

Активность ферментов в дерново-подзолистых почвах молодых и средневозрастных лесов

**Кулагина В. И., Сунгатуллина Л. М., Рязанов С. С., Александрова А. Б.,
Шагидуллин Р. Р., Рупова Э. Х.**

Институт проблем экологии и недропользования АН РТ

Казань, Россия

viksoil@mail.ru, sunlyc@yandex.ru, RStanislav.soil@gmail.com, adabl@mail.ru, shagidullin@mail.ru,
elmira.rupova@mail.ru

Проведено сравнение ферментативной активности дерново-подзолистых почв на 6 пробных площадках под лесами разных пород на территории Республики Татарстан. Пробные площадки находятся на расстоянии не более 55 км от города Казани. Почвенный покров всех пробных площадок представлен дерново-подзолистыми почвами. Для исследования выбирались леса, представленные одной породой, без примесей: сосняки, березняки, дубняк и осинник. Возраст лесов 10–40 лет. Показано, что закономерности распределения биохимических свойств почв отличаются от наблюдавшихся в более старых лесах. Например, не выявлена статистически значимая разница по ферментативной активности между почвами сосновых и лиственных лесов. На исследованных пробных площадках активность инвертазы колеблется в пределах 0,4–3,9 мг глюкозы/1 г почвы за 4 часа. Инвертаза проявила сильную зависимость от содержания глинистой фракции ($r=0,73$; $p<0,05$) и не проявляет корреляционной взаимосвязи с содержанием гумуса. Активность каталазы составляет 0,7–2,5 мл 0,1 н KMnO_4 /1 г за 20 мин, корреляция с содержанием гумуса средняя ($r=0,58$; $p<0,05$), с глинистой фракцией – отсутствует. Установлена статистически значимая разница по активности каталазы между почвами средневозрастных лесов и молодняков. Фосфатазная активность составляет 0,6–4,3 мг P_2O_5 /10 г почвы за 24 часа и не проявила корреляционной зависимости ни с гумусом, ни с глинистой фракцией почв. Причины статистически значимого отличия активности фосфатазы в почвах осинника от активности в почвах остальных исследованных лесов требуют дополнительного исследования.

Ключевые слова: лесные экосистемы, почва, инвертаза, каталаза, фосфатаза.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение всех звеньев круговорота углерода в лесах, рассматриваемых в настоящее время в качестве наиболее эффективных поглотителей углерода, является актуальной задачей. Углерод в лесах находится не только в составе живой древесины, но также в мертвый древесине, лесной подстилке, почве и других компонентах биоценоза. Со временем секвестрированный древесными породами углерод перемещается из одного пула в другой, закрепляется в почве или возвращается в атмосферу (Кузнецова, 2021; Пристова, 2024). Направление и скорость трансформации органических остатков, попадающих в почву лесного биоценоза, во многом зависит от ферментативной системы почв. Ферменты почв принимают участие в круговороте углерода, являясь катализаторами процессов разложения первичных и синтеза вторичных органических веществ, накоплении их запасов в почвах (Казеев и др., 2012; Хазиев, 2015, 2018; Гродницкая и др., 2016; Мищенко и др., 2021). Однако активность ферментов в почвах лесов разного породного состава и возраста до сих пор изучена недостаточно, особенно естественных лесов. Большая часть работ посвящена ферментативной активности почв лесов после вырубок, пожаров, при загрязнении (Завалишин и др., 2018; Перминова и др., 2018; Kazeev et al., 2019; Курганова и др., 2022; Галибина и др., 2024). В Республике Татарстан получены данные по ферментативной активности почв естественных лесов, относящихся к старшим возрастным группам (Кулагина и др., 2023, 2024). Ферментативная активность почв лесов младше 40 лет практически не изучена. Вместе с тем, накопление базы данных о ферментативной активности почв лесов разного возраста, как находящихся под антропогенным прессингом, так и без него, позволит точнее судить о потоках углерода в лесных экосистемах и о состоянии самих лесных экосистем.

Цель данной работы – оценить активность ферментов в дерново-подзолистых почвах молодых и средневозрастных лесов и ее взаимосвязи с содержанием гумуса, глинистой фракции, возрастом и породным составом леса.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые исследования проводились на территории Республики Татарстан в Верхнеуслонском, Зеленодольском и Лаишевском районах в мае – июне 2024 года на шести пробных площадках, занятых лесами преобладающих пород. Все площадки находятся в радиусе не более 55 км от города Казани. В качестве пробных площадок выбирались участки лесов возрастом от 10 до 40 лет, представленные одной основной породой без примесей.

Пробные площадки:

ПП 1 – сосняк разнотравный, молодняк II возраста (25 лет), охранная зона Саралинского участка Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника (ВКГПБЗ);

ПП 2 – березняк злаковый, молодняк I возраста (10 лет), охранная зона Раифского участка ВКГПБЗ;

ПП 3 – березняк хвошевый, средневозрастный (25–30 лет), близ города Иннополис;

ПП 4 – сосняк мертвопокровный, молодняк II возраста (25 лет), искусственная посадка, близ железнодорожной станции Новое Аракчино;

ПП 5 – осинник разнотравный, молодняк II возраста (10–15 лет), близ села Тетеево, охранная зона заповедника;

ПП 6 – дубняк разнотравный, средневозрастный (в среднем 40 лет) естественного происхождения, но под заметным антропогенным воздействием в виде вытаптывания и замусоривания, близ станции Новое Аракчино.

Только одна площадка занята искусственной посадкой (ПП 4), остальные представлены лесами естественного происхождения.

Почвенный покров всех пробных площадок представлен дерново-подзолистыми почвами, что позволяет считать сравнение ферментативной активности в них правомерным. При наличии почв, относящихся к разным типам и подтипу, подобное сравнение затруднительно, предлагается даже разработать отдельные оценочные шкалы по ферментативной активности для разных типов почв (Инишева и др., 2024).

На каждой пробной площадке почвенные образцы отбирались из пяти точек методом конверта на всю глубину гумусового горизонта. Содержание гумуса определяли методом И. В. Тюрина, активность каталазы – методом Джонсона и Темпле, инвертазы – по Т. А. Щербаковой, фосфатазы по методу И. Т. Геллера и К. Е. Гинзбург, глинистой фракции – пипеточным методом.

Оценка статистической значимости разницы проводилась с использованием различных непараметрических и параметрических критериев и способов обработки данных. Связь между почвенными свойствами анализировали с помощью коэффициента корреляции Пирсона, статистическая значимость определена при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание гумуса в горизонтах A1 исследованных дерново-подзолистых почв составляло от 0,4 до 4,1 %, что в целом характерно для почв данного подтипа (Александрова и др., 2012) (табл. 1).

Гранулометрический состав почв варьировал от песка рыхлого под искусственной сосновой посадкой (ПП 4) до легкого суглинка под березняком средневозрастным (ПП 3).

Хотя минимальное содержание гумуса обнаружено в почве с самым легким гранулометрическим составом (ПП 4), в целом корреляционная зависимость между содержанием гумуса и глинистой фракции в почвах пробных площадок не обнаружена ($r=0,01$). Остается только согласиться с мнением Г. Н. Копчик с соавторами, что увеличение

содержания гумуса в почвах не всегда напрямую связано с повышенным содержанием тонкодисперсных фракций, значительное воздействие могут оказывать и другие особенности почвообразования (Копчик и др., 2023).

Таблица 1

Содержание гумуса и глинистой фракции в почвах пробных площадок

Пробная площадка	Характеристика древостоя	Гумус, %	<0,01 мм, %
ПП 1	Сосняк, молодняк II класса возраста	1,1±0,1	8,9±0,7
ПП 2	Березняк, молодняк I класса возраста	1,9±0,2	14,7±0,3
ПП 3	Березняк средневозрастный	1,8±0,1	22,9±0,9
ПП 4	Сосняк, молодняк II класса возраста	0,4±0,1	4,6±0,1
ПП 5	Осинник, молодняк II класса возраста	1,4±0,1	11,2±0,8
ПП 6	Дубняк средневозрастный	4,1±0,6	6,6±0,3

Почвы сосняков содержат меньше гумуса, чем почвы лиственных лесов, хотя статистически значимая разница подтверждена только для почвы искусственной сосновой посадки (ПП 4). Содержание гумуса в почве дубняка средневозрастного (ПП 6) статистически значимо выше, чем в почвах остальных пробных площадок согласно тесту Tukey HSD.

Средние значения активности инвертазы в почвах исследованных пробных площадок колеблются в пределах 0,4–3,9 мг глюкозы/1 г почвы за 4 часа (рис. 1). Согласно оценочной шкале Д. Г. Звягинцева (Звягинцев, 1978) обогащенность почв инвертазой варьирует от очень бедной до средней. Сходные данные получены для почв Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника (Кулагина и др., 2023, 2024).

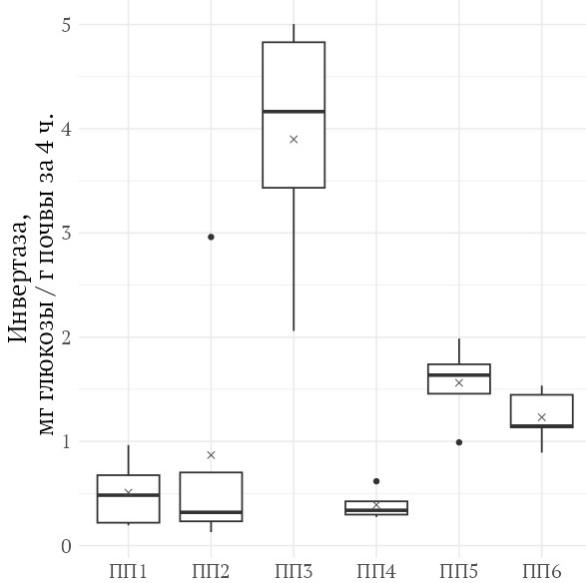


Рис. 1. Активность инвертазы в гумусовых горизонтах почв
(жирная линия – медиана, \times – среднее значение)

Статистическая обработка результатов с применением теста Tukey HSD подтвердила значимую разницу между активностью инвертазы под березняком средневозрастным и почвами всех остальных пробных площадок ($p \text{ adj} < 0,05$).

Исследования, проведенные в 2022–2023 годах в почвах лесов старших возрастных групп (от верхней границы средневозрастных до перестойных) на территории Волжско-Камского

государственного природного биосферного заповедника, показали, что в почвах под сосняками активность инвертазы существенно меньше, чем под лиственными лесами (Кулагина и др., 2023, 2024). Однако в данном исследовании тест Tukey HSD не выявил значимых отличий по активности инвертазы между почвами молодых сосновых и молодых лиственных лесов ($p_{adj}>0,05$).

Интересным моментом является то, что в почвах обследованных молодых и средневозрастных лесов корреляция между активностью инвертазы и содержанием гумуса не наблюдалась ($r=0,12$), зато проявилась высокая степень взаимосвязи между инвертазой и содержанием глинистых частиц ($r=0,73$). Отсутствие корреляции между инвертазой и содержанием гумуса отличается от большинства ранее полученных данных (Казеев и др., 2012; Гродницкая и др., 2016; Мищенко и др., 2021; Кулагина и др., 2023, Кулагина и др., 2024). Однако следует учитывать, что корреляционная зависимость между активностью инвертазы и общим содержанием гумуса обычно прослеживается в экосистемах, существующих достаточно длительное время в относительно неизменных условиях: в лесах старших возрастных групп или на длительно используемой пашне (Казеев и др., 2012). Исследованные нами участки, наоборот, находились либо в начале сукцессии по переходу из пашни в залежь, зарастающую лесом, из луга в молодой лес, или находились под усиливающимся антропогенным прессингом (дубняк). Содержание гумуса – довольно консервативный признак и изменяется медленнее, чем активность инвертазы (Казеев и др., 2012), что является причиной отсутствия корреляции между ними в почвах переходных биоценозов. Инвертаза принимает участие в гидролизе органических веществ, прежде всего, недавно поступивших в почву, а также их гумификации (Казеев и др., 2012; Хазиев, 2015). В переходных биоценозах на активность инвертазы большее влияние оказывают не общее содержание органического вещества, а поступление свежих органических остатков, их качество, а также возможности закрепления в почве свежеобразованных гумусовых соединений (Глазман и др., 2022; Завьялова, 2022; Копчик и др., 2023). Последнее напрямую связано с количеством тонкодисперсных фракций почвы (Семенов и др., 2019; Когут и др. 2020; Завьялова, 2022), вероятно поэтому на обследованных участках корреляция инвертазы с глинистой фракцией выражена лучше, чем с содержанием гумуса.

Фермент фосфатаза способствует высвобождению фосфора из органических соединений и переводу его в доступную для растений минеральную форму (Казеев и др., 2012; Margalef et al., 2017; Наими и др., 2020). Особенно активно фосфатаза выделяется корнями растений и микроорганизмами при недостатке минерального фосфора (Наими и др., 2020). Активность фосфатазы в почвах исследованных пробных площадок составляла 0,6–4,3 мг Р₂O₅ / 10 г почвы за 24 часа (рис. 2).

Согласно шкале Д. Г. Звягинцева (Звягинцев, 1978) обогащенность почвы фосфатазой варьирует от средней под молодым осинником и березняком средневозрастным до бедной – под остальными лесами. Почвы площадок ПП 1, ПП 2, ПП 3, ПП 4 и ПП 6 не имеют статистически значимых отличий по активности фосфатазы.

Проверка с помощью Tukey HSD теста подтвердила статистически значимую разницу между активностью фосфатазы в почве под осинником (ПП 5) и почвами всех остальных площадок. Полученный результат обусловлен либо видовыми особенностями древесной породы, либо локальными условиями участка, и требует дополнительных исследований. Согласно ранее полученным данным активность фосфатазы в почвах средневозрастного осинника не имела значимых отличий от активности в почвах других средневозрастных лесов (Кулагина и др., 2024).

Корреляция между содержанием гумуса и активностью фосфатазы не обнаружена ($r=0,02$). Корреляционная взаимосвязь между активностью фосфатазы и инвертазы, фосфатазы и каталазы слабая ($r=0,32$ и $r=0,33$), между активностью инвертазы и глинистой фракцией – отсутствует ($r=0,09$).

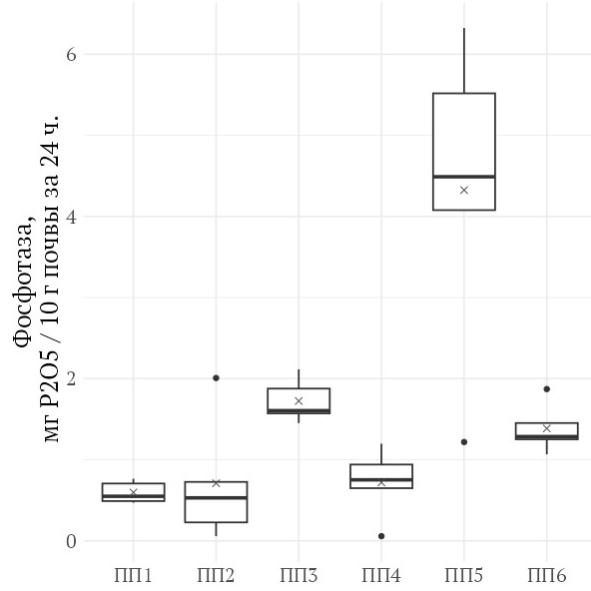


Рис. 2. Активность фосфатазы в гумусовых горизонтах почв
(жирная линия – медиана, \times – среднее значение)

Каталаза разрушает перекись водорода, образующуюся при дыхании живых организмов и окислении органических веществ в почвах, что объясняет корреляционную зависимость средней силы между активностью каталазы в почвах пробных площадок и содержанием гумуса ($r=0,58$). Корреляция с глинистой фракцией не обнаружена ($r=0,27$).

Активность каталазы в почвах исследованных пробных площадок составляет 0,7–2,5 мл 0,1 н KMnO_4 /1 г за 20 мин (рис.3), что по шкале Д. Г. Звягинцева (Звягинцев, 1978) соответствует колебаниям от очень бедной до бедной обеспеченности ферментом.

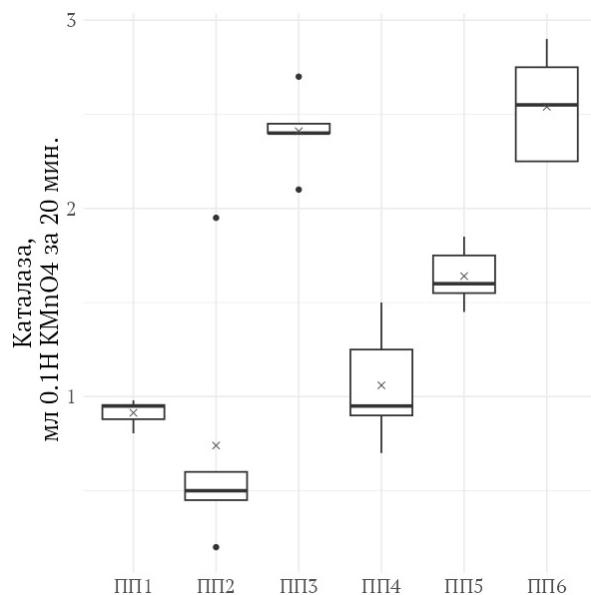


Рис. 3. Активность каталазы в гумусовых горизонтах почв
(жирная линия – медиана, \times – среднее значение)

Максимальная активность каталазы обнаружена в средневозрастных лесах (рис. 3). Согласно тесту Tukey HSD каталазная активность почв в средневозрастных лесах статистически значимо выше активности в почвах молодняков. Корреляция между возрастом леса и активностью каталазы высокая ($r=0,73$) Полученные результаты согласуются с данными В. М. Телесниной с соавторами (Телеснина и др., 2016) об устойчивом возрастании каталазной активности с возрастом древостоя при лесовосстановлении.

Почвы естественного сосняка и сосняка искусственной посадки, а также молодого березняка не имеют статистически значимых отличий между собой по активности каталазы, почва осинника значимо отличается от всех, кроме почвы искусственной сосновой посадки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что активность ферментов в дерново-подзолистых почвах под молодыми и средневозрастными лесами разного породного состава колеблется в следующих пределах: инвертазы – 0,4–3,9 мг глюкозы / 1 г почвы за 4 часа, фосфатазы – 0,6–4,3 мг P_2O_5 / 10 г почвы за 24 часа, каталазы – 0,7–2,5 мл 0,1 н $KMnO_4$ / 1 г за 20 мин.

Активность ферментов в почвах сосновых и лиственных лесов, возрастом 10–40 лет, не имеет значимых отличий, что подтвердила статистическая обработка результатов при помощи тесту Tukey HSD. По-видимому, существенные отличия активности почвенных ферментов в зависимости от принадлежности древостоя к хвойным или лиственным породам проявляются только в лесах старших возрастных групп, что связано с окончательным установлением круговорота веществ, характерного для определенного состава древостоя.

Установлена корреляционная зависимость активности почвенных ферментов от других факторов: инвертазы – от гранулометрического состава почв ($r=0,73$) каталазы – от содержания гумуса ($r=0,58$) и возраста леса ($r=0,73$). Для фосфатазы корреляционная взаимосвязь с каким-либо из изученных факторов не установлена. Всплеск активности фосфатазы в почвах под молодым осинником требует дополнительных исследований.

Список литературы

- Александрова А. Б., Бережная Н. А., Григорьян Б. Р., Иванов Д. В., Кулагина В. И. Красная книга почв Республики Татарстан. – Казань: Фолиант, 2012. – 192 с.
- Галибина Н. А., Никерова К. М., Мошкина Е. В., Климова А. В. Биохимическая активность подстилки как индикатор качества почв сосновых лесов Восточной Фенноскандии // Почвоведение. – 2024. – № 11. – С. 1589–1604.
- Глазман Г. Р., Богатырев Л. Г., Телеснина В. М., Земсков Ф. И., Бенедиктова А. И., Карпухин М. М., Демин В. В. Структурная организация лесных подстилок в условиях стационарных насыпных лизиметров факультета почвоведения МГУ имени М. В. Ломоносова // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 2022. – № 3. – С. 101–112.
- Гродницкая И. Д., Кузнецова Г. В., Антонов Г. И., Кондакова О. Э. Влияние географических культур кедра сибирского и кедра корейского на биологические свойства почвы юга Красноярского края // Лесоведение. – 2016. – № 2. – С. 135–147.
- Завалишин С. И., Карелина В. С. Зависимость активности почвенных ферментов от физико-химических свойств дерново-подзолистых почв трансформированных лесных угодий // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 6 (166). – С. 47–52.
- Завьялова Н. Е. Углеродпротекторная емкость дерново-подзолистой почвы естественных и агроэкосистем Предуралья // Почвоведение. – 2022. – № 8. – С. 1046–1055.
- Звягинцев Д. Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. – 1978. – № 6. – С. 48–54.
- Инишева Л. И., Порохина Е. В., Ефимова С. А., Антоненко С. А. Ферментативная активность почв пойменной экосистемы // Экосистемы. – 2024. – Вып. 39. – С. 7–15.
- Казеев К. Ш., Колесников С. И. Биодиагностика почв: методология и методы исследований. – Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та, 2012. – 260 с.
- Когут Б. М., Семенов В. М. Оценка насыщенности почвы органическим углеродом // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2020. – Вып. 102. – С. 103–124.
- Копчик Г. Н., Копчик С. В., Куприянова Ю. В., Кадулин М. С., Смирнова И. Е. Оценка запасов углерода в почвах лесных экосистем как основа мониторинга климатически активных веществ // Почвоведение. – 2023. – № 12. – С. 1686–1702.

- Кузнецова А. И. Влияние растительности на запасы почвенного углерода в лесах (обзор) // Вопросы лесной науки. – 2021. – Т. 4, № 4. – С. 1–54.
- Кулагина В. И., Сунгатуллина Л. М., Александрова А. Б., Рязанов С. С., Шагидуллин Р. Р., Хайруллина А. М., Гордеева К. А. Ферментативная активность почв Саралинского участка Волжско-Камского заповедника // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. – 2024. – Т. 10, № 3. – С. 92–105.
- Кулагина В. И., Сунгатуллина Л. М., Рязанов С. С., Шагидуллин Р. Р., Александрова А. Б., Рупова Э. Х. Микробная биомасса и ферментативная активность лесных почв Раифского участка Волжско-Камского заповедника // Российский журнал прикладной экологии. – 2023. – № 2 (34). – С. 49–56.
- Курганова И. Н., Телеснина В. М., Лопес де Гереню В. О., Личко В. И., Овсепян Л. А. Изменение запасов углерода, микробной и ферментативной активности агродерново-подзолов южной тайги в ходе постагрогенной эволюции // Почвоведение. – 2022. – № 7. – С. 825–842.
- Мищенко Н. В., Курочкин И. Н., Чугай Н. В., Кулагина Е. Ю. Оценка состояния почв необрабатываемых сельскохозяйственных угодий по показателям ферментативной активности, гумуса и тяжелых металлов // Вестник Нижневартовского государственного университета. – 2021. – № 2. – С. 106–111.
- Наими О. И., Безуглова О. С., Полиенко Е. А., Лыхман В. А., Горовцов А. В., Поволоцкая Ю. С., Дубинина М. Н., Патрикеев Е. С. Фосфатный режим и активность фосфатазы в черноземе обыкновенном при возделывании нута // Агрохимический вестник. – 2020. – № 3. – С. 25–29.
- Перминова Е. М., Лаптева Е. М. Каталазная активность подзолистых почв коренного ельника черничного и разновозрастных лиственно-хвойных сообществ // Аграрный вестник Урала. – 2018. – № 5. – С. 44–53.
- Пристова Т. А. Запасы углерода в почве березово-словного молодняка средней тайги Республики Коми // Экосистемы. – 2024. – Вып. 40. – С. 76–83.
- Семенов В. М., Паутова Н. Б., Лебедева Т. Н., Хромычкина Д. П., Семенова Н. А., Лопес де Гереню В. О. Разложение растительных остатков и формирование активного органического вещества в почве инкубационных экспериментов // Почвоведение. – 2019. – № 10. – С. 1172–1184.
- Телеснина В. М., Ваганов И. Е., Карлсен А. А., Иванова А. Е., Жуков М. А., Лебедев С. М. Особенности морфологии и химических свойств постагрогенных почв южной тайги на легких отложениях (Костромская область) // Почвоведение. – 2016. – № 1. – С. 115–129.
- Хазиев Ф. Х. Функциональная роль ферментов в почвенных процессах // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. – 2015. – Том. 20, № 2 (78). – С. 14–24.
- Хазиев Ф. Х. Экологические связи ферментативной активности почв // Экобиотех. – 2018. – Т. 1, № 2. – С. 80–92.
- Kazeev K. Sh., Poltoratskaya T. A., Yakimova A. S., Odobashyan M. Yu., Shkhapatsev A. K., Kolesnikov S. I. Post-fire changes in the biological properties of the brown soils in the Utrish state nature reserve (Russia) // Nature Conservation Research. – 2019. – Т. 4, N S1 – P. 93–104.
- Margalef O., Sardans J., Fernández-Martínez M., Molowny-Horas R., Janssens I. A., Ciais P., Goll D. S., Richter A., Obersteiner M., Asensio D., Peñuelas J. Global patterns of phosphatase activity in natural soils // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7 (1). – P. 1–13.

Kulagina V. I., Sungatullina L. M., Ryazanov S. S., Alexandrova A. B., Shagidullin R. R., Rupova E. H. Enzyme Activity in Sod-Podzolic Soils of Young and Middle-aged Forests // 72–78.

A comparison of the enzymatic activity of sod-podzolic soils was conducted across six trial plots beneath the forests of different tree species in the Republic of Tatarstan. The trial plots are located no more than 55 km from the city of Kazan. The soil cover of all plots is represented by sod-podzolic soils. Forests selected for the study consisted of single-species stands without admixtures: pine, birch, oak, and aspen forests. The forest age ranges from 10 to 40 years. The study revealed that the distribution patterns of soil biochemical properties differ from those observed in older forests. For instance, no statistically significant difference in enzymatic activity was found between the soils of pine and deciduous forests. At the studied plots, invertase activity ranged from 0.4 to 3.9 mg of glucose per 1 g of soil over a period of 4 hours. Invertase exhibited a strong dependence on clay fraction content ($r=0.73$; $p<0.05$) and showed no correlation with humus content. Catalase activity ranged between 0.7 and 2.5 ml of 0.1 N KMnO₄ per 1 g of soil over 20 minutes, with a moderate correlation to humus content ($r=0.58$; $p<0.05$) and no correlation with clay fraction. A statistically significant difference in catalase activity was observed between the soils of middle-aged forests and young stands. Phosphatase activity ranges from 0.6 to 4.3 mg of P₂O₅ per 10 g of soil over 24 hours and demonstrated no correlation with either humus or clay fraction. The reasons for the statistically significant difference in phosphatase activity in aspen forest soils compared to soils of other studied forests require further investigation.

Key words: forest ecosystems, soil, invertase, catalase, phosphatase.

Поступила в редакцию 17.03.25
Принята к печати 04.05.25