-2018-1-44-53>
- Hinojosa M.B., Albert-Belda E., Gomez-Munoz B., Moreno J.M., High fire frequency reduces soil fertility underneath woody plant canopies of Mediterranean ecosystems, *Science of the Total Environment*, 2021, Vol. 752, p. 141877. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141877>
- Kazeev K. Sh., Soldatov V.P., Shkhapatsev A.K. et al., Izmenenie svoystv durnovo-karbonatnykh pochv posle sploshnoi rubki v khvoino-shirokolistvennykh lesakh Severo-Zapadnogo Kavkaza (Changes in the properties of calcareous soils after clearcutting in the coniferous deciduous forests of the Northwestern Caucasus), *Lesovedenie*, 2021, Vol. 4, No. 4, pp. 426–436. <https://doi.org/10.31857/S0024114821040069>
- Kazeev K.S., Kolesnikov S.I., Akimenko Y.V., Dadenko E.V., *Metody biodiagnostiki nazemnykh ekosistem* (Biodiagnostic methods of terrestrial ecosystems), Rostov-on-Don: Izd-vo Yuzhnogo fed. universiteta, 2016, 356 p.
- 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*, 2020, Vol. 53, No. 11, pp. 1610–1619. <https://doi.org/10.1134/S106422932011006X>
- Kazeev K.Sh., Poltoratskaya T.A., Yakimova A.S. et al., Odobashyan M.Yu., Shkhapatsev 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, Vol. 4, No. 1, pp. 93–104. <https://doi.org/10.24189/ncr.2019.055>
- Komissarov M.A., Gabbasova I.M., Erosion of agrochernozems under sprinkler irrigation and rainfall simulation in the southern forest-steppe of Bashkir



- Cis-Ural Region, *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50, No. 2, pp. 253–261.
- Kosenko I.S., *Opreidelitel' vysshikh rastenii Severo-Zapadnogo Kavkaza i Predkavkaz'ya* (Key to higher plants of North-Western Caucasus and Ciscaucasia), Moscow: Kolos, 1970, 614 p.
- Krasnoshchekov Y.N., Soils of mountainous forests and their transformation under the impact of fires in Baikal region, *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol. 51, No. 4, pp. 371–384.
- Kukhar I.V., Berdnikova L.N., Orlovskii S.N. et al., Vliyanie vrednykh i opasnykh faktorov lesnykh pozharov na okruzhayushchuyu sredu (The impact of harmful and dangerous factors of forest fires on the environment), *Khvoynye boreal'noi zony*, 2019, Vol. 37, No. 5, pp. 307–312.
- Litvinskaya S.A., Florofitotsenoticheskoe raznoobrazie Zapadnogo Kavkaza (Florophytocenotic Diversity of the Western Caucasus), *Yug Rossii: ekologiya, razvitiye*, 2020, Vol. 15, No. 1 (54), pp. 37–48.  
<https://doi.org/10.18470/1992-1098-2020-1-37-48>
- Lucas-Borja M.E., Ortega R., Miralles I. et al., Effects of wildfire and logging on soil functionality in the short-term in *Pinus halepensis* M. forests, *European J. of Forest Research*, 2020, Vol. 139, pp. 935–945.
- Maksimova E.Y., Tsibart A.S., Abakumov E.V., Soil properties in the Tol'yatti pine forest after the 2010 catastrophic wildfires, *Eurasian soil science*, 2014, Vol. 47, No. 9, pp. 940–951.
- Mansoor S., Farooq I., Kachroo M.M., Mahmood A.E.D., Fawzy M., Popescu S.M., Ahmad P., Elevation in wildfire frequencies with respect to the climate change, *J. of Environmental management*, 2022, Vol. 301, p. 113769.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113769>
- Maslov M.N., Maslova O.A., Pozdnyakov L.A., Kopeina E.I. Biological Activity of Soils in Mountain Tundra Ecosystems under Postpyrogenic Restoration, *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol. 51, No. 6, pp. 692–700.
- Medvedeva M.V., Bakhmet O.N., Anan'ev V.A. et al., Izmenenie biologicheskoi aktivnosti pochv v khvoynykh nasazhdeniyakh posle pozhara v srednei taige Karelii (Changes in soil' biological activity in a coniferous forest stand after a forest fire in the Republic of Karelia), *Lesovedenie*, 2020, No. 6, pp. 560–574.  
<https://doi.org/10.31857/S0024114820060066>
- Mirkin B.M., Naumova L.G., *Sovremennoe sostoyanie osnovnykh kontseptsii nauki o rastitel'nosti* (The current state of the fundamental concepts of the science of vegetation), Ufa: Gilem, 2012, 488 p.
- Moebius-Clune B.N., Moebius-Clune D.J., Gugino B.K. et al., *Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework*, New York: Cornell University, Geneva, 2016.
- Nikitin B.A., Metodika opredeleniya soderzhaniya gumusa v pochve (Methodology for determining the humus content in soil), *Agrokhimiya*, 1972, No. 3, pp. 123–125.
- 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.
- Oertel C., Matschullat J., Zurba K., Zimmermann F., Erasmí S., Greenhouse gas emissions from soils – A review, *Geochemistry*, 2016, Vol. 76, No. 3, pp. 327–352.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002>
- Ponomarev E.I., Zabrodin A.N., Shvetsov E.G., Ponomareva T.V., Wildfire Intensity and Fire Emissions in Siberia, *Fire*, 2023, Vol. 6, No. 7, p. 246.  
<https://doi.org/10.3390/fire6070246>
- Praktikum po agrokhimii*, (Practical guide on agrochemistry), Moscow: Izd-vo MGU, 2001, 689 p.
- Purtova L.N., Kostenkov N.M., Bryanin S.V., Vliyanie lesnykh pozharov na gumusovo-energeticheskoe sostoyanie burozemov Priamur'ya (Forest fire influence on humic and energy state of the brown soils in Priamurye), *Vestnik KrasGAU*, 2012, No. 5, pp. 121–124.
- Sapozhnikov A.P., Karpachevskii L.O., Il'ina L.S., Poslepozharное pochvoobrazovanie v kedrovo-shirokolistvennykh lesakh (Post-fire pedogenesis in siberian pine broadleaved forests), *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoi vestnik*, 2001, No. 1, pp. 132–165.
- Sharagin A.M., Vliyanie lesnykh pozharov na ekologicheskuyu situatsiyu (The impact of forest fires on the ecological situation), *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2011, No. 7, p. 236a.
- Shevchenko N.E., Kuznetsova A.I., Teben'kova D.N. et al., Suktsessionnaya dinamika rastitel'nosti i zapasy pochvennogo ugleroda v khvoino-shirokolistvennykh lesakh Severo-Zapadnogo Kavkaza (Succession dynamics of vegetation and storages of soil carbon in mixed forests of Northwestern Caucasus), *Lesovedenie*, 2019, No. 3, pp. 163–176.
- Shkhapatsev A.K., Grabenko E.A., Kazeev K.Sh. Biologicheskaya aktivnost' burozemov v molodykh “oknakh” pologa lesa Kavkazskogo biosfernogo zapovednika (Biological activity of burozems in young “windows” of the forest canopy of the Caucasus Biosphere Reserve), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki*, 2022, No. 4–2, pp. 139–147.  
<https://doi.org/10.18522/1026-2237-2022-4-2-139-147>
- Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G., Uglerodnyi byudzhet lesov Rossii (Carbon budget of Russian forests), *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2014, No. 1, pp. 69–92.
- 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, Vol. 10, No. 1, p. 29. <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00293-6>
- Sitch S., Huntingford C., Gedney N. et al., Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate–carbon cycle feedbacks using five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs), *Global Change Biology*, 2008, Vol. 14, pp. 2015–2039.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01626.x>