

УДК 574.9:551.58;631.46

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТА НА ФЕРМЕНТАТИВНУЮ АКТИВНОСТЬ ЛЕСНЫХ ПОЧВ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА¹

© 2022 г. Ю. С. Козунь^а *, К. Ш. Казеев^а, С. И. Колесников^а^аАкадемия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского ЮФУ,
пр-кт Стачки, д. 194/1, Ростов-на-Дону, 344006 Россия

*E-mail: Kuz.yuliya@mail.ru

Поступила в редакцию 22.10.2021 г.

После доработки 23.11.2021 г.

Принята к публикации 02.02.2022 г.

Рассматривается влияние климатических факторов на ферментативную активность зональных почв Северо-Западного Кавказа: бурую лесную, серую лесную и серую лесостепную. Проведен корреляционный анализ тесноты связи климатических показателей и почвенных ферментов (каталазы, дегидрогеназы, инвертазы, пероксидазы и полифенолоксидазы). Среди климатических параметров выбраны среднегодовая температура, среднемесячные температуры января и июля, среднегодовая амплитуда температур, среднегодовое количество осадков, количество осадков за вегетационный период, а также индексы и коэффициенты, отражающие сочетанное действие факторов климата (коэффициент увлажнения Иванова, индекс аридности де Мартона и индекс континентальности Горчинского). Установлена тесная корреляционная связь активностей каталазы и пероксидазы со всеми показателями климата. Активность дегидрогеназы определяется показателями влажности, а активность инвертазы, наоборот, в большей степени зависит от температурных показателей климата. Для активности полифенолоксидазы верхних горизонтов почв не установлено связи с климатом, при этом суммарная активность всего профиля имеет от него тесную корреляционную зависимость. Значения интегрального показателя биологического состояния (ИПБС) по профилю почв снижаются по мере увеличения количества осадков и снижения температуры. Климат оказывает влияние не только на верхние горизонты почв, которые непосредственно подвергаются действию среды, но и на весь почвенный профиль.

Ключевые слова: лесные почвы, биологические свойства почв, ферментативная активность почв, интегральный показатель биологического состояния, биодиагностика, климат.

DOI: 10.31857/S002411482203010X

Климат зависит от географического положения территории, которое определяет приток солнечной энергии и количество осадков. Основные составляющие климата — температура воздуха, количество осадков, наличие ветра и многолетней мерзлоты. Осадки и температура определяют водный и тепловой режимы почвы, ее влажность, скорость и характер превращения органических остатков, минерализацию гумуса, разрушение минеральной части почвы.

Почвенные и климатические характеристики находятся в тесной связи. Известны работы в области экологии почв по установлению закономерных связей в широком географическом плане между климатическими показателями и различными почвенными свойствами (Волобуев, 1956; Ковда, 1973), в частности ферментативной активности (De Oliveira et al., 2020).

Так как климат играет значительную роль в образовании почвы, то она, в свою очередь, является источником познания исторического изменения климата, сохраняя в себе свойства прошлых эпох (Каширская и др., 2013). Среди компонентов биотопа наибольшей скоростью изменения под влиянием климата обладают режимы температуры и влажности, газовый состав и биотические параметры почв (Кудеяров и др., 2009). Причем по происходящим сейчас процессам в почве можно судить о будущих глобальных изменениях климата. Почва и ее свойства являются индикаторами глобальных изменений климата (Рожков, 2009).

Ожидается, что изменение климата приведет к повышению средней температуры в ближайшее десятилетие более чем на 2°C и к изменению характера распределения осадков (Brown and Caldeira, 2017). Особое влияние эти изменения окажут на лесные экосистемы, приведут к изменению видового состава деревьев (Фонти, Прокушкин, 2021), повлияют на микробные почвенные сообщества (Bouskill et al., 2016). Вследствие чего изменятся

¹ Исследование выполнено при государственной поддержке ведущей научной школы Российской Федерации (НШ 449.2022.5).

Таблица 1. Климатические параметры исследуемых участков

Участок	Почва	Географические координаты		Высота над уровнем моря, м
		с.ш.	в.д.	
п. Гузерипль, лес	Бурая лесная	44°01	40°09	689
п. Даховская, лес	Серая лесная	44°12	40°11	502
г. Майкоп, лес	Серая лесостепная	44°07	40°07	289

такие процессы в экосистемах, как разложение, круговорот веществ и активность внеклеточных ферментов. Знание о зависимости почвенных процессов от климата дает возможность спрогнозировать эволюцию почвенного покрова при глобальном изменении климата.

Представляемая работа является частью цикла научных исследований по изучению влияния факторов среды, в том числе климата, на биологические свойства почв Юга России (Колесников и др., 2000; Казеев и др., 2002; Казеев и др., 2004; Казеев, Кузнецова, 2010; Кузнецова, Казеев, 2010; Горобцова и др., 2021). Цель настоящего исследования — изучение и описание воздействия отдельных климатических характеристик и их совокупности на ферментативную активность почв Северного Кавказа. В качестве исследуемых ферментов выбраны активности каталазы, дегидрогеназы, инвертазы, пероксидазы и полифенолоксидазы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

В данной работе изучены зональные почвы Северо-Западного Кавказа: бурая лесная, серая лесная и серая лесостепная. Объекты исследования расположены на территории республики Адыгеи (табл. 1). Высота над уровнем моря варьирует в пределах 250–700 м. Бурая лесная почва изучена в окрестностях поселка Гузерипль. Участок представлен пихтово-буковым лесом с мощной листовый подстилкой. Мощность почвы составляет 40 см. Бурые лесные почвы широко распространены на Северном Кавказе. Формируются в теплом, хорошо увлажненном климате. Осадки, выпадающие круглогодично, обеспечивают глубокое промачивание почвы. Почвы характеризуются высокой биологической активностью верхнего горизонта и резким ее снижением вниз по профилю. Серая лесная почва отобрана на участке буково-грабового леса в окрестностях поселка Даховская. Мощность почвы составляет 60 см. Поверхность почвы покрыта опадом лишь на 20–30%. Главное экологическое отличие серых лесных почв Северного Кавказа от почв других регионов состоит в том, что они не промерзают в течение всего года. На исследуемой территории не наблюдается сплошной полосы серых лесных почв, они встречаются отдельными участками между буры-

ми лесными и различными подтипами слитых почв лесостепей. Серая лесостепная почва отобрана в окрестностях города Майкоп. Мощность почвы 80 см. Участок представлен буково-дубовым лесом. Территория характеризуется меньшим количеством осадков и более высокой температурой по сравнению с горными районами (Вальков и др., 2008).

При передвижении на север, с уменьшением высоты над уровнем моря, наблюдается снижение среднегодового количества осадков, увеличение среднегодовой температуры и среднегодовой амплитуды. Снижается коэффициент увлажнения и индекс аридности де Мартона, климат становится более аридным. Лесные районы заменяются лесостепью, что оказывает значительное влияние на почвенный покров. Мелкопрофильные горные лесные почвы заменяются на более мощные лесостепные.

Для установления зависимостей ферментативной активности от климата выбраны следующие климатические характеристики: среднегодовое количество осадков, сумма осадков за вегетационный период, среднемесячные температуры января и июля, среднегодовая амплитуда температур. Для рассмотрения сочетанного влияния факторов на ферменты использованы климатические коэффициенты и индексы: коэффициент увлажнения Иванова, индекс аридности де Мартона, индекс континентальности Горчинского (табл. 2).

Индекс аридности де Мартона: $I_a = P/(T + 10)$, где P — годовое количество осадков, T — среднегодовая температура.

Индекс континентальности по Горчинскому: $K = 1.74A/\sin\varphi$, где A — годовая амплитуда температуры, φ — широта местности.

Коэффициент увлажнения Иванова: $K = P/E \times 100$, где P — годовое количество осадков, E — годовая испаряемость.

При получении аналитических данных, используемых в настоящей работе, применялась разработанная и апробированная методология исследования биологической активности (Вальков и др., 2008) с использованием общепринятых в почвоведении и биологии методов (Казеев, Колесников, 2012; Хазиев, 1990).

В основу исследований был положен системный подход к познанию природных объектов и

Таблица 2. Основные климатические показатели и климатические индексы исследуемой территории (aisori-m.meteo.ru)

Почва	Среднегодовое количество осадков, мм	Сумма осадков за вегетационный период, мм	Среднегодовая температура, °С	Средняя температура июля, °С	Средняя температура января, °С	Средняя годовая амплитуда температур	Индекс аридности де Маргона	Индекс континентальности по Горчинскому	Коэффициент увлажнения по Иванову
Серая лесостепная	702	453	10.5	22.1	−1.7	23.8	34.2	59.5	81
Серая лесная	738	492	9.0	19.6	−2.0	21.6	38.8	53.9	120
Бурая лесная	1132	646	8.2	18.2	−2.2	20.4	62.2	51.1	221

явлений. Изучение биологической активности почв проводилось в двух аспектах: сравнительно-географическом и профилно-генетическом. Изучена ферментативная активность верхних горизонтов и рассчитана суммарная активность для всего профиля.

Для изучения профилей почв и отбора почвенных образцов для последующих лабораторных работ были заложены полнопрофильные разрезы и прикопки к ним на типичных по рельефу и растительности ключевых участках. Географические координаты определены GPS навигатором Garmin. Были определены активность каталазы, инвертазы, дегидрогеназы, пероксидазы и полифенолоксидазы (Казеев и др., 2012). В связи с тем, что ферментативная активность почв отличается значительным природным варьированием, почвенные образцы отобраны в сходных погодных условиях в течение одного дня.

Активность каталазы определяли волюметрическим методом по выделению кислорода при разложении 3% раствора перекиси водорода, дегидрогеназы — фотоколориметрическим методом с использованием в качестве субстрата 2,3,5-трифенилтетразолий хлористый. Активность инвертазы определяли колориметрическим методом с использованием реактива Фелинга по концентрации глюкозы, инвертированной при разложении 3% раствора сахарозы. Для определения активностей пероксидазы и полифенолоксидазы использовали колориметрические методы, в которых ферментными субстратами служит гидрохинон. Активность почвенных ферментов изучали при естественной pH почвы. Для определения различий в уровне биогенности и биологической активности разных почв определяли интегральный показатель биологического состояния (ИПБС) почвы (Казеев и др., 2012). Для этого максимальное значение каждого из показателей принимали за 100% и по отношению к нему в процентах вы-

ражали значение этого же показателя в остальных образцах:

$$B_1 = \frac{Bx}{B_{\max}} \times 100\%,$$

где B_1 — относительный балл показателя; Bx — фактическое значение показателя; $B_{\max}$ — максимальное значение показателя.

После этого рассчитывали средний оценочный балл изученных показателей для образца (варианта), абсолютные значения которых не могут быть суммированы, так как имеют разные единицы измерения. ISBI почвы рассчитывали аналогично формуле (1):

$$ISBI = \frac{Bm}{B_{m\max}} \times 100\%,$$

где Bm — средний оценочный балл всех показателей; $B_{m\max}$ — максимальный оценочный балл всех показателей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования установлено, что изучаемые почвы по активности каталазы и инвертазы в верхних горизонтах относятся к среднеобогатенным (Звягинцев, 1978). По активности дегидрогеназы серая лесная и серая лесостепная относятся к богатым, в то время как бурая лесная — к среднеобогатенным. Что касается профилного распределения ферментов, то выявлен убывающий характер распределения в профиле активностей каталазы и инвертазы во всех почвах (рис. 1). Отмечена наименьшая активность дегидрогеназы в верхнем горизонте бурой лесной почвы. Максимальную активность дегидрогеназы в верхнем горизонте и по всему профилю имеет серая лесная почва. В профилном распределении активностей пероксидазы и полифенолоксидазы наблюдаются инверсии.

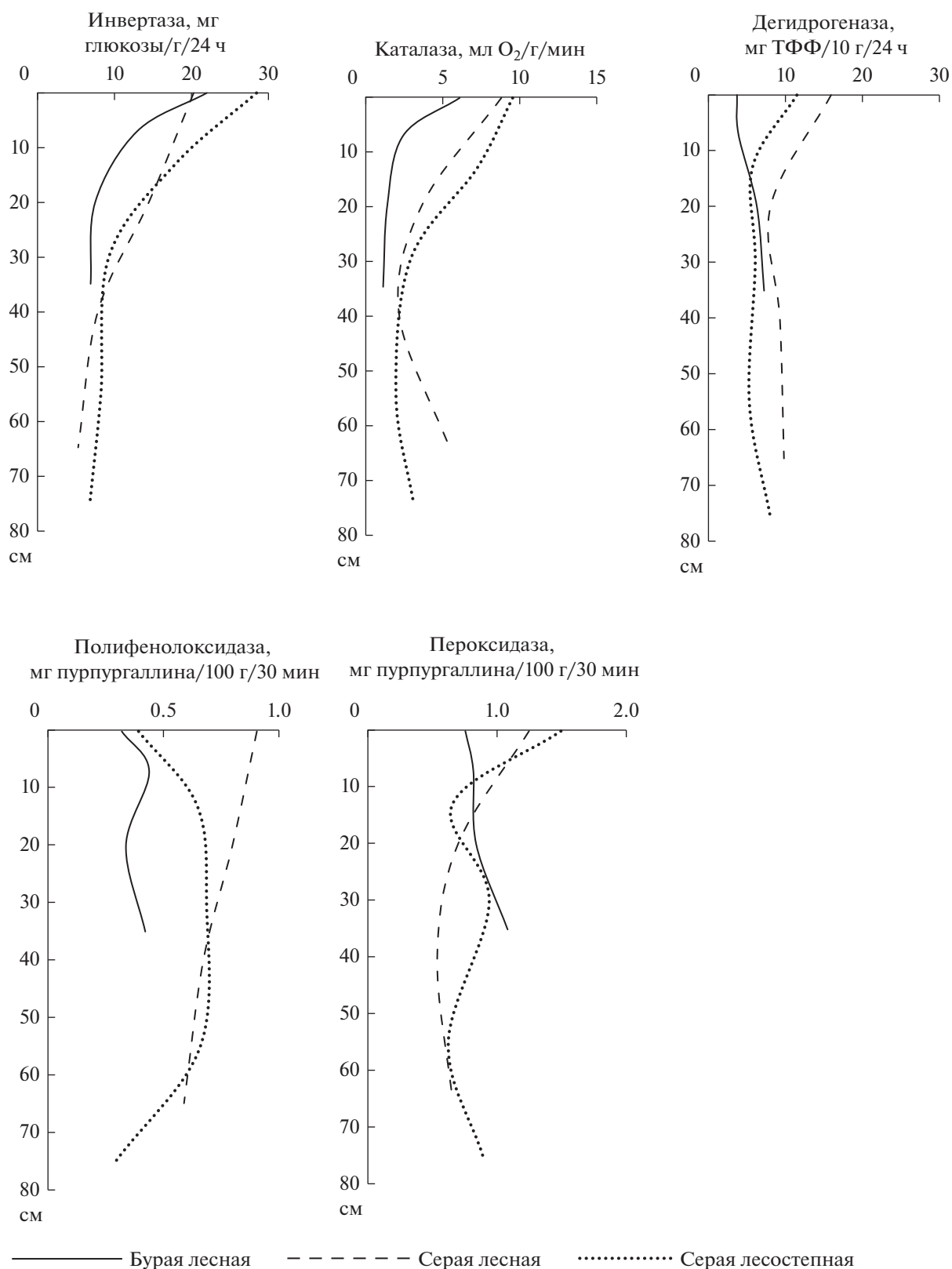


Рис. 1. Распределение ферментативной активности в профилях лесных почв.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции зависимости ферментативной активности от климатических показателей

	Каталаза	Инвертаза	Дегидрогеназа	Полифенолоксид аза	Пероксидаза	ИПБС
Среднегодовое количество осадков	−0.99 −1.00	−0.39 −0.94	−0.90 −0.97	−0.53 −0.99	−0.97 −0.89	−0.97 −1.00
Сумма осадков за вегетационный период	−1.00 −0.99	−0.49 −0.97	−0.85 −0.93	−0.43 −0.97	−0.99 −0.93	−0.93 −1.00
Среднегодовая температура	0.88 0.80	0.85 0.96	0.48 0.64	−0.06 0.72	0.93 0.99	0.64 0.84
Средняя температура июля	0.89 0.80	0.85 0.96	0.50 0.65	−0.05 0.73	0.94 0.99	0.65 0.85
Средняя температура января	0.91 0.83	0.82 0.98	0.54 0.68	0.00 0.76	0.95 1.00	0.69 0.87
Средняя годовая амплитуда температур	0.88 0.80	0.85 0.96	0.49 0.64	−0.05 0.72	0.94 0.99	0.65 0.84
Индекс аридности де Мартона	−1.00 −0.99	−0.46 −0.97	−0.87 −0.94	−0.47 −0.97	−0.98 −0.92	−0.95 −1.00
Индекс континентальности по Горчинскому	0.87 0.79	0.86 0.96	0.47 0.63	−0.08 0.71	0.93 0.99	0.63 0.83
Коэффициент увлажнения по Иванову	−1.00 −0.97	−0.56 −0.99	−0.80 −0.90	−0.36 −0.94	−1.00 −0.96	−0.90 −0.99

Примечание. Верхние значения приведены для поверхностных горизонтов, нижние — с учетом всего профиля. Жирным выделены значения при $p < 0.05$.

Температура является одним из ведущих факторов, оказывающих влияние на биологическую активность почв. Но если для степных аридных районов характерна обратная зависимость активности ферментов со среднегодовой температурой и среднегодовой амплитудой температур (Казеев и др., 2015), то для лесных гумидных районов установлена тесная прямая зависимость (Baldrian et al., 2013). В лесных почвах лимитирующим фактором для ферментативной активности является тепло, в то время как в степных: черноземах и каштановых почвах — количество осадков.

Проведенный корреляционный анализ показал (табл. 3), что ферментативная активность имеет тесную связь с климатическими факторами. Для активностей каталазы, инвертазы и пероксидазы установлена тесная положительная корреляционная связь со среднегодовой температурой, средней температурой июля и января, амплитудой температур. Изменения активности ферментов с повышением температуры могут быть связаны с усилением столкновения между субстратом и ферментом, вызванным температурным ускорением броуновского движения (Blagodatskaya et al., 2016), а также с изменением стабильности и сродства фермента к субстрату (Datta et al., 2017; Davidson et al., 2006). Увеличение среднегодового количества осадков приводит к уменьшению активностей каталазы и пероксидазы. Количество осадков оказывает влияние

только на суммарную активность инвертазы, на активность верхних горизонтов не установлено достоверного воздействия.

Выявлено влияние показателей климата на суммарную активность полифенолоксидазы, при этом климат не влияет на распределение фермента в верхних горизонтах. Полифенолоксидаза более чувствительна к гидротермическим показателям почвы по сравнению с другими исследуемыми ферментами, поэтому ее активность в верхних горизонтах обуславливается в большей степени значениями температуры и влажности в конкретный период (Lia et al., 2022). Что касается активности дегидрогеназы, то не установлено влияния температурных показателей на активность фермента. При этом исследования зависимости активности дегидрогеназы от термических показателей в лабораторных условиях показывают высокую чувствительность фермента к температуре, особенно в диапазоне 5–15°C (Li et al., 2022).

Использование климатических коэффициентов и индексов позволяет рассмотреть сочетанное действие климатических факторов. Как и при индивидуальном рассмотрении климатических показателей, активности каталазы и пероксидазы имеют сильную корреляционную связь со всеми рассматриваемыми коэффициентами. Для дегидрогеназы установлена связь только с индексом аридности де Мартона и коэффициентом увлажнения Иванова, т. к. при их расчете используется

среднегодовое количество осадков. Индекс континентальности Горчинского, при расчете которого учитывается географическое положение участка, имеет связь с активностями каталазы, инвертазы, пероксидазы и суммарной активностью полифенолоксидазы.

Для обобщения влияния климатических показателей на биологические свойства почв использовали интегральный показатель биологического состояния (ИПБС). При расчете ИПБС учитывались все исследуемые биологические показатели. Расчет ИПБС проводили в двух аспектах: ИПБС верхних горизонтов почв, где учитывались значения биологических показателей только для верхних горизонтов, и ИПБС профиля, где учитывали биологическую активность по всему профилю почвы до горизонта С. В результате вычислений было выявлено, что ИПБС верхних горизонтов в меньшей степени зависит от значений климатических показателей. Отмечена более тесная связь ИПБС верхних горизонтов со среднегодовым количеством осадков и суммой осадков за вегетационный период, чем с температурными показателями. ИПБС профиля имеет высокую и очень высокую степень зависимости от всех показателей климата. Таким образом, при изучении воздействий климата на почву необходимо учитывать его влияние на весь почвенный профиль, а не только на верхние горизонты, которые непосредственно соприкасаются с окружающей средой, и их биологическое состояние определяется в большей степени конкретными погодными условиями. Если температура климата возрастет согласно прогнозам, то активность ферментов в данных экосистемах существенно возрастет.

Из приведенных выше результатов можно сделать следующие выводы: климатические условия оказывают значительное влияние на ферментативную активность почв Северо-Западного Кавказа. Из всех исследуемых показателей наиболее зависимыми от климата оказались каталазы и пероксидазы. Активность дегидрогеназы определяется в большей степени показателями влажности климата. Климат оказывает воздействие не только на верхние "соприкасающиеся" с окружающей средой горизонты, но и на нижележащие. Так, для суммарной биологической активности полифенолоксидазы выявлена тесная зависимость от климата, в то время как для верхних горизонтов связи не установлено. Именно почвенный профиль в большей степени отражает действие климата, в то время как верхние горизонты подвержены краткосрочным воздействиям погоды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

Волобуев В.Р. Климатические условия и почвы // Почвоведение. 1956. № 4. С. 25–37.

Горобцова О.Н., Улигова Т.С., Гедгафова Ф.В., Темботов Р.Х., Хакунова Е.М. Биологическая активность почв в поясе широколиственных лесов Центрального Кавказа // Лесоведение. 2021. № 1. С. 78–92.

Звягинцев Д.Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. 1978. № 6. С. 48–54.

Казеев К.Ш., Козин В.К., Колесников С.И., Вальков В.Ф. Биологические особенности почв влажных субтропиков России // Почвоведение. 2002. № 12. С. 1474–1478.

Казеев К.Ш., Козунь Ю.С., Колесников С.И. Использование интегрального показателя для оценки пространственной дифференциации биологических свойств почв юга России в градиенте аридности климата // Сибирский экологический журн. 2015. Т. 22. № 1. С. 112–120.

Казеев К.Ш., Колесников С.И. Биодиагностика почв: методология и методы исследований. Ростов-на-Дону: ЮФУ. 2012. 380 с.

Казеев К.Ш., Кузнецова Ю.С. Эколого-биологические особенности аридных почв Прикаспийской низменности // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2010. № 5. С. 83–85.

Казеев К.Ш., Фомин С.Е., Колесников С.И., Вальков В.Ф. Биологические свойства локально переувлажненных почв Ростовской обл. // Почвоведение. 2004. № 3. С. 361–372.

Каширская Н.Н., Хомутова Т.Э., Демкина Т.С., Салманова К.А., Кузнецова Ю.С., Демкин В.А. Биологическая активность современной и погребенной каштановых почв сухих степей // Аридные экосистемы. 2013. Т. 19. № 2(55). С. 64–72.

Ковда В.А. Основы учения о почвах. М.: Наука, 1973. Т. 1–2.

Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Влияние загрязнения тяжелыми металлами на эколого-биологические свойства чернозема обыкновенного // Экология. 2000. № 3. С. 193–201.

Кудяров В.Н., Демкин В.А., Гиличинский Д.А., Горячкин С.В., Рожков В.А. Глобальные изменения климата и почвенный покров // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1027–1042.

Кузнецова Ю.С., Казеев К.Ш. Влияние засоления на биологические свойства гидроморфных почв ильменей Астраханской области // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2010. № 1. С. 90–93.

Рожков В.А. Почвы и почвенный покров — свидетели и индикаторы глобальных изменений климата // Почвоведение. 2009. № 2. С. 134–143.

Фонти М.В., Прокушкин А.С. Климатически обусловленная изменчивость радиального прироста березы пушистой в криолитозоне средней Сибири // Лесоведение. 2021. № 5. С. 460–471.

Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 1990. 189 с.

Baldrian P., Šnajdr J., Valášková V. Responses of the extracellular enzyme activities in hardwood forest to soil temperature and seasonality and the potential effects of climate

change // *Soil Biology and Biochemistry*. 2013. V. 56. P. 60–68.

Blagodatskaya E., Blagodatsky S., Khomyakov N., Myachina O., Kuzyakov Y. Temperature sensitivity and enzymatic mechanisms of soil organic matter decomposition along an altitudinal gradient on Mount Kilimanjaro // *Scientific Reports*. 2016. № 6. P. 1–11, doi.org/https://doi.org/10.1038/srep22240

Bouskill N.J., Wood T.E., Baran R., Ye Z., Bowen B.P., Lim H., Zhou J., J.D. van Nostrand, Nico P., Northen T.R., Silver W.L., Brodie E.L. Belowground response to drought in a tropical forest soil. I. changes in microbial functional potential and metabolism // *Frontiers in Microbiology*. 2016. № 7. P. 525.

Brown P., Caldeira K. Greater future global warming inferred from Earth's recent energy budget. *Nature*. 2017. № 552. P. 45–50. https://doi.org/10.1038/nature24672

Datta R., Anand S., Moulick A., Baraniya D., Pathan S.I., Rejsek K., Vranova V., Sharma M., Sharma D., Kelkar A., Formanek P. How enzymes are adsorbed on soil solid phase and factors limiting its activity: a review // *International Ag-*

rophysics. 2017. V. 31. № 2. P. 287–302. https://doi.org/10.1515/intag-2016-0049

Davidson E.A., Janssens I.A., Luo Y.Q. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q (10) // *Global Change Biology*. 2006. V. 12. № 2. P. 154–164. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01065.x

De Oliveira T.B., de Lucas R.C., de Moraes Polizeli M.L.T. Effects of multiple climate change factors on exoenzyme activities and CO₂ efflux in a tropical grassland // *Soil Biology and Biochemistry*. 2020. V. 148.

Li H., Tian H., Wang Z., Liu C., Nurzhan A., Megharaj M., He W. Potential effect of warming on soil microbial nutrient limitations as determined by enzymatic stoichiometry in the farmland from different climate zones // *Science of The Total Environment*. 2022. V. 802. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149657

Lia Q., Jiab W., Zhang Q., Cheng X. Localized plant-soil-microbe interactions regulate spatial variations of soil oxidase activities within afforested systems in a subtropical area // *Geoderma*. 2022. V. 406. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115499

Climate's Affect on the Northern Caucasian Forest Soils' Enzymatic Activity

Yu. S. Kozun^{1,*}, K. Sh. Kazeev¹, and S. I. Kolesnikov¹

¹Ivanovsky's Academy of Biology and Biotechnology, Stachki ave., 194/1, Rostov-on-Don, 344006 Russia

*E-mail: Kuz.yuliya@mail.ru

The study considers the influence of climatic factors on the enzymatic activity of zonal soils of the North-western Caucasus: brown forest soils, grey forest soils and grey forest-steppe soils. A correlation analysis of the relationship strength between climatic parameters and the soil enzymes (catalase, dehydrogenase, invertase, peroxidase, and polyphenol oxidase) was carried out. Among the climatic parameters, the following were chosen: the average annual temperature, the average monthly temperatures of January and July, the average annual temperatures range, the average annual precipitation and the amount of precipitation during the growing season, as well as indices and coefficients reflecting the combined effect of climatic factors (Ivanov's humidification coefficient, de Marton's aridity index and the Gorchinsky's continentality index). A close correlation was established between the activities of catalase and peroxidase and all the climatic indicators. The dehydrogenase activity was found to be determined by humidity indicators, while the invertase activity, on the contrary, depends to a greater extent on temperature indicators of the climate. The activity of polyphenol oxidase in the upper soil horizons was not found to be related to climate, while the total activity of the entire profile had a close correlation dependence on it. The values of the biological state integral indicator (BSII) in the soil profile decreased as the amount of precipitation was increasing and the temperature was decreasing. The climate affects not only the upper soil horizons, which are directly exposed to the environment, but the entire soil profile.

Keywords: forest soils, soil biological properties, soil enzymatic activity, biological state integral indicator, biagnostics, climate.

Acknowledgements: The study has been carried out with a support from the leading scientific school of the Russian Federation (NSh-2511.2020.11).

REFERENCES

Baldrian P., Šnajdr J., Valášková V., Responses of the extracellular enzyme activities in hardwood forest to soil temperature and seasonality and the potential effects of climate change, *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, Vol. 56, pp. 60–68.

Blagodatskaya E., Blagodatsky S., Khomyakov N., Myachina O., Kuzyakov Y., Temperature sensitivity and en-

zymatic mechanisms of soil organic matter decomposition along an altitudinal gradient on Mount Kilimanjaro, *Scientific Reports*, 2016, No. 6, pp. 1–11, doi.org/10.1038/srep22240

Bouskill N.J., Wood T.E., Baran R., Ye Z., Bowen B.P., Lim H., Zhou J., J.D. van Nostrand, Nico P., Northen T.R., Silver W.L., Brodie E.L., Belowground response to drought in a tropical forest soil. I. changes in microbial functional

- potential and metabolism, *Frontiers in Microbiology*, 2016, No. 7, pp. 525.
- Brown P., Caldeira K., Greater future global warming inferred from Earth's recent energy budget, *Nature*, 2017, No. 552, pp. 45–50.
doi 10.1038/nature24672
- Datta R., Anand S., Moulick A., Baraniya D., Pathan S.I., Rejsek K., Vranova V., Sharma M., Sharma D., Kelkar A., Formanek P., How enzymes are adsorbed on soil solid phase and factors limiting its activity: a review, *International Agrophysics*, 2017, Vol. 31, No. 2, pp. 287–302.
doi 10.1515/intag-2016-0049
- Davidson E.A., Janssens I.A., Luo Y.Q., On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q (10), *Global Change Biology*, 2006, Vol. 12, No. 2, pp. 154–164.
doi 10.1111/j.1365-2486.2005.01065.x
- De Oliveira T.B., de Lucas R. C., de Moraes Polizeli M.L.T., Effects of multiple climate change factors on exoenzyme activities and CO₂ efflux in a tropical grassland, *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, Vol. 148.
DOI 10.1016/j.soilbio.2020.107877
- Fonti M.V., Prokushkin A.S., Klimaticheski obuslovlennaya izmenchivost' radial'nogo prirosta berezy pushistoi v kriolitozone srednei Sibiri (Climat-induced variations in radial growth of downy birch in the middle Siberia cryolithozone), *Lesovedenie*, 2021, No. 5, pp. 460–471.
- Gorobtsova O.N., Uligova T.S., Gedgafova F.V., Tembotov R.K., Khakunova E.M., Biologicheskaya aktivnost' pochv v poyase shirokolistvennykh lesov Tsentral'nogo Kavkaza (Biological activity of soils of the deciduous forests belt in Central Caucasus), *Lesovedenie*, 2021, No. 1, pp. 78–92.
- Kashirskaya N.N., Khomutova T.E., Demkina T.S., Demkin V.A., Salmanova K.A., Kuznetsova Y.S., Biological activity of modern and buried dry-steppe chestnut soils, *Arid Ecosystems*, 2013, Vol. 3, No. 2, pp. 106–112.
- Kazeev K.S., Fomin S.E., Kolesnikov S.I., Val'kov V.F., Biological properties of locally hydromorphic soils in Rostov oblast, *Eurasian Soil Science*, 2004, Vol. 37, No. 3, pp. 310–320.
- Kazeev K.S., Kolesnikov S.I., *Biodiagnostika pochv: metodologiya i metody issledovaniy* (Biodiagnostic of soils: the methodology and methods of researches), Rostov-on-Don: YuFU, 2012, 380 p.
- Kazeev K.S., Kozin V.K., Kolesnikov S.I., Val'kov V.F., Biologicheskie osobennosti pochv vlazhnykh subtropikov Rossii (Biological features of soils in humid subtropics of Russia), *Pochvovedenie*, 2002, No. 12, pp. 1474–1478.
- Kazeev K.S., Kozun' Y.S., Kolesnikov S.I., Applying an integral index to evaluate the spatial differentiation of biological properties of soils along an aridity gradient in the south of Russia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2015, Vol. 8, No. 1, pp. 91–98.
- Kazeev K.S., Kuznetsova Y.S., Ekologo-biologicheskie osobennosti aridnykh pochv Prikaspiiskoi nizmennosti (Ecological and biological features of arid soils of Caspian lowland), *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki*, 2010, No. 5, pp. 83–85.
- Khaziev F.K., *Metody pochvennoi enzimologii* (Methods of soil enzymology), Moscow: Nauka, 1990, 189 p.
- Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Val'kov V.F., Effects of heavy metal pollution on the ecological and biological characteristics of common chernozem, *Russian J. Ecology*, 2000, Vol. 31, No. 3, pp. 174–181.
- Kovda V.A., *Osnovy ucheniya o pochvakh* (Basics of soils science), Moscow: Nauka, 1973. Vol. 1–2.
- Kudeyarov V.N., Demkin V.A., Gilichinskii D.A., Goryachkin S.V., Rozhkov V.A., Qlobal climate changes and the soil cover, *Eurasian Soil Science*, 2009, Vol. 42, No. 9, pp. 953–966.
- Kuznetsova Y.S., Kazeev K.S., Vliyanie zasoleniya na biologicheskie svoystva gidromorfnykh pochv il'menei Astrakhanskoi oblasti (Salinification influence on biological properties of hydromorphic soils of the Astrakhan region), *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki*, 2010, No. 1, pp. 90–93.
- Li H., Tian H., Wang Z., Liu C., Nurzhan A., Megharaj M., He W., Potential effect of warming on soil microbial nutrient limitations as determined by enzymatic stoichiometry in the farmland from different climate zones, *Science of The Total Environment*, 2022, Vol. 802. 10.1016/j.scitotenv.2021.149657
- Lia Q., Jiab W., Zhangc Q., Cheng X., Localized plant-soil-microbe interactions regulate spatial variations of soil oxidase activities within afforested systems in a subtropical area, *Geoderma*, 2022, Vol. 406.
doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115499
- Rozhkov V.A., Soils and the soil cover as witnesses and indicators of global climate change, *Eurasian Soil Science*, 2009, Vol. 42, No. 2, pp. 118–128.
- Val'kov V.F., Kazeev K.S., Kolesnikov S.I., *Pochvy yuga Rossii: genezis, geografiya, klassifikatsiya, ispol'zovanie i okhrana* (Soils of the South of Russia: genesis, geography, classification, usage and protection), Rostov-on-Don: Izd-vo Everest, 2008, 276 p.
- Volobuev V.R., Klimaticheskie usloviya i pochvy (Climatic conditions and soils), *Pochvovedenie*, 1956, No. 4, pp. 25–37.
- Zvyagintsev D.G., Biologicheskaya aktivnost' pochv i shkaly dlya otsenki nekotorykh ee pokazatelei (Biological activity of soils and scales for assessing some of its indicators), *Pochvovedenie*, 1978, No. 6, pp. 48–55.