

Научная статья

УДК 581.5:631.465

DOI: 10.32516/2303-9922.2025.55.5

Влияние эдафических факторов на активность ферментов почвы в подкромовом пространстве древесных растений в условиях Кемеровской области

Оксана Леонидовна Цандекова

Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук, Кемерово, Россия, zandekova@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9768-3084>

Аннотация. В статье представлены результаты влияния эдафических факторов на активность гидролитических ферментов (инвертазы, протеазы, фосфатазы) почвы в подкромовом пространстве древесных видов. Объектом исследований служили почвы под кроной деревьев (*Acer negundo* L., *Betula pendula* Roth, *Prunus padus* L.), произрастающих в условиях нарушенных фитоценозов г. Кемерово. В исследуемых образцах выявлена сезонная динамика содержания почвенных ферментов с летним максимумом. Содержание почвенных ферментов под кроной всех исследуемых древесных видов выше на 6—9%, чем вне кроны. У образцов активность инвертазы преобладала над другими гидролазами в почве. Максимальные отличия от контроля по активности инвертазы и протеазы выявлены на площадке с участием *P. padus* (в среднем на 11 и 9% соответственно), по активности фосфатазы — на площадке с участием *A. negundo* (на 11%). Полученные данные можно использовать в мониторинговых исследованиях для оценки состояния почвенной микробиоты.

Ключевые слова: фитомасса, почва, влажность, клен ясенелистный, береза повислая, черемуха обыкновенная, гидролитические ферменты.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ УУХ СО РАН по теме «Разработка научных основ оценки состояния и восстановления флористического разнообразия *in situ* и *ex situ* в регионах с высокой степенью деградации экосистем в результате антропогенного и техногенного воздействий» (номер государственной регистрации 124041100075-7).

Для цитирования: Цандекова О. Л. Влияние эдафических факторов на активность ферментов почвы в подкромовом пространстве древесных растений в условиях Кемеровской области // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. 2025. № 3 (55). С. 68—77. URL: http://vestospu.ru/archive/2025/articles/55/5_55_2025.pdf. DOI: 10.32516/2303-9922.2025.55.5.

Original article

The influence of edaphic factors on the activity of soil enzymes in the under-tree space of woody plants in the conditions of the Kemerovo region

Oksana L. Tsandekova

Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry, SB RAS, Kemerovo, Russia, zandekova@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9768-3084>

Abstract. The article presents the results of the influence of edaphic factors on the activity of hydrolytic enzymes (invertase, protease, phosphatase) of the soil in the under-crown space of tree species. The object of the study was the soils under the crown of trees (*Acer negundo* L., *Betula pendula* Roth, *Prunus padus* L.), growing in the conditions of disturbed phytocenoses in Kemerovo. Seasonal dynamics of the content of soil enzymes with a summer maximum in the studied samples was revealed. The content of soil enzymes under the crown of all the studied tree species is 6—9% higher than outside the crown. Invertase activity prevailed over other hydrolases in the soil in the samples. The maximum differences from the control in invertase and protease activity were found

© Цандекова О. Л., 2025

in the site with *P. padus* (on average by 11 and 9%, respectively), and in phosphatase activity — in the site with *A. negundo* (by 11%). The obtained data can be used in monitoring studies to assess the state of soil microbiota.

Keywords: phytomass, soil, humidity, maple ash, white birch, bird cherry, hydrolytic enzymes.

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences on the topic “Development of scientific foundations for assessing the state and restoration of floristic diversity in situ and ex situ in regions with a high degree of ecosystem degradation as a result of anthropogenic and technogenic impacts” (state registration number 124041100075-7).

For citation: Tsandekova O. L. The influence of edaphic factors on the activity of soil enzymes in the under-tree space of woody plants in the conditions of the Kemerovo region. *Vestnik of Orenburg State Pedagogical University. Electronic Scientific Journal*, 2025, no. 3 (55), pp. 68—77. DOI: <https://doi.org/10.32516/2303-9922.2025.55.5>.

Введение

Древесным растениям принадлежит важная роль в экологических и эдафических преобразованиях наземных экосистем [7; 20]. Они создают оптимальные условия для почвообразовательных процессов, которые способствуют аккумуляции основных питательных элементов и органического вещества в почве. В фитоценозах наиболее сильное влияние растения оказывают на структуру почвы в пределах доступа корневых систем благодаря механико-биохимическому преобразованию ими почвенных элементов, а также в пределах кроны деревьев [25]. В подкроновом пространстве древесных насаждений почва может трансформироваться под воздействием природных и антропогенных факторов [9; 17].

Почвенные ферменты оказывают существенное влияние на процессы разложения растительного опада и органического вещества почвы. Они отличаются строгой специфичностью, высокой активностью и зависимостью от факторов окружающей среды. Гидролитические ферменты (протеаза, фосфатаза, инвертаза) осуществляют важные процессы метаболизма в почве [3; 11; 19]. Инвертазы играют значительную роль в формировании устойчивости к влиянию абиотических факторов и принимают участие в биосинтезе углеводов. Активность фермента показывает наличие в почве легкоподвижных биологически активных форм органического вещества. Протеолитические ферменты принимают участие в минерализации белковых соединений и способствуют аккумуляции азота. Фосфатазы контролируют активность процессов мобилизации органического фосфора почвы и ускоряют реакции гидролиза фосфорорганических веществ [4; 10]. Инвертазная активность лучше других ферментов отражает биологическую активность почвы [1; 23; 24]. Чаще всего активность ферментов выше в верхних наиболее биогенных почвенных горизонтах, чем в нижних горизонтах по почвенному профилю, что связано со снижением количества органического вещества, микроорганизмов и корней растений [6; 27]. Некоторые авторы отмечают, что рост и развитие растений, а также гниение и разложение растительного опада способствуют активизации почвенных ферментов [12; 18; 22].

Ранее нами проводились исследования по определению содержания почвенных ферментов под насаждениями клена ясенелистного [13; 14], однако сведений о влиянии различных факторов на ферментативную активность почвы в условиях Кемеровской области недостаточно.

Цель работы — оценить влияние эдафических условий на активность гидролитических ферментов почвы в подкроновом пространстве древесных растений в условиях нарушенных фитоценозов г. Кемерово. Задачи исследования включали изучение активности почвенных ферментов (инвертазы, протеазы, фосфатазы), анализ влажности по-

чвы, а также определение фитомассы растительного опада в подкроновом пространстве древесных растений.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследований были отобраны образцы почвы в условиях нарушенных фитоценозов г. Кемерово. Кемерово — административный центр Кузбасса, расположен на юго-востоке Кемеровской области, в лесостепной зоне Кузнецкой котловины (55°21'55" N; 85°09'45" E). Почвы черноземные, слабовыщелоченные, с мелкокомковатым строением, обладают высоким плодородием, удовлетворительно обеспечены питательными веществами.

Климат района исследований резко континентальный с продолжительной холодной зимой и коротким, но жарким летом. Средняя годовая температура воздуха варьирует от плюс 1,0 °С до минус 0,9 °С. Средние температуры воздуха наиболее холодного месяца (января) составляют –9...–13 °С, что на 6—8 °С выше климатической нормы; самого теплого месяца (июля) — +18...+20 °С. Средняя продолжительность безморозного периода — от 100 до 120 дней. Осадков выпадает в среднем 400—500 мм в год, однако распределение их по территории крайне неравномерно.

Отбор образцов проводили на пробных площадках (ПП) с участием древесных видов: 1 — клена ясенелистного (*Acer negundo* L.), 2 — березы повислой (*Betula pendula* Roth), 3 — черемухи обыкновенной (*Prunus padus* L.). Возраст древесных растений варьировал от 30 до 35 лет. Пробные площадки располагались в подкроновом пространстве древесных видов. Контролем служили площадки, расположенные вне проекции крон (межкroновое пространство) деревьев.

Образцы почвы в пределах каждой учетной площадки отбирали с глубины 0—10 см, укладывали в zip-пакеты и доставляли в лабораторию. В камеральных условиях проводили определение влажности почвы по ГОСТ 28268-89 и содержания ферментов. Ферменты изучали в свежесобранной почве в трехкратной повторности из смешанной пробы (совокупность точечных проб). Определение инвертазной активности проводили по методу В. Ф. Купревича и Т. А. Щербаковой, протеолитической активности — по методу А. Ш. Галстяна и Э. А. Арутюнян [5]. Активность фосфатазы определяли по методу А. Ш. Галстяна [8]. Для оценки биологической активности почв использовали общепринятые шкалы (табл. 1).

Таблица 1

Оценка биологической активности почвы

Показатель	Степень активности				
	очень слабая	слабая	средняя	высокая	очень высокая
Инвертазная активность, мг глюкозы / 1 г / 24 ч	<5,0	5,0—15,0	15,1—50,0	50,1—150,0	>150,0
Протеолитическая активность, мг глицина / 1 г / 24 ч	<1,0	1,0—3,0	3,1—5,0	5,1—8,0	>8,0
Фосфатазная активность, мг P ₂ O ₅ / 10 г / ч	0—0,5	0,6—1,5	1,6—5,0	5,1—15,0	>15,0

Растительный опад отбирали в подкроновом и межкroновом пространстве каждого модельного дерева на учетных площадках размером 30×60 см. Образцы высушивали до воздушно-сухого состояния, взвешивали с определением количества фитомассы на абсолютно сухую массу и доли каждой растительной фракции. Статистический анализ данных и построение графиков выполняли с помощью стандартного пакета программ Microsoft Office Excel 2007 и StatSoft Statistica 10.0.

Результаты исследования и их обсуждение

На учетных площадках проведена оценка влажности почвы, уровня активности почвенных ферментов и накопления фитомассы растений в течение вегетации. Гидротермические условия в фитоценозах играют важную роль в ферментативных процессах почвы в связи с тем, что значительное количество атмосферных осадков задерживается кронами деревьев [15; 26]. Вегетационный период 2024 года характеризовался неустойчивой погодой, с резкими колебаниями температуры и с минимальным количеством осадков. В мае среднемесячная температура воздуха составила плюс 10,5 °С, что на 1 °С ниже нормы. Осадков выпало около 4 мм (10% нормы). В июле и сентябре среднемесячная температура воздуха на 1—2 °С превысила норму, осадков выпало 49—78 мм (63—117% от нормы). Проведенные исследования влажности почвы показали, что в подкроновом и межкроновом пространстве древесных видов показатели варьировали в пределах от 11,41 до 21,37% на глубинах 0 и 10 см соответственно. На площадках в течение вегетации влажность почвы под кроной деревьев составила в среднем 17,35%, вне кроны — 16,08% (рис. 1). Под пологом *A. negundo* уровень влажности почв был выше в 1,1—1,3 раза, чем под кроной других видов деревьев.

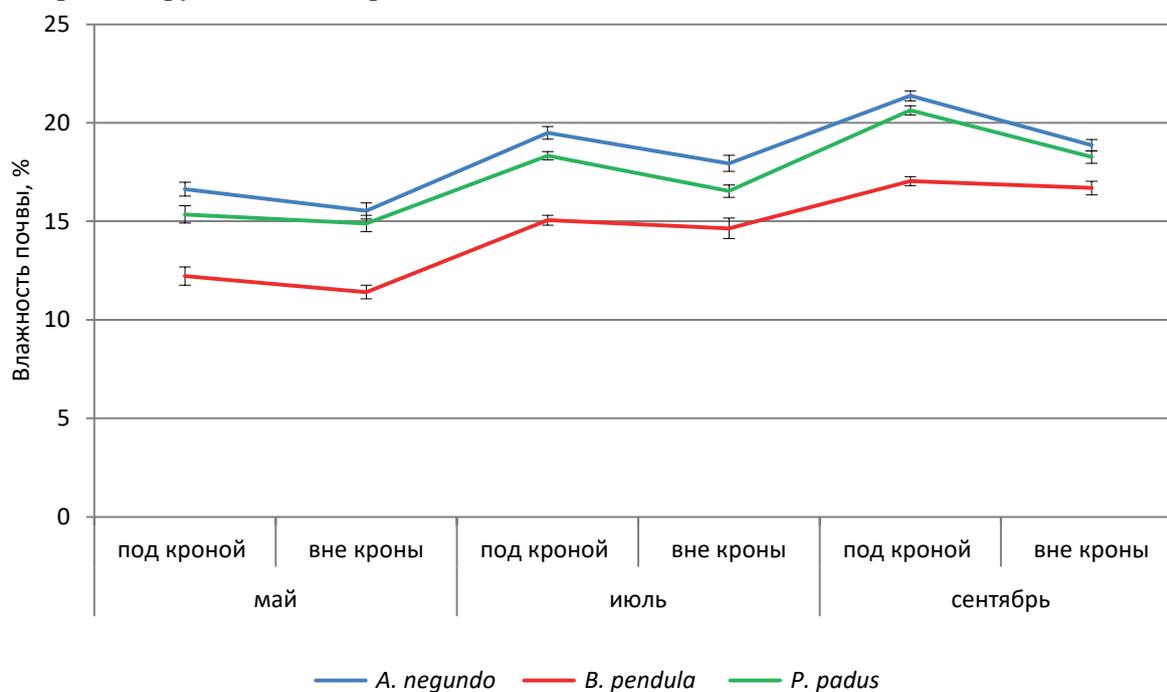


Рис. 1. Влажность почвы на исследуемых площадках

Поступление растительного опада способствует росту ферментативной активности почвы, так как многие компоненты органического вещества являются высокоэнергетическим субстратом для почвенных организмов [21]. Наши исследования показали, что в подкроновом пространстве деревьев запас фитомассы варьировал в пределах от 1,94 до 5,87 т/га воздушно-сухой массы (рис. 2).

Особенностью растительного опада на площадке с участием *A. negundo* является то, что под кроной уровень его фитомассы выше в 1,1—1,5 раза, чем у других древесных видов. Анализ фракционного состава опада подкронового пространства деревьев показал преобладание фракции листьев (70—95%), особенно в мае и сентябре. В июле преобладала фракция травянистых растений (22%). Эта закономерность является естественной, поскольку июль — время активной вегетации у травянистых растений, в сентябре происходит их увядание, но увеличивается доля листьев.

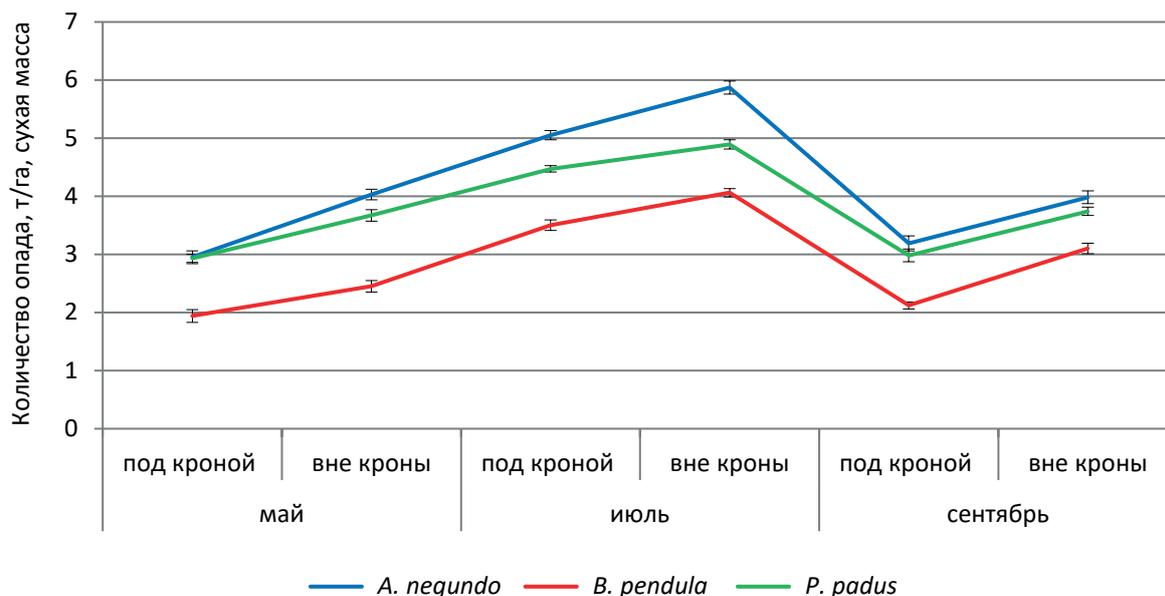


Рис. 2. Количество опада древесных растений

Ферментативная активность почвы на исследуемых площадках изменялась в зависимости от биоморфного состава и вегетационного периода древесных растений. В целом уровень почвенных ферментов в фитоценозах характеризовался средней степенью биологической активности почвы [4]. Некоторые исследователи отмечают активацию почвенных ферментов в период достаточной влажности и оптимальной температуры, особенно весной, и снижение их активности к осени [2; 16]. Нами выявлено, что активность ферментов почвы на исследуемых участках с мая по июль повышалась и достигала максимума, затем постепенно снижалась к сентябрю. Так, у образцов уровень активности инвертазы в июле повышался до 58,76 мг глюкозы / 1 г почвы / 24 ч, протеазы — до 5,30 мг глицина / 1 г почвы / 24 ч, фосфатазы — до 5,42 мг P_2O_5 / 10 г почвы / ч, в сентябре концентрация почвенных ферментов снижалась в 2,1—2,4 раза. Активность ферментов в подкроновом пространстве древесных растений выше на 6—9%, чем вне кроны. У исследуемых образцов уровень инвертазной активности преобладал над другими гидролазами в почве.

Концентрация инвертазы на исследуемых площадках в мае и сентябре характеризовалась средней степенью биологической активности, в июле — высокой с превышением контроля на 8—17% (рис. 3). Максимальные отличия от контроля по активности инвертазы выявлены на площадке с участием *P. padus* (в среднем на 11%). Однако показатели инвертазной активности почвы в подкроновом пространстве *A. negundo* и *B. pendula* превысили в среднем в 1,2 раза значения под пологом *P. padus*. В течение вегетации под кроной *A. negundo* концентрация фермента была выше в среднем на 7%, под кроной *B. pendula* — на 8%, чем вне кроны. Возрастание инвертазной активности на исследуемых площадках в подкроновом пространстве древесных видов, вероятно, связано с тем, что под их пологом складываются более благоприятные гидротермические условия, чем вне кроны деревьев.

На исследуемых площадках в течение вегетации выявлена средняя степень активности протеазы, которая составила 2,53—5,30 мг глицина / 1 г почвы / 24 ч (рис. 4). Уровень активности фермента у образцов в течение вегетации выше в среднем на 6% относительно контроля. В июле у образцов отмечены наиболее высокие значения с варьированием от 4,30 до 5,30 мг глицина / 1 г почвы / 24 ч, что выше контроля на 3—5%. Максимальные

отличия от контроля по активности протеазы выявлены на площадке с участием *P. padus*, особенно в мае и сентябре — на 15 и 11% соответственно. На площадке с участием *A. negundo* концентрация фермента превысила контроль в среднем на 9%.

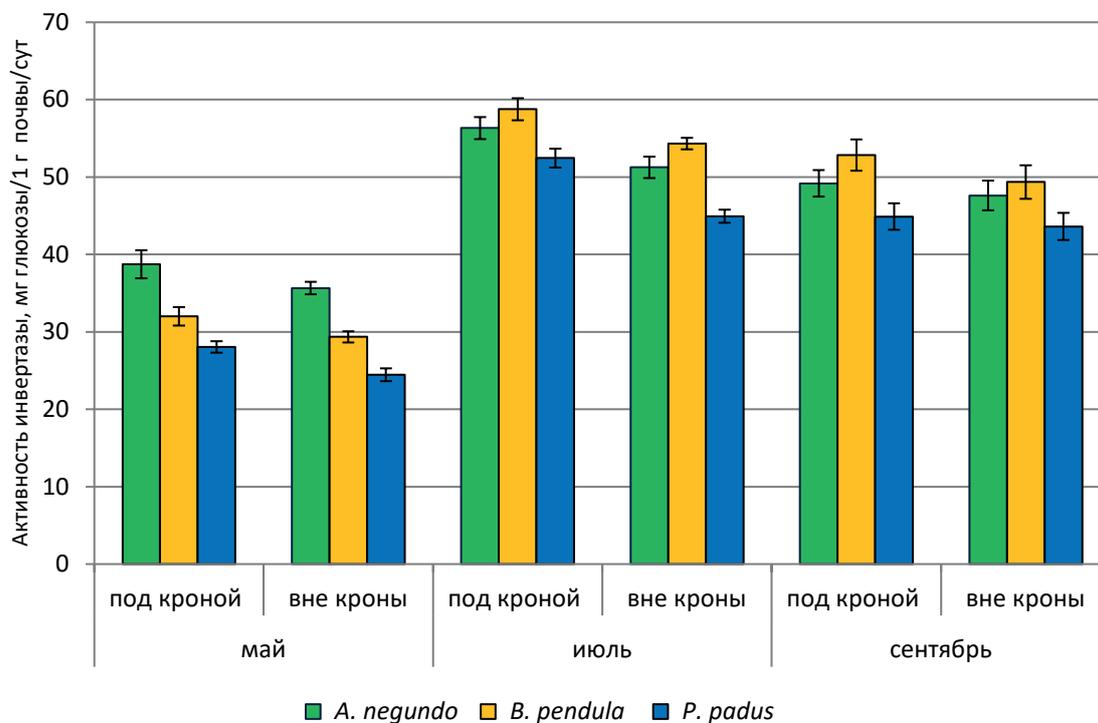


Рис. 3. Динамика активности инвертазы на исследуемых участках

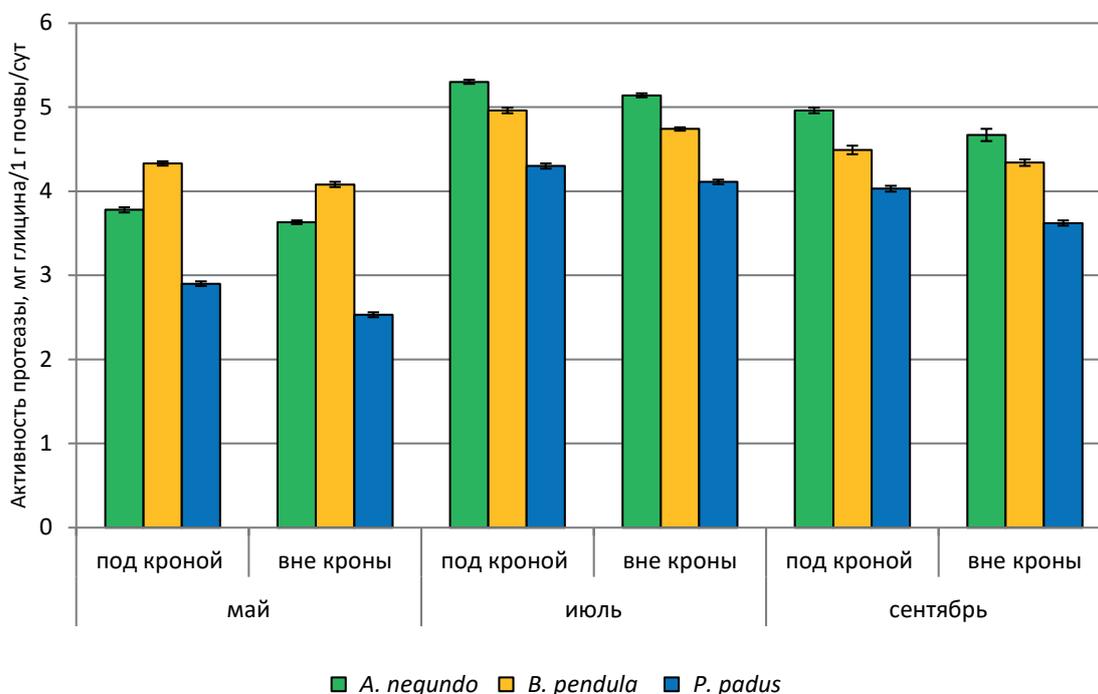


Рис. 4. Уровень активности протеазы на исследуемых участках

Активность фосфатазы у исследуемых образцов варьировала в пределах от 2,64 до 5,42 P_2O_5 / 10 г почвы / ч и соответствовала средней степени активности (рис. 5). В мае в подкромовом пространстве исследуемых деревьев отмечено увеличение фосфатазы до

3,61 мг P_2O_5 / 10 г почвы / ч, в июле — до 5,42 мг P_2O_5 / 10 г почвы / ч, в сентябре — до 3,78 мг P_2O_5 / 10 г почвы / ч, что выше на 8%, чем вне кроны деревьев. В вегетационный период на площадке с участием *A. negundo* отмечены максимальные отличия от контроля (в среднем на 11%). В насаждениях с участием *B. pendula* уровень активности фермента в мае и июле был выше в 1,1—1,2 раза, в насаждениях с участием *P. padus* — в сентябре (в 1,1 раза) относительно других исследуемых видов.

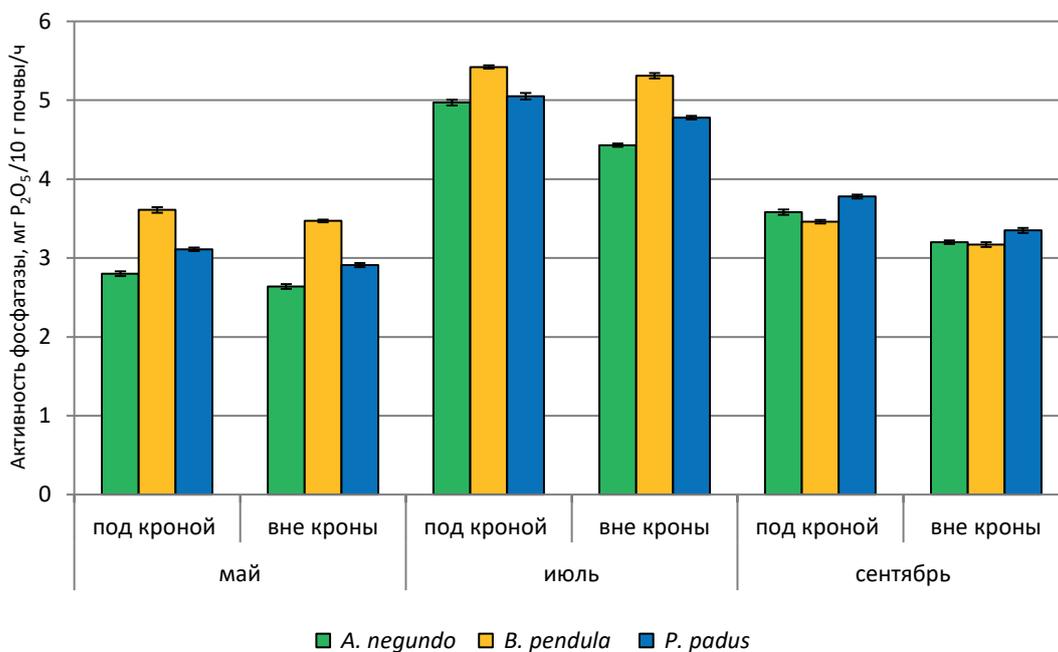


Рис. 5. Активность фосфатазы на исследуемых участках

Для выявления закономерностей и оценки взаимосвязи исследуемых показателей выполнен корреляционный анализ, который показал достоверную положительную связь между влажностью и активностью ферментов, в большей степени с инвертазой ($r = 0,53$ при $p < 0,05$); между накоплением растительного опада и ферментов почвы ($r = 0,41 \dots 0,49$ при $p < 0,05$).

Заключение

Проведенные исследования показали, что подкروновое пространство древесных растений оказывает существенное влияние на активность почвенных ферментов. Учетные площадки характеризовались средней степенью биологической активности почвы.

В исследуемых образцах выявлена сезонная динамика ферментативной активности почвы с летним максимумом и пониженной активностью осенью.

В подкроновом пространстве исследуемых древесных растений активность гидролитических ферментов почвы выше на 6—9%, чем в межкроновом.

У образцов уровень инвертазной активности преобладал над другими гидролазами в почве. Активность инвертазы под кроной древесных растений выше в среднем на 9%, чем вне кроны.

Наиболее существенные отличия от контроля по активности инвертазы и протеазы выявлены на площадке с участием *P. padus* (11 и 9% соответственно), по активности фосфатазы — на площадке с участием *A. negundo* (11%).

Установлена положительная корреляция между влажностью и инвертазой, а также между накоплением растительного опада и ферментов почвы. Полученные данные можно использовать в мониторинговых исследованиях для оценки состояния почвенной микробиоты.

Список источников

1. Гродзинский А. М. Аллелопатия в жизни растений и их сообществ: Основы химического взаимодействия растений. Киев : Наукова думка, 1965. 198 с.
2. Зайцева О. В., Максимова Е. В., Макурина О. Н. Динамика целлюлозоразлагающей, инвертазной и полифенолоксидазной активностей почвенной микрофлоры Самарской области // Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия. 2006. № 9 (49). С. 138—144.
3. Звягинцев Д. Г., Бабьева И. П., Зенова Г. М. Биология почв : учеб. М. : Изд-во МГУ, 2005. 445 с.
4. Казеев К. Ш., Колесников С. И., Вальков В. Ф. Биологическая диагностика и индикация почв: методология и методы исследований. Ростов-на-Дону : Изд-во РГУ, 2003. 216 с.
5. Практикум по агрохимии / под ред. В. Г. Минеева. М. : МГУ, 2001. 689 с.
6. Сакбаева З. И. Влияние ферментативной активности фосфатаз на экологическое состояние сероземных почв предгорий Ферганы // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. URL: <https://science-education.ru/pdf/2014/5/672.pdf>.
7. Сорокина О. А. Влияние искусственных древесно-кустарниковых насаждений на биологическую активность почв в степях Хакасии // Лесоведение. 2023. № 1. С. 77—84. DOI: 10.31857/S0024114823010096.
8. Титова В. И., Козлов А. В. Методы оценки функционирования микробсообщества почвы, участвующего в трансформации органического вещества : науч.-метод. пособие / Нижегородская сельскохозяйственная академия. Нижний Новгород, 2012. 64 с.
9. Умарова А. Б., Бекетская Т. В., Железова С. В. Трансформация физических и химических свойств модельной почвы под воздействием древесной растительности // Вестник Оренбургского государственного университета. 2009. № 6 (100). С. 629—632.
10. Хазиев Ф. Х. Методы почвенной энзимологии. М. : Наука, 2005. 252 с.
11. Хазиев Ф. Х. Функциональная роль ферментов в почвенных процессах // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2015. Т. 20, № 2 (78). С. 14—24.
12. Хежева Ф. В., Улигова Т. С., Темботов Р. Х. Оценка ферментативной активности черноземов естественных биоценозов степной зоны и лесостепного пояса Центрального Кавказа // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12, № 1 (4). С. 1075—1078.
13. Цандекова О. Л., Макеева Н. А. Оценка биологической активности почвы в луговых фитоценозах с участием клена ясенелистного // Труды Карельского научного центра РАН. 2024, № 3. С. 41—50. DOI: 10.17076/eo1820.
14. Цандекова О. Л., Уфимцев В. И. Ферментативная активность почвы под насаждениями клена ясенелистного в условиях пойменных лесных биогеоценозов // Лесоведение. 2021. № 4. С. 437—445. DOI: 10.31857/S0024114821040112.
15. Baldrian P., Merhautová V., Petráňková M., Cajthaml T., Šnajdr J. Distribution of microbial biomass and activity of extracellular enzymes in a hardwood forest soil reflect soil moisture content // Applied Soil Ecology. 2010. Vol. 46. P. 177—182. DOI: 10.1016/j.apsoil.2010.08.013.
16. Boerner R. E. J., Brinkman J. A., Smith A. Seasonal variations in enzyme activity and organic carbon in soil of a burned and unburned hardwood forest // Soil Biology and Biochemistry. 2005. Vol. 37. P. 1419—1426. DOI: 10.1016/j.soilbio.2004.12.012.
17. Cotrufo F. M., Soong J. L., Horton A. J., Campbell E. E., Haddix M. L., Wall D. H., Parton W. J. Formation of Soil Organic Matter via Biochemical and Physical Pathways of Litter Mass Loss // Nature Geoscience. 2015. Vol. 8, N 10. P. 776—779. DOI: 10.1038/ngeo2520.
18. Hu R., Wang X., Zhang Ya., Shi W., Chen N. Insight into the influence of sand-stabilizing shrubs on soil enzyme activity in a temperate desert // Catena. 2016. Vol. 137. P. 526—535. DOI: 10.1016/j.catena.2015.10.022.
19. Li J., Tang X., Awasthi M. K., Wu F., Ha S., Ma J., Sun X., He Ch. Dynamics of soil microbial biomass and enzyme activities along a chronosequence of desertified land revegetation // Ecological Engineering. 2018. Vol. 111. P. 22—30. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.11.006.
20. Ling A., Fuzhong W., Xuebo F., Ying Y., Yu Zh., Xiaping Zh., Jingjing Zh., Xiangyin N. Different effects of litter and root inputs on soil enzyme activities in terrestrial ecosystems // Applied Soil Ecology. 2023. Vol. 183. Art. 104764. DOI: 10.1016/j.apsoil.2022.104764.
21. Mao B., Cui T., Su T., Xu Q., Lu F., Su H., Zhang J., Xiao Sh. Mixed-litter effects of fresh leaf semi-decomposed litter and fine root on soil enzyme activity and microbial community in an evergreen broadleaf karst forest in southwest China // Frontiers in Plant Science. 2022. Vol. 13. Art. 1065807. DOI: 10.3389/fpls.2022.1065807.
22. Moghimian N., Hosseini S. M., Kooch Ya., Darki B. Z. Impacts of changes in land use/cover on soil microbial and enzyme activities // Catena. 2017. Vol. 157. P. 407—414. DOI: 10.1016/j.catena.2017.06.003.
23. Porté A. J., Lamarque L. J., Lortie C. J., Michalet R., Delzon S. Invasive *Acer negundo* outperforms native species in non-limiting resource environments due to its higher phenotypic plasticity // BMC Ecology. 2011. Vol. 11, N 1. P. 11—28. DOI: 10.1186/1472-6785-11-28.

24. Saccone P., Pagès J. P., Girel J., Brun J. J., Michalet R. *Acer negundo* invasion along a successional gradient: early direct facilitation by native pioneers and late indirect facilitation by conspecifics // *New Phytologist*. 2010. Vol. 187. P. 831—842. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2010.03289.
25. Staszal-Szlachta K., Lasota J., Szlachta A., Blonska E. The impact of root systems and their exudates in different tree species on soil properties and microorganisms in a temperate forest ecosystem // *BMC Plant Biology*. 2024. Vol. 24. Art. 45. DOI: 10.1186/s12870-024-04724-2.
26. Tomar U., Baishya R. Seasonality and moisture regime control soil respiration, enzyme activities, and soil microbial biomass carbon in a semi-arid forest of Delhi, India // *Ecological Processes*. 2020. Vol. 9. Art. 50. DOI: 10.1186/s13717-020-00252-7.
27. Yu P., Tang X., Zhang A., Fan G., Liu Sh. Responses of soil specific enzyme activities to short-term land use conversions in a salt-affected region, northeastern China // *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 687. P. 939—945. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.171.

References

1. Grodzinskii A. M. *Allelopatiya v zhizni rastenii i ikh soobshchestv: Osnovy khimicheskogo vzaimodeystviya rastenii* [Allelopathy in the life of plants and their communities: Fundamentals of chemical interaction of plants]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1965. 198 p. (In Russian)
2. Zaitseva O. V., Maksimova E. V., Makurina O. N. Dinamika tsellyulozorazlagayushchei, invertaznoi i polifenoloksidaznoi aktivnosti pochvennoi mikroflory Samarskoi oblasti [Dynamics of cellulose-decomposing, invertase and polyphenoloxidase activities of soil microflora of the Samara region]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya — Vestnik of Samara University. Natural Science Series*, 2006, no. 9 (49), pp. 138—144. (In Russian)
3. Zvyagintsev D. G., Bab'eva I. P., Zenova G. M. *Biologiya pochv : ucheb.* [Soil biology: study guide]. Moscow, MGU Publ., 2005. 445 p. (In Russian)
4. Kazeev K. Sh., Kolesnikov S. I., Val'kov V. F. *Biologicheskaya diagnostika i indikatsiya pochv: metodologiya i metody issledovaniya* [Biological diagnostics and indication of soils: methodology and research methods]. Rostov-on-Don, RGU Publ., 2003. 216 p. (In Russian)
5. *Praktikum po agrokhimii* [Agrochemistry Workshop]. Moscow, MGU Publ., 2001. 689 p. (In Russian)
6. Sakbaeva Z. I. Vliyanie fermentativnoi aktivnosti fosfataz na ekologicheskoe sostoyanie serozemnykh pochv predgorii Fergany [The influence of phosphatase enzyme activity on the ecological condition of sierozem soils of Fergana foothills]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya — Modern Problems of Science and Education*, 2014, no. 5. Available at: <https://s.science-education.ru/pdf/2014/5/672.pdf>. (In Russian)
7. Sorokina O. A. Vliyanie iskusstvennykh drevesno-kustarnikovykh nasazhdenii na biologicheskuyu aktivnost' pochv v stepyakh Khakasii [Artificial forest stands' impact on soils' biological activity in Khakassia steppes]. *Lesovedenie — Russian Journal of Forest Science*, 2023, no. 1, pp. 77—84. DOI: 10.31857/S0024114823010096. (In Russian)
8. Titova V. I., Kozlov A. V. *Metody otsenki funktsionirovaniya mikrobotsenoza pochvy, uchastvuyushchego v transformatsii organicheskogo veshchestva: nauch.-metod. posobie* [Methods for assessing the functioning of soil microbiocenosis involved in the transformation of organic matter: scientific and methodological manual]. Nizhniy Novgorod, 2012. 64 p. (In Russian)
9. Umarova A. B., Beketskaya T. V., Zhelezova S. V. Transformatsiya fizicheskikh i khimicheskikh svoystv model'noi pochvy pod vozdeystviem drevesnoi rastitel'nosti [Transformation of physical and chemical features of model soil under the influence of lignose]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta — Vestnik of the Orenburg State University*, 2009, no. 6 (100), pp. 629—632. (In Russian)
10. Khaziev F. Kh. *Metody pochvennoi enzimologii* [Methods of soil enzymology]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 252 p. (In Russian)
11. Khaziev F. Kh. Funktsional'naya rol' fermentov v pochvennykh protsessakh [Functional role of enzymes in soil processes]. *Vestnik Akademii nauk Respubliki Bashkortostan — The Herald of the ASRB*, 2015, vol. 20, no. 2 (78), pp. 14—24. (In Russian)
12. Khezheva F. V., Uligova T. S., Tembotov R. Kh. Otsenka fermentativnoi aktivnosti chernozemov estestvennykh biotsenozov stepnoi zony i lesostepnogo poyasa Tsentral'nogo Kavkaza [Estimation of black earth fermentation activity of natural biocenosis of steppe zone and forest-steppe zone of Central Caucasus]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk — Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2010, vol. 12, no. 1 (4), pp. 1075—1078. (In Russian)
13. Tsandekova O. L., Makeeva N. A. Otsenka biologicheskoi aktivnosti pochvy v lugovykh fitotsenozakh s uchastiem klena yasenelistnogo [Assessment of the biological activity of soil in meadow plant communities comprising ash-leafed maple]. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN — Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. Ecological Studies*, 2024, no. 3, pp. 41—50. DOI: 10.17076/eco1820.

14. Tsandekova O. L., Ufimtsev V. I. Fermentativnaya aktivnost' pochvy pod nasazhdeniyami klenu yasenelistnogo v usloviyakh poimennykh lesnykh biogeotsenozov [Soils' enzymatic activity under the boxelder maple in floodland forest biogeocenoses]. *Lesovedenie — Russian Journal of Forest Science*, 2021, no. 4, pp. 437—445. DOI: 10.31857/S0024114821040112. (In Russian)
15. Baldrian P., Merhautová V., Petránková M., Cajthaml T., Šnajdr J. Distribution of microbial biomass and activity of extracellular enzymes in a hardwood forest soil reflect soil moisture content. *Applied Soil Ecology*, 2010, vol. 46, pp. 177—182. DOI: 10.1016/j.apsoil.2010.08.013.
16. Boerner R. E. J., Brinkman J. A., Smith A. Seasonal variations in enzyme activity and organic carbon in soil of a burned and unburned hardwood forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, vol. 37, pp. 1419—1426. DOI: 10.1016/j.soilbio.2004.12.012.
17. Cotrufo F. M., Soong J. L., Horton A. J., Campbell E. E., Haddix M. L., Wall D. H., Parton W. J. Formation of Soil Organic Matter via Biochemical and Physical Pathways of Litter Mass Loss. *Nature Geoscience*, 2015, vol. 8, no. 10, pp. 776—779. DOI: 10.1038/ngeo2520.
18. Hu R., Wang X., Zhang Ya., Shi W., Chen N. Insight into the influence of sand-stabilizing shrubs on soil enzyme activity in a temperate desert. *Catena*, 2016, vol. 137, pp. 526—535. DOI: 10.1016/j.catena.2015.10.022.
19. Li J., Tang X., Awasthi M. K., Wu F., Ha S., Ma J., Sun X., He Ch. Dynamics of soil microbial biomass and enzyme activities along a chronosequence of desertified land revegetation. *Ecological Engineering*, 2018, vol. 111, pp. 22—30. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.11.006.
20. Ling A., Fuzhong W., Xuebo F., Ying Y., Yu Zh., Xiaping Zh., Jingjing Zh., Xiangyin N. Different effects of litter and root inputs on soil enzyme activities in terrestrial ecosystems. *Applied Soil Ecology*, 2023, vol. 183, art. 104764. DOI: 10.1016/j.apsoil.2022.104764.
21. Mao B., Cui T., Su T., Xu Q., Lu F., Su H., Zhang J., Xiao Sh. Mixed-litter effects of fresh leaf semi-decomposed litter and fine root on soil enzyme activity and microbial community in an evergreen broadleaf karst forest in southwest China. *Frontiers in Plant Science*, 2022, vol. 13, art. 1065807. DOI: 10.3389/fpls.2022.1065807.
22. Moghimian N., Hosseini S. M., Kooch Ya., Darki B. Z. Impacts of changes in land use/cover on soil microbial and enzyme activities. *Catena*, 2017, vol. 157, pp. 407—414. DOI: 10.1016/j.catena.2017.06.003.
23. Porté A. J., Lamarque L. J., Lortie C. J., Michalet R., Delzon S. Invasive *Acer negundo* outperforms native species in non-limiting resource environments due to its higher phenotypic plasticity. *BMC Ecology*, 2011, vol. 11, no. 1, pp. 11—28. DOI: 10.1186/1472-6785-11-28.
24. Saccone P., Pagès J. P., Girel J., Brun J. J., Michalet R. *Acer negundo* invasion along a successional gradient: early direct facilitation by native pioneers and late indirect facilitation by conspecifics. *New Phytologist*, 2010, vol. 187, pp. 831—842. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2010.03289.
25. Staszal-Szlachta K., Lasota J., Szlachta A., Blonska E. The impact of root systems and their exudates in different tree species on soil properties and microorganisms in a temperate forest ecosystem. *BMC Plant Biology*, 2024, vol. 24, art. 45. DOI: 10.1186/s12870-024-04724-2.
26. Tomar U., Baishya R. Seasonality and moisture regime control soil respiration, enzyme activities, and soil microbial biomass carbon in a semi-arid forest of Delhi, India. *Ecological Processes*, 2020, vol. 9, art. 50. DOI: 10.1186/s13717-020-00252-7.
27. Yu P., Tang X., Zhang A., Fan G., Liu Sh. Responses of soil specific enzyme activities to short-term land use conversions in a salt-affected region, northeastern China. *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 687, pp. 939—945. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.171.

Информация об авторе

О. Л. Цандекова — кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник

Information about the author

O. L. Tsandekova — Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher

Статья поступила в редакцию 23.03.2025; одобрена после рецензирования 26.04.2025;
принята к публикации 20.08.2025

The article was submitted 23.03.2025; approved after reviewing 26.04.2025;
accepted for publication 20.08.2025