

АКТИВНОСТЬ КАТАЛАЗЫ И УРЕАЗЫ, КАК ИНДИКАТОР ПИРОГЕННОЙ НАРУШЕННОСТИ ПОЧВ (ЗАПОВЕДНИК УТРИШ, ПОЛУОСТРОВ АБРАУ)

Черненко С.П., Рогожина Е.В., Керимзаде В.В.

*Федеральный исследовательский центр
«Субтропический научный центр Российской академии наук»,
Сочи, Россия, e-mail: ecodence@gmail.com, RogojinaEW@yandex.ru, KerimzadeVadim@ya.ru*

Проведены исследования активности ферментов каталазы и уреазы в пирогенных нарушенных почвах на примере территории заповедника Утриш, подвергшейся пожару в 2020 г. Нарушенность пирогенных почв была изучена в период активно идущей сукцессии в 2022 г. в сравнение с фоновыми почвами участка местности, не поврежденного пожаром и имеющего схожую экспозицию и крутизну склонов. Исследования проводились в двух верхних генетических горизонтах (А и АВ, либо В). Активность каталазы в верхнем горизонте (А) постпирогенной зоны варьировала от 1,1 до 11,4 мл O_2 /г за 1 мин, в фоновых почвах – в более узком диапазоне от 2,6 до 5,0 мл O_2 /г за 1 мин. Активность уреазы в верхнем горизонте (А) постпирогенной зоны изменялась в пределах от 5,0 до 65,9 мг NH_3 /10 г за сутки, а в фоновых почвах в более широком диапазоне от 5,9 до 103,9 мг NH_3 /10 г за сутки. Для всех изученных почв (как фоновых, так и пирогенных) отмечено снижение активности каталазы и уреазы вниз по профилю. В пирогенной зоне активность каталазы была в среднем на 50 % выше, чем в фоновых почвах. Уреазы показала в меньшей степени стабильное увеличение активности под влиянием пирогенного фактора. Повышенные значения активности каталазы и уреазы коррелировали с более высоким содержанием гумуса, суммы обменных $Ca^{2+} + Mg^{2+}$, нитратов. Было отмечено влияние на изученные ферменты влажности почв, особенно в нижних горизонтах. Отмечено, что стимулирующее воздействие пирогенного фактора на активность изученных ферментов зависело от положения площадки опробования в рельефе, интенсивности пожара на различных участках и перераспределения пепла по элементам рельефа. Полученные результаты демонстрировали высокую информативность фермента каталазы для оценки пирогенной трансформации почв.

Ключевые слова: заповедник Утриш, ферментативная активность, уреазы, каталаза, корреляция, пирогенный фактор.

Введение. Нарушения природных систем, связанные с антропогенными факторами, получают с каждым годом всё большее распространение. Наиболее опасными, для богатой лесами территории России, являются пожары. Разнообразие изменений, происходящих в почвенной среде после воздействия пожаров, требует тщательного изучения и

классификации относительно типов территорий, степени разрушительного воздействия пожаров и связанного с ними процесса восстановления как микробиома почв, так и напочвенных растительных сообществ. Также необходимы выявления временных взаимосвязей пирогенного фактора с биологической активностью почв в целях прогнозирования скорости сукцессии и восстановительных процессов в почвах.

Ферментативная активность почвы складывается в результате совокупности процессов поступления, иммобилизации и действия внеклеточных ферментов в почве. Разнообразие ферментов в почве позволяет протекать последовательным биохимическим превращениям различных поступающих органических остатков. Так как большинство ферментов являются короткоживущими, в настоящее время в диагностических целях используют лишь некоторые из них. Наиболее интересен в качестве показателя пирогенной нарушенности фермент каталаза, относящийся к классу оксидоредуктаз и являющийся катализатором окислительно-восстановительных реакций в почвенной среде. Фермент является наиболее универсальным и информативным показателем состояния стабильности микробиоценоза и отражает способность почвенного покрова противодействовать стресс-факторам [5]. Уреаза относится к группе гидролаз, коррелирует с активностью всех ведущих ферментов азотного метаболизма и катализирует гидролитические процессы минерализации азотсодержащих органических веществ почв [5].

В экстремальных для жизнедеятельности почвенных организмов условиях, таких как лесные пожары, иммобилизованные внеклеточные ферменты почвы являются наиболее устойчивым компонентом, поддерживающим метаболизм почв [1, 2, 6, 7]. Благодаря свойству каталазы ингибировать стрессообразующие химические соединения, активность данного фермента может служить показателем текущего состояния почвенного покрова, его нарушенности и способности к восстановлению.

В литературных данных пирогенный фактор оценивается неоднозначно, единого мнения о его влиянии на биологическую активность почв отсутствует. Большинство исследователей указывают на стабильно длительное ингибирующее действие пожаров на активность каталазы и уреазы, сохраняющееся даже спустя многие годы [11, 20, 26, 29]. Однако встречаются и иные точки зрения, свидетельствующие о том, что ферментативная активность постпирогенных почв в значительной степени зависит как от временного фактора (почвы восстанавливаются в промежутки около десятка лет) [1, 16, 18, 24, 31], так и от положения участка в рельефе и различий в свойствах почв [2, 19, 23]. Ряд исследований отмечает незначительное воздействие на ферментативную

активность почв пожаров низкой интенсивности и верховых [12, 16, 22, 27, 31], и даже стимулирующее действие таких пожаров на некоторые ферменты на участках, лишенных лесного полога и более открытых солнцу [10, 12], а также при повышенной влажности почв [24, 25, 39]. Исследования проводились в большинстве случаев для верхних почвенных горизонтов и охватывали лишь наиболее пораженные пирогенным фактором участки.

Таким образом, вопрос стимулирующего или ингибирующего воздействия пирогенного фактора на ферментативную активность почв по-прежнему остается неоднозначным и вероятно зависит как от свойств почв, так и от положения участка в рельефе, влияющего на перераспределение пепла на поверхности.

В этой связи, *целью настоящего исследования* являлось установление активности каталазы и уреазы пирогенных нарушенных почв на территории заповедника Утриш, подвергшихся пожару в 2020 г., на пробных площадках, заложенных на разных элементах рельефа, разных по интенсивности пожара участках и степени увлажнения почв.

Объекты и методы исследования. Государственный природный заповедник Утриш расположен на полуострове Абрау в границах муниципальных образований городов Анапа и Новороссийск, учреждён он в 2010 г. с целью сохранения уникальных для территории России природных комплексов сухих субтропиков. Несмотря на снизившуюся благодаря охранному статусу антропогенную нагрузку, полностью исключить антропогенное воздействие не удалось. Летом 2020 г. в заповеднике произошёл пожар, затронувший площадь 120,3 га. Это событие послужило стимулом для принятия решения об увеличении наземной территории заповедника до 9 910,33 га, морской акватории – до 1 428,43 га [19].

На территории заповедника фактически повсеместно распространены коричневые почвы трёх типов: коричневые типичные, коричневые карбонатные и коричневые выщелоченные [9]. По Классификации почв России почвы относятся к стволу постлитогенных почв, отделу структурно-метаморфических, типу коричневых типичных. В соответствии с Всемирной базой почвенных ресурсов [30] почвы относятся к камбисолям – Cambisols Fradic.

По составу пород, слагающих геологическое основание изученной территории, для территории характерны палеоценовые мергели, алевролиты, известняки, доломиты, глины и песчаники (в долине ручья Водопадного мелового возраста). Северо-западнее исследуемой территории располагаются зоны рудной минерализации Hg, Pb, Cu [4].

Рельеф представлен небольшими возвышенностями с существенной крутизной склонов (преимущественно до 20–35°), рассеченными двумя узкими межхребтовыми депрессиями, так называемыми щелями – Водопадной и Базовой (рис. 1).

Отбор почвенных образцов для целей данного исследования осуществлялся из двух верхних генетических горизонтов (А, АВ либо В) на площадках, расположенных равномерно в сходных ландшафтных условиях на территории горельника вдоль правого борта Базовой щели и на контрольных (фоновых) участках в сходных условиях вдоль щели Водопадная. Всего было заложено 12 разрезов. Координаты точек наблюдения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Каталог координат точек наблюдения

Шифр точки наблюдения	Широта	Долгота	Высота над уровнем моря
Горельник (щель Базовая)			
Утр-1	44°43'47.54"N	37°25'59.83"E	79 м
Утр-2	44°43'53.24"N	37°26'00.18"E	105 м
Утр-3	44°44'03.78"N	37°26'00.88"E	143 м
Утр-4	44°44'10.55"N	37°26'02.19"E	165 м
Утр-5	44°44'18.03"N	37°26'00.28"E	180 м
Утр-6	44°44'23.99"N	37°26'04.95"E	183 м
Фон (щель Водопадная)			
Утр-7	44°44'55.57"N	37°24'29.28"E	81 м
Утр-8	44°44'59.81"N	37°24'30.44"E	100 м
Утр-9	44°45'03.98"N	37°24'32.12"E	149 м
Утр-10	44°45'07.39"N	37°24'34.17"E	169 м
Утр-11	44°45'10.11"N	37°24'36.30"E	210 м
Утр-12	44°45'12.95"N	37°24'37.25"E	230 м

Высокая крутизна склонов исследованных участков определяет небольшую мощность почв и существенную их каменистость. Делювиальный раздробленный материал в почве (нередко распространённый с поверхности) представлен преимущественно мелкой (2–5 мм), реже крупной (5–10 мм) не окатанной дресвой. Осадочное происхождение пород определило пластинчатую (слоистую) форму каменистых включений.

Климат изученной территории субсредиземноморский, он характеризуется положительными среднегодовыми температурами. Годовое количество осадков 600–700 мм, большая часть выпадает с ноября по март. В результате почвообразование протекает в условиях двух взаимно сменяющихся периодов: влажного и тёплого – сухого и жаркого, с коэффициентом увлажнения 0,50–0,85 [3].

На всей изученной территории преимущественно распространены фисташково-грабово-дубовые можжевельниковые леса, отличающиеся большим количеством сухого листового опада и за счёт выделения легко возгораемых смол и эфирных масел, имеющих высокую степень пожароопасности.

На исследованной территории (юго-западная часть заповедника) по данным почвенного картирования [3] для изученного района распадков щелей Водопадной и Базовой характерны: коричневые выщелоченные каменистые, коричневые выщелоченные сильнокаменистые и коричневые неполноразвитые почвы. Однако полевые почвенные исследования, выполненные в ходе данных исследований, показали, что для этой части заповедника характерны также и коричневые карбонатные почвы разной степени каменистости и мощности профиля, распространенные до отметок 150–160 м н.у.м.

Присутствие карбонатов, установленное при полевых описаниях традиционным методом с использованием 10%-ного раствора HCl, отмечается как с поверхности, так и с глубины залегания горизонта В (табл. 2). Распространены карбонатные коричневые почвы до высоты 165 м н.у.м. в распадке щели Базовой и до высоты 170 м н.у.м. в щели Водопадной. То есть высота распространения карбонатных почв изученного участка в целом схожа с их ареалом в северной части заповедника (в соответствии с почвенной картой М 1 : 50 000, Казеев и др., 2015).

Средняя каменистость почв (объём дресвы в составе мелкозёма) составляла от 10 % до 15 % в темногумусовом горизонте А и до 25–30 % в переходном горизонте АВ. Существенно более каменистая почва была описана в нижней точке щели Базовой (Утр-1) на высоте 79 м н.у.м. Здесь содержание дресвяного материала в составе мелкозёма от самой поверхности и глубже составляло примерно 70 %.

Все описанные разрезы характеризовали почвы, распространённые на склонах крутизной до 30–35°. Исключение составил разрез Утр-2, описанный в распадке щели Базовой на выположенном участке с крутизной первые градусы.

В ходе обследования территории распространения пожара повсеместно отмечались остатки сгоревших деревьев и скопление золы в напочвенном покрове; наблюдалось перераспределение пеплового

материала по элементам рельефа, вымытого на склоновых участках и переотложенного в западинах и небольших надпойменных террасах. Наиболее интенсивное горение происходило на территории максимально открытой ветровой нагрузке, ближе к отметкам 180 м н.у.м. в северо-восточной части горельника (пробная площадка Утр-6). Кроме того, интенсивному пожару подверглась и юго-восточная часть, расположенная ближе к очагу возгорания (площадка Утр-2). Остальные участки наблюдения (Утр-3, Утр-4 и Утр-5) были заложены вдоль щели Базовая с возрастанием высотных отметок на пути распространения пожара.

Физико-химические свойства изученных почв представлены в таблице 2. Были изучены следующие показатели: рН солевой (1 н. КСl) вытяжки (соотношение почва: раствор 1 : 2,5) потенциметрически (ГОСТ 26423-85, ГОСТ 26483-85 соответственно); гумус – по Тюрину в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91); гидролитическую кислотность по методу Каппена в модификации ЦИНАО титрометрически (вытяжка 1 н. CH_3COONa в соотношении почва : раствор 1 : 2,5, ГОСТ 26212-91); обменную кислотность титрометрически (вытяжка 1 н. КСl при соотношении почва : раствор 1 : 2,5, ГОСТ 26484-85); содержание обменных форм кальция и магния трилометрически с экстракцией 1 н. NaCl (ГОСТ 26487-85).

Исследуемые почвы имели преимущественно нейтральную в верхних горизонтах (6,9–7,0) или слабо щелочную в нижних (рН 7,1–7,3) реакцию среды (табл. 3). Выделяются коричневые выщелоченные почвы точек наблюдения Утр-5 и Утр-6, имеющие слабокислую реакцию среды. Содержание гумуса в верхнем горизонте варьировало от 3,4 до 7,6 %, а в нижних – от 1,8 до 7,0 %, что характеризует исследуемые почвы как средне- и малогумусные. Для почв характерна на всю глубину профиля практически полная насыщенность поглощающего комплекса основаниями. Площадка Утр-2 выделяется повышенным содержанием суммы ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , что, вероятно, связано с переотложением пепла на данном участке.

В качестве исследуемых показателей были выбраны: активность фермента каталаза, являющегося наиболее распространённым катализатором процесса биологического окисления и участвующего в окислительно-восстановительных процессах синтеза гумусовых компонентов, а также активность фермента уреазы, отражающего процесс минерализации поступающих в почву азотсодержащих органических веществ. Определение проведено по методу А.Ш. Галстяна в свежих образцах: каталаза – газометрически; уреазы – колориметрически [5, 8]. Оценка уровня ферментативной активности почв осуществлялась по шкале Гапонюк, Малахова [15].

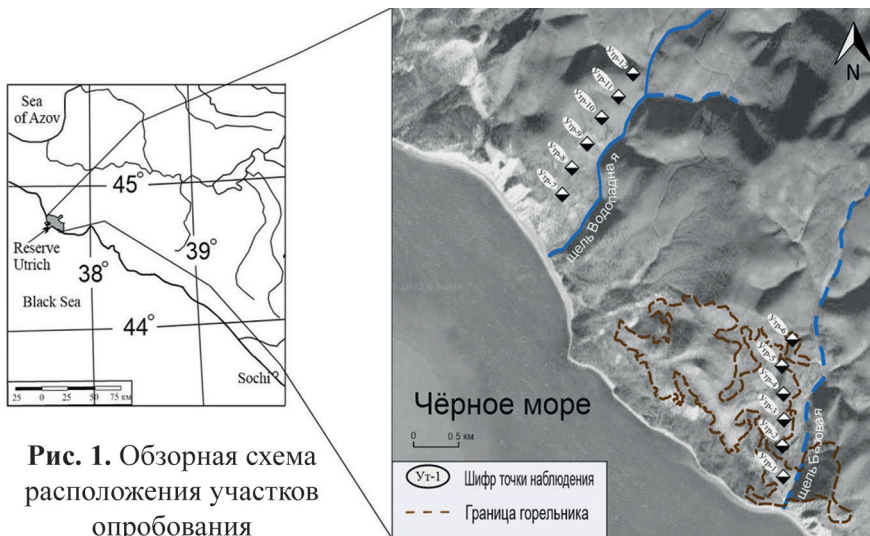


Рис. 1. Обзорная схема расположения участков опробования

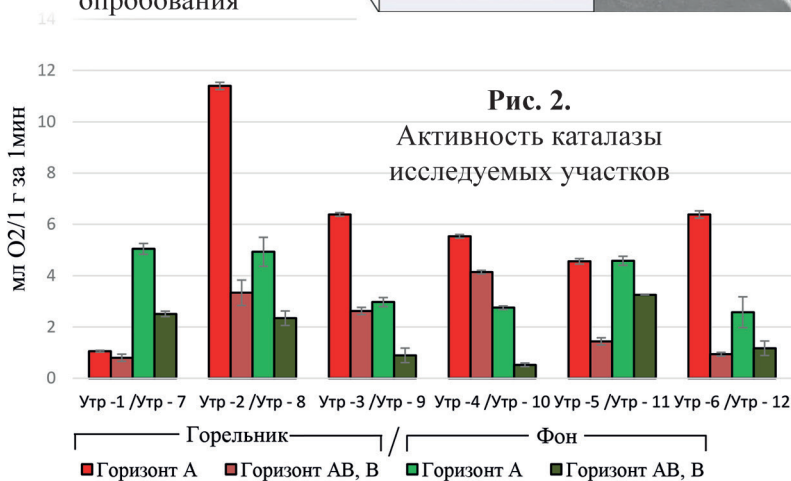


Рис. 2. Активность каталазы исследуемых участков

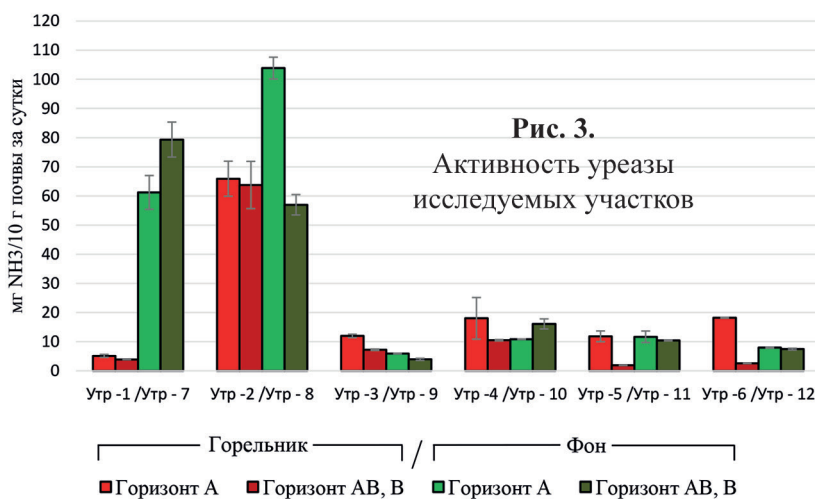


Рис. 3. Активность уреазы исследуемых участков

Статистическая обработка результатов выполнена с помощью программ STATISTICA 8.0, Microsoft Office Excel 2007.

Результаты и их обсуждение. В результате исследований было установлено, что активность каталазы в верхнем горизонте (А) постпирогенной зоны имела как низкие, так и высокие значения [26] и варьировала от 1,1 до 11,4 мл O_2 /г за 1 мин, при этом фоновые почвы характеризовались большей выровненностью этого показателя по всей площади исследования, который изменялся в узком диапазоне от 2,6 до 5,0 мл O_2 /г за 1 мин (рис. 2).

Выявленные различия связаны с более контрастными свойствами почв, опробованных на территории горельника: высокая каменистость почв площадки Утр-1 и их низкая влажность сопровождалась, возможно, снижением биогенности почвы и, как следствие, низкой активностью фермента (на 80 % ниже фоновых), а повышенное содержание элементов (в т. ч. суммы Ca^{2+} и Mg^{2+}) в результате переотложения пепла на площадке Утр-2, нейтральность почвенного раствора, высокое содержание гумуса и присутствие карбонатов (табл. 2), улучшающих структуру почвы [15], в целом создали благоприятные условия для микробного сообщества, проявляющего максимально высокую каталазную активность (на 60 % выше фоновых). Анализ данных позволил заключить, что почвы горельника верхнего органоминерального горизонта А, обладающие сходной физической структурой (Утр-3, Утр-4, Утр-5, Утр-6), имели соразмерную либо на 50 % более высокую активность каталазы по сравнению с фоном, что может быть обусловлено повышением активности микроорганизмов на данной стадии сукцессии экосистемы и отсутствием ингибирования биологической активности элементами пепла.

В нижних минеральных горизонтах почв (АВ и В) было отмечено снижение активности каталазы в сравнение с поверхностным горизонтом (А), как на территории горельника (в 1,3–6,8 раза), так и на фоновом участке (в 1,4–5,3 раза), что было сопряжено в основном с более низким содержанием гумуса, в меньшей степени (не на всех площадках опробования) – с уменьшением влажности с глубиной. Установленная закономерность почвенно-генетического распределения активности каталазы в почвах заповедника согласуется с результатами других исследователей [7, 15, 17, 28]. Активность каталазы в нижних горизонтах почв могла иметь как более высокие значения относительно фона (в точках Утр-2, Утр-3, Утр-4 – в 1,4; 2,9; 8,0 раз, соответственно), так и более низкие (в точках Утр-1, Утр-5, Утр-6 – в 3,1; 2,3; 1,3 раза, соответственно). Более низкие значения обусловлены наложением нескольких факторов: либо высокой каменистостью, низкой влажностью (14 %) и как следствие, низкой биогенностью почв точки Утр-1, либо высокой кислотностью почв в сочетании с очень низким содержанием гумуса в точках Утр-5, Утр-6 (табл. 2).

Таблица 2

**Название почв
и степень их карбонатности**

Точка наблюдений	Высота над уровнем моря, м	Название почвы	Генетический горизонт	Глубина, см	Интенсивность вскипания от 10 % HCl
Утр-1	79	Коричневая карбонатная смытая сильнокаменистая	A	2–17	слабо
			BC	17–30	интенсивно
Утр-2	105	Коричневая карбонатная смытая каменистая	A	0–3	слабо
			AB	3–10	интенсивно
Утр-3	143	Коричневая карбонатная смытая каменистая	A	0–4	не вскипает
			AB	4–9	слабо
Утр-4	165	Коричневая карбонатная смытая каменистая	A	0–6	не вскипает
			AB	6–8	слабо
Утр-5	180	Коричневая выщелоченная смытая каменистые	A	0–10	не вскипает
			B	10–40	
Утр-6	183	Коричневая выщелоченная смытая каменистые	A	0–12	не вскипает
			B	12–30	
Утр-7	81	Коричневая карбонатная смытая каменистая	A	0–3	слабо
			B	3–9	интенсивно
Утр-8	100	Коричневая карбонатная смытая каменистая	A	0–5	слабо
			B	5–8	интенсивно
Утр-9	149	Коричневая карбонатная смытая каменистая	A	0–8	не вскипает
			B	8–35	Слабо от верхней границы, интенсивно в нижней части
Утр-10	169	Коричневая карбонатная смытая каменистая	A	0–12	слабо
			B	12–30	интенсивно
Утр-11	210	Коричневая выщелоченная смытая каменистые	A	2–17	не вскипает
			B	17–30	
Утр-12	230	Коричневая выщелоченная смытая каменистые	A	0–10	не вскипает
			B	10–30	

Физико-химические свойства почв

Участки опробования	Горизонт	Глубина, см	Влажность, %	pH _{КС1}	Гумус, %	Нитраты	Ca ²⁺ +Mg ²⁺ мг-экв/100 г	Гидро- литическая кислотность	Степень насыщения основаниями, %
Горельник (щель Базовая)									
Утр-1	А	2–17	14	6,90	6,32	0,22	42,63	0,68	98,4
	В	17–30	14	7,30	4,26	0,17	34,32	0,44	98,7
Утр-2	А	0–3	31	7,01	7,71	0,18	101,23	0,96	99,1
	АВ	3–10	18	7,12	7,01	0,15	76,62	0,94	98,8
Утр-3	А	0–4	24	6,98	6,30	1,02	45,88	1,14	97,6
	АВ	4–9	14	7,10	4,82	1,35	32,97	0,68	98,0
Утр-4	А	0–6	31	7,05	6,41	0,38	43,03	0,68	98,4
	АВ	6–8	19	6,80	6,29	0,20	48,54	0,92	98,1
Утр-5	А	0–10	24	6,96	5,14	0,73	33,07	0,79	97,7
	В	10–40	15	4,38	1,76	0,19	12,56	4,95	71,7
Утр-6	А	0–12	29	6,48	6,08	0,22	28,98	1,83	94,1
	В	12–30	17	4,46	1,94	0,17	16,80	5,05	76,9
Фон (щель Водопадная)									
Утр-7	А	0–3	23	6,92	6,40	0,64	48,44	0,92	98,1
	В	3–9	18	7,15	5,6	0,29	41,68	0,68	98,4
Утр-8	А	0–5	16	7,05	6,53	0,23	48,25	0,93	98,1
	В	5–8	17	7,12	6,09	0,21	42,82	0,68	98,4
Утр-9	А	0–8	25	7,42	3,38	0,26	27,82	0,56	98,0
	В	8–35	19	7,62	2,30	0,16	30,24	0,45	98,5
Утр-10	А	0–12	10	7,30	5,14	0,23	35,59	0,68	98,1
	В	12–30	16	7,50	3,54	0,19	35,07	0,45	98,7
Утр-11	А	2–17	11	6,70	6,39	0,20	34,86	1,37	96,2
	В	17–30	14	7,22	4,23	0,16	30,13	0,68	97,8
Утр-12	А	0–10	17	7,10	5,43	0,19	34,23	0,91	97,4
	В	10–30	17	6,52	3,27	0,18	26,04	1,36	95,0

Активность уреазы в верхнем горизонте (А) постпирогенной зоны варьировала в пределах двух порядков от 5,0 до 65,9 мг $\text{NH}_3/10$ г за сутки, при этом фоновые почвы характеризовались ещё большей пространственной изменчивостью этого показателя, который принимал значения в диапазоне от 5,9 до 103,9 мг $\text{NH}_3/10$ г за сутки (рис. 3). На активность фермента в постпирогенной зоне оказывал влияние всё тот же комплекс факторов, что и на каталазу: структура почвы, влажность, содержание гумуса, кислотность. Различное сочетание параметров среды приводило к снижению на 88 % ниже фоновых каталитической активности в почвах площадки Утр-1 и обеспечивало высокую активность уреазы на площадке Утр-2.

Аналогично проявленной активности каталазы, активность уреазы в почве верхнего горизонта А площадок средней и верхней части горельника Утр-3, Утр-4, Утр-5 и Утр-6 имела соразмерные, либо на 50 % более высокие по сравнению с фоном значения, которые снижались в нижних горизонтах в 1,7–7,1 раза, тогда как на фоновом участке активность уреазы или снижалась менее резко в 1,1–1,8 раза или повышалась в 1,5–1,8 раза (Утр-7 и Утр-10). Объяснением повышения уреазной активности в нижних горизонтах почв являлось комплексное влияние факторов среды, обеспечивающих высокую биологическую активность почв, таких как высокое содержание органического углерода, нейтральная реакция почвенного раствора, увлажнение (табл. 2). В нижних горизонтах АВ или В значения активности уреазы, как и каталазы, в сравнение с фоном изменялись неоднозначно: более высокие значения относительно фона указывали на стимулирующее действие пирогенного фактора (пепла) на уреазу (Утр-2) и на интенсивный процесс минерализации поступающего органического вещества в почвах, содержащих высокое количество нитратов (Утр-3) (табл. 3). Снижение уреазной активности в нижних горизонтах относительно фона было обусловлено теми же факторами, что и снижение каталазы.

Корреляционный анализ основных химических свойств почв показал среднюю и высокую степень связи между показателями, влияющими на активность каталазы и уреазы. Так, с увеличением кислотности почв снижалось содержание гумуса ($r = -0,43$), суммы обменных форм кальция и магния ($r = -0,38$) и содержание нитратов ($r = -0,81$); увеличение содержания гумуса сопровождалось увеличением суммы обменных оснований ($r = 0,75$) и нитратов ($r = 0,54$). Оценка корреляционных связей между активностью выбранных ферментов и физико-химическими свойствами почв показала их существенную взаимосвязь (табл. 4).

**Коэффициенты корреляции
между активностью ферментов и физико-химическими
свойствами почв, при $p \leq 0,05$**

Показатели	Каталаза	Уреаза
pH_{KCl}	0,13	0,21
Гумус	0,69	0,57
Сумма Ca^{2+} и Mg^{2+}	0,68	0,76
Нитраты	0,56	0,41
Влажность	0,39	0,45

Наибольшая степень связи каталазы и уреазы была отмечена с гумусом и суммой обменных оснований, средняя – с нитратами. Корреляционные связи изученных ферментов с pH_{KCl} отсутствовали. Существенных различий по отношению к влажности почвы между каталазой и уреазой не проявилось. В целом активность каталазы и уреазы изменялась под влиянием одних и тех же параметров среды. Таким образом, активность уреазы и каталазы может быть использована в качестве индикаторов трансформации постпирогенных почв.

Выводы. Пожар 2020 г. на территории заповедника Утриш, нарушив гомеостаз почв, вызвал начало сукцессии. Выступая как индикаторы пирогенной нарушенности, через 2 г. после пожара каталаза проявляла повышенную в среднем на 50 % активность в верхнем органоминеральном горизонте в сравнение с фоновой почвой, не подверженной пожару. Уреаза показала в меньшей степени стабильное увеличение активности под влиянием пирогенного фактора. Полученные результаты позволили предположить стимулирующее влияние элементов пепла на почвенную биоту на данной стадии сукцессии экосистемы.

Причинами снижения активности ферментов каталазы и уреазы, как в органоминеральном А, так и в минеральных горизонтах АВ или В являлись либо высокая каменистость и сопряженная с этим низкая влажность и гумусированность почв; либо высокая кислотность и низкое содержание гумуса. Все перечисленные химические параметры почвы имели существенные корреляционные связи как между собой, так и с ферментами.

Таким образом, изученные ферменты отражали существующие восстановительные процессы, однако каталаза оказалась наиболее информативным показателем пирогенной трансформации почв.

*Публикация подготовлена в рамках реализации
Государственного задания ФИЦ СНИЦ РАН № 0492-2021-0015*

Список литературы

1. Григорьевская А.Я., Горбунова Ю.С., Девятова Т.А. Динамика экологического состояния почв и флоры после лесного пожара в европейской части России, Аридные экосистемы. 2021; 3 (88) : 37-44. DOI: 10.24411/1993-3916-2021-10161.
2. Завалишин С.И., Карелина В.С., Орлов А.В., Патрушев В.Ю. Биохимический потенциал поспирогенных дерново-подзолистых почв ленточных и приобских боров Алтайского края, Лесной вестник. 2020; 24(3) : 87-93. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-87-93.
3. Казеев К.Ш., Быхалова О.Н., Колесников С.И. Основные почвы в системе мониторинга заповедника «Утриш», Наземные и морские экосистемы полуострова Абрау: история, состояние, охрана. 2021; 5 : 22-37. ISBN: 978-5-9902730-2-3.
4. Лаврищев В.А., Пруцкий Н.И., Семенов В.М. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Серия Кавказская. Изд. 2-е. СПб: Санкт-Петербургская картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2002, Лист L-37-XX.
5. Малюкова Л.С., Рогожина Е.В., Струкова Д.В. Диагностика биофункционального состояния агрогенно-изменённых почв под многолетними насаждениями в зоне влажных субтропиков Росси, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский Центр «Субтропический научный центр Российской Академии Наук», Сочи. 2022; 81. – ISBN 978-5-904533-45-8.
6. 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 : 560-574. DOI: 10.31857/S0024114820060066.
7. Струкова Д.В., Малюкова Л.С. Активность ферментов каталазы и фосфотазы в бурых лесных кислых почвах чайной плантации субтропиков России, Субтропическое и южное садоводство России. 2009; 42(2) : 118-127. ISSN: 2225-3068.
8. Струкова Д.В. Методические аспекты изучения ферментативной активности бурых лесных почв влажных субтропиков России, Субтропическое и декоративное садоводство. 2016; 57 : 202-208. ISSN: 2225-3068.
9. Тонконогов В.Д., Герасимова М.И., Лебедева И.И. Классификация почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008, 57-61. ISBN: 5-93520-044-9.
10. Alcaniz M., Outeiro L., Francos M., Farguell J., Ube-da X. Long-term dynamics of soil chemical properties after a prescribed fire in a Mediterranean forest (Montgri Massif, Catalonia, Spain), Science of the Total Environment. 2016; 572 : 1329-1335. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.115.
11. Bartkowiak A., Lemanowicz J. Effect of forest fire on changes in the content of total and available forms of selected heavy metals and catalase activity in soil, Soil Science Annual. 2017; 68(3) : 140. DOI: 10.1515/ssa-2017-0017.
12. Catalanotti A.E., Giuditta E., Marzaioli R., Ascoli D., Esposito A., Strumia S., Mazzoleni S., Rutigliano F.A. 2018. Effects of single and repeated prescribed burns on soil organic C and microbial activity in a Pinus halepensis plantation of Southern Italy, Applied Soil Ecology. 2018; 125 : 108-116. DOI: 10.1016/j.apsoil.2017.12.015.
13. Fernández-García V., Miesel J., Baeza M. J., Marcos E., Calvo L., Wildfire effects on soil properties in fire-prone pine ecosystems: Indicators of burn severity legacy over the medium term after fire, Applied Soil Ecology. 2019; 135 : 147-156, DOI: 10.1016/j.apsoil.2018.12.002.
14. Gömöryová E., Střelcová K., Škvarenina J., Bebej J., Gömöry D. The impact of windthrow and fire disturbances on selected soil properties in the Tatra National Park, Soil and Water Research. 2008; 3(1) : 74-80. ISSN: 1801-5395.
15. Gorobtsova O.N., Khezheva F.V., Uligova T.S., Tembotov R.K. Ecological and geographical regularities of changes in the biological activity of automorphic soils on the foothills and adjacent plains of the central Caucasus region (Kabardino-Balkarian Republic),

- Eurasian Soil Science. 2015; 48(3) : 303-313. DOI: 10.1134/S106422931501007X.
16. Grigorievskaya A.Y., Gorbunova Y.S. & Devyatova T.A. Dynamics of the Ecological State of Soils and Flora after a Forest Fire in the European Part Russia. *Arid Ecosyst*, 2021; 11(3) : 249-255. DOI: 10.1134/S2079096121030069.
 17. Hamman S.T., Burke I.C., Knapp E.E., 2008. Soil nutrients and microbial activity after early and late season prescribed burns in a Sierra Nevada mixed conifer forest, *Forest Ecology and Management*. 2008; 256(3) : 367-374. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.04.030.
 18. Hedro J., Lucas-Borja M. E., Wic C., Andrés-Abellán M., and de Las Heras, J. Soil microbiological properties and enzymatic activities of long-term post-fire recovery in dry and semiarid Aleppo pine (*Pinus halepensis* M.) forest stands, *Solid Earth*. 2015; 6(1) : 243-252. DOI: 10.5194/se-6-243-2015.
 19. Kazeev K., Vilkoval V., Shkhatpatsev A., Bykhalova O., Rudenok Y., Nizhelskiy M., 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 Journal of Soil Science and Agroclimatology*. 2022; 19(1) : 52-59. DOI: 10.20961/stjssa.v19i1.58709.
 20. Kazeev K.S., Poltoratskaya T.A., Yakimova A.S., Odobashyan M.Y., 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; 4(Suppl. 1) : 93-104. DOI: 10.24189/ncr.2019.055.
 21. Kazeev K.S., Kutrovskii M.A., Dadenko E.V., Vezdeneeva L.S., Kolesnikov S.I., Valkov V.F. The influence of carbonates in parent rocks on the biological properties of mountain soils of the northwest Caucasus region, *Eurasian Soil Science*. 2012; 45(3) : 282-289. DOI: 10.1134/S1064229312030052.
 22. Malcheva B., Velizarova E., Nustorova M., Molla I. Enzyme activity of forest fire-influenced soils from north slopes of Rila mountain (region of Dolna Bania), *Forestry Ideas*. 2015; 21(1) : 55-66. ISSN: 13143905.
 23. Maksimova E.Y., Abakumov E.V., Kudinova A.G. Functional activity of soil microbial communities in post-fire pine stands of Tolyatti, Samara oblast, *Eurasian Soil Science*. 2017; 50(2) : 239-245. DOI: 10.1134/ S1064229317020119.
 24. Moya D., González-De Vega, Lozano E., García-Orenes F., Mataix-Solera J., Lucas-Borja M.E., de Las He-ras J. The burn severity and plant recovery relationship affect the biological and chemical soil properties of *Pinus halepensis* Mill. stands in the short and midterms after wildfire, *Journal of Environmental Management*. 2019; 235 : 250-256. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.01.029.
 25. Pingree M.R.A., DeLuca T.H. The influence of fire history on soil nutrients and vegetation cover in mixed-severity fire regime forests of the eastern Olympic Peninsula, Washington, USA, *Forest Ecology and Management*. 2018; 422 : 95-107. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.03.037.
 26. Semenenko S.Y., Morozova N.V. & Marchenko S.S. Studies of the Effects of Pyrogenic Exposure on the Enzymatic Activity of Chestnut and Chernozem Soils, *Arid Ecosyst*. 2020; 10(4) : 384-389. DOI: 10.1134/S2079096120040186.
 27. Verma S., Jayakumar S. Impact of forest fire on physical, chemical and biological properties of soil: A review, *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*. 2012; 2(3) : 168-176. ISSN: 2220-8860.
 28. Vilkoval V.V., Kazeev K.S., Shkhatpatsev A.K. et al. Reaction of the Enzymatic Activity of Soils of Xerophytic Forests on the Black Sea Coast in the Caucasus to the Pyrogenic Impact, *Arid Ecosyst*. 2022; 12(1) : 93-98. DOI: 10.1134/S2079096122010139.
 29. Wang B., Xue S., Liu G.B., Li G., Ren Z.P. Changes in soil nutrient and enzyme activities under different vegetations in the Loess Plateau area, Northwest China. *Catena*, 2012; 92 : 186-195. DOI: 10.1016/j.catena.2011.12.004.

30. Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, World Soil Resources Reports. 2014; 106 :181.
31. Yong-Mei Zhang, Ning Wu, Guo-Yi Zhou, Wei-Kai Bao. Changes in enzyme activities of spruce (*Picea balfouriana*) forest soil as related to burning in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau, Applied Soil Ecology, 2005; 30(3) : 215-225. DOI: 10.1016/j.apsoil.2005.01.005.

References

1. Grigorievskaya A. Ya., Gorbunova Yu. S., Devyatova T. A. Dynamics of the ecological state of soils and flora after a forest fire in the European part of Russia, Arid Ecosystems. 2021; 3(88) : 37-44. DOI: 10.24411/1993-3916-2021-10161.
2. Zavalishin S.I., Karelina V.S., Orlov A.V., Patrushev V.Yu. Biochemical potential of post-spirogenic soddy-podzolic soils of ribbon and Ob pine forests of the Altai Territory, Lesnoy vestnik. 2020; 24(3) : 87-93. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-87-93.
3. Kazeev K.Sh., Bykhalova O.N., Kolesnikov S.I. The main soils in the monitoring system of the Utrish Reserve, Terrestrial and marine ecosystems of the Abrau Peninsula: history, condition, protection. 2021; 5 : 22-37. ISBN: 978-5-9902730-2-3.
4. Lavrishchev V.A., Prutsky N.I., Semenov V.M. State geological map of the Russian Federation, scale 1:200,000. Caucasian series. Ed. 2nd. St. Petersburg: St. Petersburg Cartographic Factory VSEGEI, 2002, Sheet L-37-XX.
5. Malyukova L.S., Rogozhina E.V., Strukova D.V. Diagnostics of the biofunctional state of agrogenerally modified soils under perennial plantations in the zone of humid subtropics of Russia, Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center "Subtropical Scientific Center of the Russian Academy of Sciences ", Sochi. 2022; 81. ISBN 978-5-904533-45-8.
6. Medvedeva M.V., Bakhmet O.N., Ananiev V.A., Moshnikov S.A., Mamai A.V., Moshkina E.V., Timofeeva V.V. Changes in the biological activity of soils in coniferous plantations after a fire in the middle taiga of Karelia, Lesovedenie. 2020; 6 : 560-574. DOI: 10.31857/S0024114820060066.
7. Strukova D.V., Malyukova L.S. Activity of catalase and phosphatase enzymes in acidic brown forest soils of a tea plantation in the subtropics of Russia, Subtropical and southern horticulture of Russia. 2009; 42(2) : 118-127. ISSN: 2225-3068.
8. Strukova D.V. Methodological aspects of the study of the enzymatic activity of brown forest soils of the humid subtropics of Russia, Subtropical and ornamental gardening. 2016; 57 : 202-208. ISSN: 2225-3068.
9. Tonkonogov V.D., Gerasimova M.I., Lebedeva I.I. Classification of soils in Russia. M.: Soil. in-t im. V.V. Dokuchaeva, 2008, 57-61. ISBN: 5-93520-044-9.
10. Alcaniz M., Outeiro L., Francos M., Farguell J., Ube-da X. Long-term dynamics of soil chemical properties after a prescribed fire in a Mediterranean forest (Montgri Massif, Catalonia, Spain), Science of the Total Environment. 2016; 572 : 1329-1335. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.115.
11. Bartkowiak A., Lemanowicz J. Effect of forest fire on changes in the content of total and available forms of selected heavy metals and catalase activity in soil, Soil Science Annual. 2017; 68(3) : 140. DOI: 10.1515/ssa-2017-0017.
12. Catalanotti A.E., Giuditta E., Marzaioli R., Ascoli D., Esposito A., Strumia S., Mazzoleni S., Rutigliano F.A. 2018. Effects of single and repeated prescribed burns on soil organic C and microbial activity in a Pinus halepensis plantation of Southern Italy, Applied Soil Ecology. 2018; 125 : 108-116. DOI: 10.1016/j.apsoil.2017.12.015.
13. Fernández-García V., Miesel J., Baeza M.J., Marcos E., Calvo L., Wildfire effects on soil properties in fire-prone pine ecosystems: Indicators of burn severity legacy over the medium

- term after fire, *Applied Soil Ecology*. 2019; 135 : 147-156. DOI: 10.1016/j.apsoil.2018.12.002.
14. Gömöryová E., Střelcová K., Škvarenina J., Bebej J., Gömöry D. The impact of windthrow and fire disturbances on selected soil properties in the Tatra National Park, *Soil and Water Research*. 2008; 3(1) : 74-80. ISSN: 1801-5395.
15. Gorobtsova O.N., Khezheva F.V., Uligova T.S., Tembotov R.K. Ecological and geographical regularities of changes in the biological activity of automorphic soils on the foothills and adjacent plains of the central Caucasus region (Kabardino-Balkarian Republic), *Eurasian Soil Science*. 2015; 48(3) : 303-313. DOI: 10.1134/S106422931501007X.
16. Grigorievskaya, A.Y., Gorbunova, Y.S. & Devyatova, T.A. Dynamics of the Ecological State of Soils and Flora after a Forest Fire in the European Part Russia. *Arid Ecosyst*, 2021; 11(3) : 249-255. DOI: 10.1134/S2079096121030069.
17. Hamman S.T., Burke I.C., Knapp E.E., 2008. Soil nutrients and microbial activity after early and late season prescribed burns in a Sierra Nevada mixed conifer forest, *Forest Ecology and Management*. 2008; 256(3) : 367-374. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.04.030.
18. Hedo J., Lucas-Borja M.E., Wic C., Andrés-Abellán M., and de Las Heras, J. Soil microbiological properties and enzymatic activities of long-term post-fire recovery in dry and semiarid Aleppo pine (*Pinus halepensis* M.) forest stands, *Solid Earth*. 2015; 6(1) : 243-252. DOI: 10.5194/se-6-243-2015.
19. Kazeev K., Vilкова V., Shkhatpatsev A., Bykhalova O., Rudenok Y., Nizhelskiy M., 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 Journal of Soil Science and Agroclimatology*. 2022; 19(1) : 52-59. DOI: 10.20961/stjssa.v19i1.58709.
20. Kazeev K.S., Poltoratskaya T.A., Yakimova A.S., Odobashyan M.Y., 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; 4(Suppl. 1) : 93-104. DOI: 10.24189/ncr.2019.055.
21. Kazeev K.S., Kutrovskii M.A., Dadenko E.V., Vezdeneeva L.S., Kolesnikov S.I., Valkov V.F. The influence of carbonates in parent rocks on the biological properties of mountain soils of the northwest Caucasus region, *Eurasian Soil Science*. 2012; 45(3) : 282-289. DOI: 10.1134/S1064229312030052.
22. Malcheva B., Velizarova E., Nustorova M., Molla I. Enzyme activity of forest fire-influenced soils from north slopes of Rila mountain (region of Dolna Bania), *Forestry Ideas*. 2015; 21(1) : 55-66. ISSN: 13143905.
23. Maksimova E.Y., Abakumov E.V., Kudinova A.G. Functional activity of soil microbial communities in post-fire pine stands of Tolyatti, Samara oblast, *Eurasian Soil Science*. 2017; 50(2) : 239-245. DOI: 10.1134/S1064229317020119.
24. Moya D., González-De Vega, Lozano E., García-Orenes F., Mataix-Solera J., Lucas-Borja M.E., de Las He-ras J. The burn severity and plant recovery relationship affect the biological and chemical soil properties of *Pinus halepensis* Mill. stands in the short and midterms after wildfire, *Journal of Environmental Management*. 2019; 235 : 250-256. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.01.029.
25. Pingree M.R.A., DeLuca T.H. The influence of fire history on soil nutrients and vegetation cover in mixed-severity fire regime forests of the eastern Olympic Peninsula, Washington, USA, *Forest Ecology and Management*. 2018; 422 : 95-107. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.03.037.
26. Semenenko S.Y., Morozova N.V., Marchenko S.S. Studies of the Effects of Pyrogenic Exposure on the Enzymatic Activity of Chestnut and Chernozem Soils, *Arid Ecosyst*. 2020; 10(4) : 384-389. DOI: 10.1134/S2079096120040186.
27. Verma S., Jayakumar S. Impact of forest fire on physical, chemical and biological properties of soil: A review, *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*. 2012; 2(3) : 168-176. ISSN: 2220-8860.

28. Vilkova V.V., Kazeev K.S., Shkhatpatsev A.K. et al. Reaction of the Enzymatic Activity of Soils of Xerophytic Forests on the Black Sea Coast in the Caucasus to the Pyrogenic Impact, *Arid Ecosyst.* 2022; 12(1) : 93-98. DOI: 10.1134/S2079096122010139.
29. Wang B., Xue S., Liu G.B., Li G., Ren Z.P. Changes in soil nutrient and enzyme activities under different vegetations in the Loess Plateau area, Northwest China. *Catena*, 2012; 92 : 186-195. DOI: 10.1016/j.catena.2011.12.004.
30. Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, World Soil Resources Reports. 2014; 106 : 181.
31. Yong-Mei Zhang, Ning Wu, Guo-Yi Zhou, Wei-Kai Bao. Changes in enzyme activities of spruce (*Picea balfouriana*) forest soil as related to burning in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau, *Applied Soil Ecology*, 2005; 30(3) : 215-225. DOI: 10.1016/j.apsoil.2005.01.005.

**CATALASE AND UREASE ACTIVITY AS
AN INDICATOR OF PYROGENIC DISTURBANCE IN SOIL
(UTRISH NATURE RESERVE, ABRAU PENINSULA)**

Chernenko S.P., Rogozhina E.V., Kerimzade V.V.

*Federal Research Centre
the Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,
Sochi, Russia; e-mail: ecodence@gmail.com, RogojinaEW@yandex.ru, KerimzadeVadim@ya.ru*

The catalase and urease enzyme activity in pyrogenic disturbed soils has been studied on the example of Utrish Nature Reserve which suffered from fire in 2020. The disturbance of pyrogenic soils was studied during the period of active succession in 2022 in comparison with the background soils in an area not damaged by fire and having a similar exposure and slope steepness. The studies were conducted in two upper genetic horizons (A and AB, or B). Catalase activity in the upper horizon (A) of the post-pyrogenic zone varied from 1.1 to 11.4 ml O₂/g per 1 min, in background soils – in a narrower range from 2.6 to 5.0 ml O₂/g per 1 min. Urease activity in the upper horizon (A) of the post-pyrogenic zone varied from 5.0 to 65.9 mg NH₃/10 g per day, and in background soils in a wider range from 5.9 to 103.9 mg NH₃/10 g per day. For all the studied soils (both background and pyrogenic), there was a decrease in catalase and urease activity down the profile. In the pyrogenic zone, catalase activity was on average 50 % higher than in background soils. Urease showed a less stable increase in activity under the influence of the pyrogenic factor. Increased values of catalase and urease activity correlated with a higher content of humus, the amount of exchangeable Ca²⁺ + Mg²⁺, and nitrates. The effect of soil moisture on the studied enzymes was recorded, especially in the lower horizons. It is noted that the stimulating effect of the pyrogenic factor on the studied enzyme activity depended on the position of the testing site in the relief, fire intensity in various areas and on the ash redistribution by relief elements. The obtained results demonstrated high informative value of catalase for assessing the pyrogenic soil transformation.

Key words: Utrish Nature Reserve, enzymey activity, urease, catalase, correlation, pyrogenic factor.