

УДК 631.465

DOI 10.5281/ZENODO.20787974

АКТИВНОСТЬ ФЕРМЕНТОВ В СЕРЫХ ЛЕСНЫХ И ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ ЛЕСОВ ТАТАРСТАНА

**Кулагина В. И., Александрова А. Б., Рязанов С. С., Сунгатуллина Л. М.,
Гордеева К. А., Хайруллина А. М., Рупова Э. Х.**

*Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Казань, Российская Федерация
E-mail: viksoil@mail.ru*

Показано, что активность инвертазы, фосфатазы и каталазы в серых лесных почвах в почвах пробных площадок в 1,5–3 раза выше, чем в дерново-подзолистых. Разница статистически значима согласно Tukey HSD test. Активность почвенных ферментов увеличивалась в ряду: сосняки < березняк + дубняк < лиственный ельник + ельник. Обнаружена высокая степень взаимосвязи между инвертазой, фосфатазой и каталазой в почвах исследованных участков ($r=0,71-0,86$, $p<0,05$). Показано, что активность инвертазы, фосфатазы и каталазы проявила более тесную корреляционную взаимосвязь с запасами углерода в слое почвы 0–30 см, чем с содержанием гумуса и азота в гумусовом горизонте. Установлено, что взаимосвязь с запасами углерода в лесной подстилке средняя для инвертазы и фосфатазы ($r=0,67$ и $r=0,69$, $p<0,05$), и слабая для каталазы ($r=0,44$, $p<0,05$).

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

ВВЕДЕНИЕ

При изучении секвестрации углерода из атмосферы приоритет отдается лесам, как наиболее эффективным поглотителям парниковых газов. Однако поглощение углерода лесной экосистемой – это сложная динамическая совокупность процессов фотосинтеза, дыхания, длительного депонирования, эмиссии углерода и перехода из одного пула в другой [1–3]. Почва по запасам углерода в лесной экосистеме обычно занимает второе место после биомассы древостоя, запасы углерода в подстилке, как правило, меньше, чем запасы в почве, но их также рекомендуется учитывать при расчетах общих запасов [4–6]. На баланс углерода в таких пулах лесных экосистем, как почва и лесная подстилка, влияет множество факторов, включая биохимические свойства почв, то есть активность ферментов, участвующих в круговороте углерода. Ферментативная система почв определяет скорость минерализации лесной подстилки, формирование запасов органического углерода, что особенно актуально в условиях меняющегося климата и антропогенной нагрузки [7–9].

Ферментативная активность почвы служит интегральным индикатором биохимического потенциала экосистем, отражая интенсивность трансформации органического вещества и доступность биогенных элементов.

Ферментативная активность связана с типом почвы и породным составом леса [9–13].

Серые лесные и дерново-подзолистые почвы, доминирующие под лесами Татарстана, характеризуются существенными различиями в физико-химических свойствах, обусловленными историей и условиями почвообразования. Эти различия формируют специфические экологические ниши для почвенной микробиоты, модулируя спектр и интенсивность накопления ферментов в почвах. По данным Хазиева Ф. Х. в Предуралье ферментативная активность серых лесных почв выше, чем дерново-подзолистых [9]. Однако региональные особенности ферментативной активности в почвенно-климатических условиях Поволжья, к которому относится Татарстан, изучены недостаточно.

Сравнительный анализ хвойных и лиственных лесов позволяет выявить фундаментальные закономерности управления биогеохимическими циклами. Исследования демонстрируют, что тип растительного покрова оказывает более сильное влияние на ферментативный профиль, чем некоторые абактериальные факторы почвы [8, 10, 13]. Считается, что широколиственные леса способствуют быстрому обороту питательных веществ и переходу части углерода в гумус, хвойные экосистемы могут обеспечивать долгосрочную секвестрацию углерода в лесной подстилке благодаря замедленной динамике разложения и специфике ферментативного аппарата [14].

Несмотря на наличие обширных данных по ферментативной активности в глобальном масштабе [15], информация о количественных показателях активности ферментов в серых лесных и дерново-подзолистых почвах Татарстана, а также об их связи с качественными характеристиками подстилки и запасами органического углерода, остается фрагментарной. Отсутствие систематизированных данных препятствует разработке точных моделей круговорота элементов для региона.

Целью данной работы является оценка активности ферментов в дерново-подзолистых и серых лесных почвах Республики Татарстан, выявление взаимосвязи ферментативной активности с запасами органического углерода в почве и лесной подстилке, а также сравнительный анализ биохимических свойств почв под лесами разного породного состава.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в мае 2025 г. на 6 учетных площадках с лесами разного породного состава, почвенный покров которых представлен серыми лесными и дерново-подзолистыми почвами. Места расположения площадок представлены на карте (рис. 1). Площадка 5 и площадка 6 расположены очень близко, поэтому обозначающие их знаки накладываются друг на друга.

Возраст лесов от 71 до 110 лет. Пять площадок заложены в лесах, представляющих собой искусственные посадки, 110-летний дубняк имеет естественное происхождение.

Площадка 1. Посадки сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), возраст – 75 лет. Согласно градации возрастных групп относятся к приспевающим. Густота древостоя 751 шт./га. Почвенный покров представлен дерново-подзолистыми

почвами. Пробная площадка 1 расположена в Государственном природном зоологическом заказнике регионального значения «Шорский».

Площадка 2. Посадки березы повислой (*Betula pendula* L.), возраст – 84 года, перестойные, 625 шт./га. Почвы – дерново-подзолистые. Охранная зона Раифского участка Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника (ВКГПБЗ).

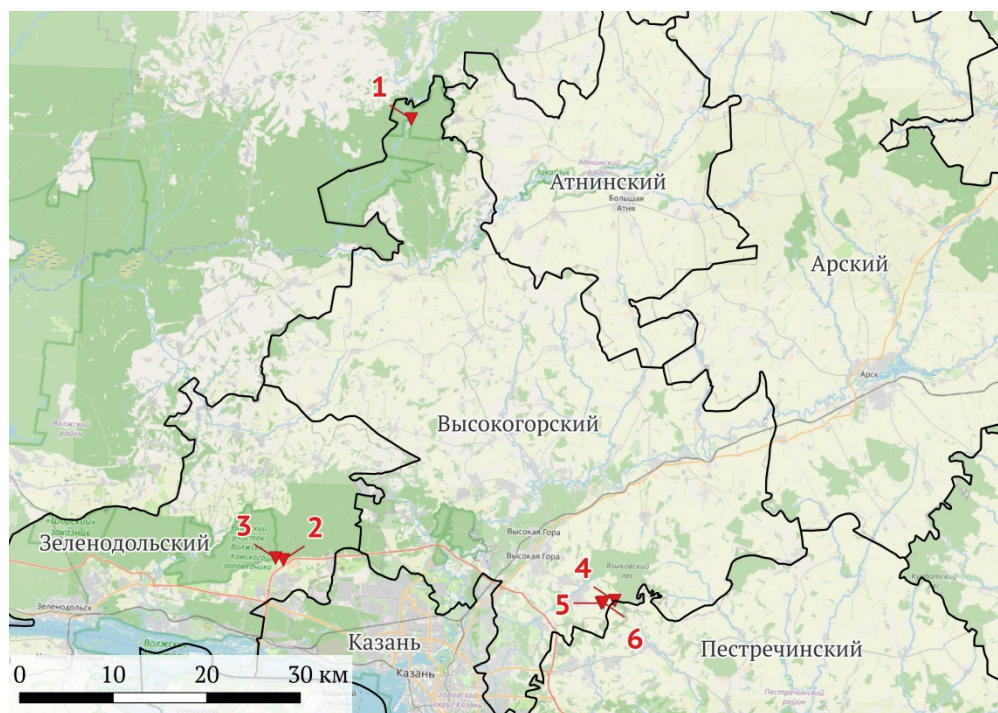


Рис. 1. Карта расположения пробных площадок (расшифровку см. в тексте).

Площадка 3. Посадки сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), возраст – 71 год, припевающие, 407 шт./га. Почвы – дерново-подзолистые. Охранная зона ВКГПБЗ.

Площадка 4. Лес естественного происхождения. Дуб высокоствольный (*Quercus petraea* L.) с примесью липы, клена, вяза. Средний возраст дуба – 110 лет. Возраст остальных пород – менее 30 лет. Густота древостоя дуба – 112 шт./га, остальных пород – 579 шт./га. Почвы – серые лесные. Иске-Казанское участковое лесничество, близ с. Пановка.

Площадка 5. Посадки лиственницы сибирской (*Larix sibirica* L.), возраст – 80 лет, средневозрастные, 646 шт./га. Почвы – серые лесные. Иске-Казанское участковое лесничество, близ с. Пановка.

Площадка 6. Посадки ели европейской (*Picea abies* L.), возраст – 80 лет, припевающие, 1475 шт./га. Почвы – серые лесные. Иске-Казанское участковое лесничество, близ с. Пановка.

Внимание к лесным экосистемам на основе искусственных посадок объясняется тем, что в международной отчетности по секвестрации углерода учитываются в основном так называемые «управляемые леса» [16]. Дубняк заинтересовал относительной сохранностью и возрастом.

Площадь площадок от 1/10 до 3/10 га. На каждой пробной площадке почвенные образцы отбирались из пяти точек методом конверта на всю глубину гумусового горизонта, подстилки – из 24 точек при помощи рамки. Содержание гумуса определяли методом Тюрина И. В., валовый азот – колориметрически после разложения почвы смесью серной и хлорной кислот, активность каталазы – методом Джонсона и Темпле, инвертазы – по Щербаковой Т. А., фосфатазы по методу Геллера И. Т. и Гинзбург К. Е.

Некоторые параметры почв и лесных подстилок представлены в таблице 1.

Таблица 1

Запасы углерода в почве и лесной подстилке, содержание гумуса и азота в почвах пробных площадок ($M \pm m$)

ПП, №	Запасы С в слое почвы 0-30 см, т/га	Запасы С в подстилке, т/га	Гумус, %	N, %
1	27,4±3,5	6,1±0,3	2,3±0,3	0,11±0,01
2	17,2±1,2	0,7±0,1	0,9±0,1	0,11±0,01
3	9,1±2,0	3,1±0,3	0,8±0,1	0,06±0,01
4	59,6±12,2	1,4±0,2	4,3±0,8	0,32±0,09
5	31,6±3,9	7,2±0,4	2,5±0,2	0,19±0,01
6	60,2±2,3	11,6±0,9	3,6±0,1	0,25±0,01

Лесная подстилка в слой 0–30 см не входила – мощность этого слоя отсчитывалась от начала гумусового горизонта. Активность ферментов определялась только в гумусовом горизонте.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Инвертаза – фермент группы гидролаз, катализирующий гидролиз сахарозы до моносахаридов. Этот процесс является первым шагом в минерализации сложных углеводных соединений, поступающих в почву в виде лесной подстилки, корневых выделений и продуктов жизнедеятельности микроорганизмов [9, 17]. Считается, что активность инвертазы служит надежным индикатором общего метаболического потенциала почвы и скорости оборота легкодоступных форм органического углерода [18].

Логично ожидать, что породный состав леса и состав поступающих растительных остатков, должен оказывать существенное воздействие на активность инвертазы.

Проведенные исследования показали, что в почвах пробных площадок средняя активность инвертазы колеблется от 0,73 до 5,50 мг глюкозы /1 г почвы за 4 часа (рис. 2), то есть может отличаться в 7,5 раз. Самая низкая активность инвертазы обнаружена в почвах под сосняками (площадки 1 и 3), максимальная – под еловыми посадками (площадка 6).

Результаты, показывающие низкую активность инвертазы в почвах под сосняками по сравнению с лесами другого породного состава, согласуются с ранее полученными данными [4, 19].

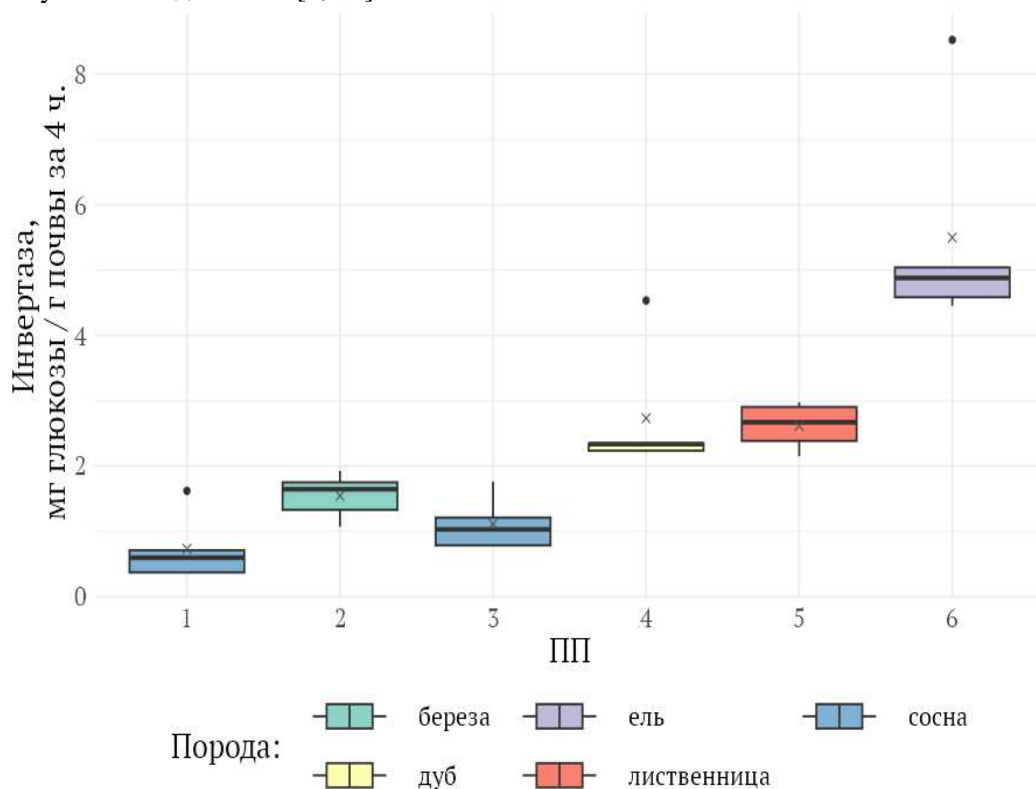


Рис. 2. Активность инвертазы в почвах пробных площадок. Расшифровку номеров площадок см. в тексте. Крестиком обозначено среднее значение, жирной линией – медиана, точки – «выбросы» значений.

Согласно Tukey HSD test активность фермента в почвах под сосняками статистически значимо меньше, чем под дубняком, лиственничником и ельником (табл. 2), для березняка – разница не значима. Отсутствие статистически значимой разницы по активности инвертазы между почвами березняков и сосняков

отмечалось нами ранее для молодых лесов [4], однако в данном случае леса не относятся к молоднякам. Возможными причинами могли послужить искусственный характер посадок, а также то, что березняк и сосняки в отличие от остальных пород располагались на дерново-подзолистых почвах.

Вполне ожидаемым оказалось отсутствие статистически значимой разницы по активности инвертазы между почвами лиственных лесов – дубняка и березняка (табл. 2). Однако предполагалось, что активность инвертазы под всеми хвойными лесами будет ниже, чем под лиственными. Поэтому несколько неожиданной оказалась высокая активность инвертазы в почвах ельника и лиственничника (рис. 2).

Таблица 2

Оценка значимости разницы по активности инвертазы согласно тесту Тьюки (Tukey HSD test) под лесами разного породного состава

Преобладающие породы	diff	lwr	upr	p adj
дуб-береза	1,189	-0,422	2,800	0,224
ель-береза	3,953	2,342	5,564	0,000*
лиственница-береза	1,073	-0,538	2,684	0,315
сосна-береза	-0,622	-2,017	0,773	0,688
ель-дуб	2,764	1,153	4,375	0,000*
лиственница-дуб	-0,116	-1,727	1,495	1,000
сосна-дуб	-1,811	-3,206	-0,416	0,007*
лиственница-ель	-2,880	-4,491	-1,269	0,000*
сосна-ель	-4,575	-5,970	-3,180	0,000*
сосна-лиственница	-1,695	-3,090	-0,300	0,012*

Примечание: *разница значима

Активность инвертазы в почве ельника статистически значимо выше, чем на остальных пробных площадках (табл. 2). Причинами могут быть как индивидуальные особенности древесных пород, так и влияние типа почв. О том, что хвойный опад не является обязательной причиной низкой ферментативной активности, свидетельствует работа Перминовой Е.М. с соавторами, отмечавшими довольно высокую активность инвертазы в подстиочно-торфяном горизонте подзолистых почв под ельниками в Республике Коми – от $17,5 \pm 2,6$ до 26 ± 4 мг глюкозы / г за 24 часа [20].

Установлено, что средняя активность инвертазы в дерново-подзолистых почвах исследованных площадок в три раза ниже, чем в серых лесных (рис. 3). Согласно тесту Тьюки (Tukey HSD test) разница статистически значима. Тем не менее, средняя активность инвертазы в дерново-подзолистых почвах ($1,13 \pm 0,14$ мг глюкозы/1 г почвы за 24 часа) и серых лесных ($3,62 \pm 0,45$ мг глюкозы/1 г почвы за

24 часа) соответствует очень бедной обогащенности ферментами по шкале Звягинцева [17]. Полученные результаты в целом согласуются с данными Дроздовой Н. И. с соавторами для дерново-подзолистых почв [21], а также соответствуют ранее полученным данным для дерново-подзолистых почв молодых и средневозрастных лесов Республики Татарстан [4]. Активность инвертазы в серых лесных почвах исследованных площадок ниже, чем в агросерых почвах Татарстана [22].

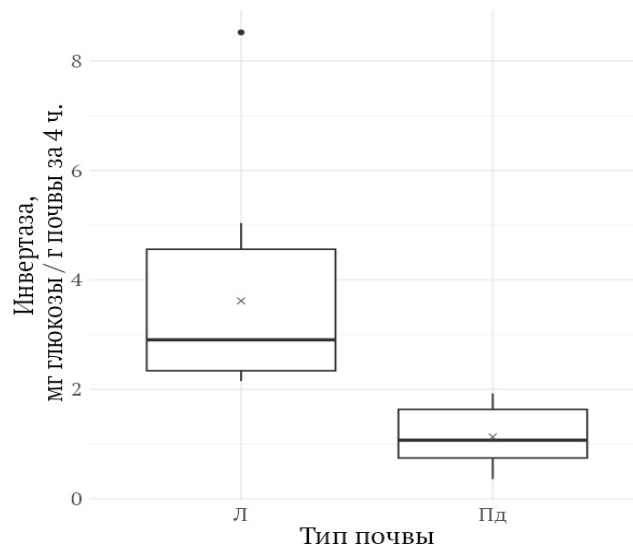


Рис. 3. Активность инвертазы в серых лесных и дерново-подзолистых почвах пробных площадок. Крестиком обозначено среднее значение, жирной линией – медиана, точки – «выбросы» значений. Пд – дерново-подзолистые, Л – серые лесные почвы.

В результате исследований на пробных площадках установлено, что наиболее тесная зависимость наблюдается между активностью инвертазы и запасами углерода в слое почвы 0–30 см и запасами в лесной подстилке – коэффициент корреляции Пирсона в обоих случаях равен 0,68 ($p < 0,05$), что соответствует градации «средняя положительная взаимосвязь». Взаимосвязь активности инвертазы с содержанием гумуса и азота слабая положительная ($r = 0,43$ и $r = 0,42$ соответственно, $p < 0,05$). Полученные результаты в целом согласуются с данными других исследователей о том, что активность инвертазы коррелирует с содержанием гумуса [9,17]. С соотношением C/N взаимосвязи не обнаружено, коэффициент корреляции равен -0,21.

Фосфатаза

Фермент фосфатаза катализирует отщепление остатка фосфорной кислоты от фосфорорганических соединений, тем самым обеспечивая почвенные микроорганизмы и растения доступным фосфором [9, 17].

Установлено, что средняя активность фосфатазы в почвах исследованных площадок колеблется от 1,42 до 6,77 мг P_2O_5 /10 г почвы за 24 часа (рис. 4).

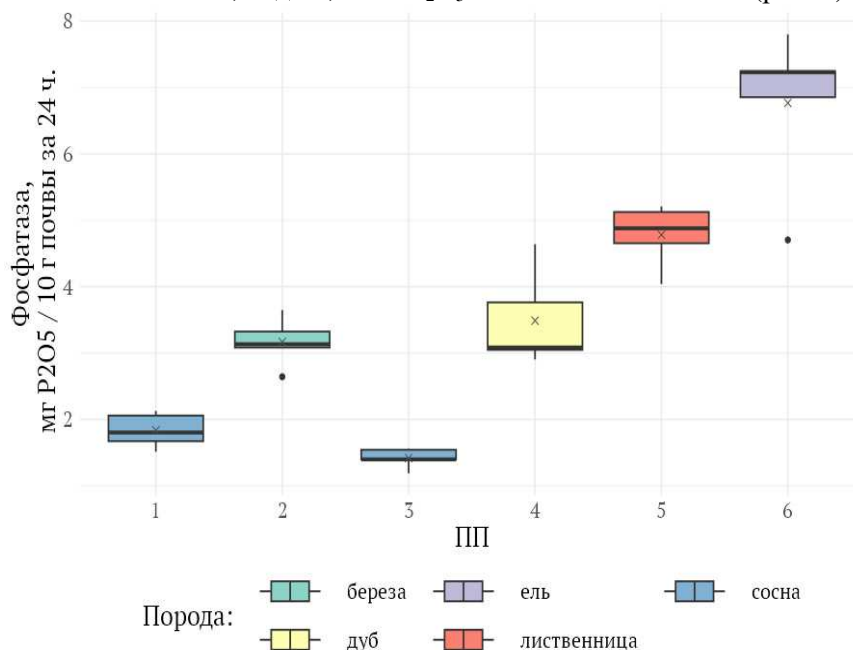


Рис. 4. Активность фосфатазы в почвах пробных площадок. Расшифровку номеров площадок см. в тексте. Крестиком обозначено среднее значение, жирной линией – медиана, точки – «выбросы» значений.

То есть, согласно шкале Звягинцева [17] активность фосфатазы изменяется от бедной под сосняками, до средней под березняком, лиственничником, дубняком, богатой – под ельником. В целом активность фосфатазы в почвах под лесами, кроме ельника, соответствует ранее полученным данным для молодых и средневозрастных лесов Татарстана [4], где активность фосфатазы составляла 0,6–4,3 мг P_2O_5 /10 г почвы за 24 часа. Активность фосфатазы под ельниками в республике ранее не изучалась.

Примечательно, что почвы всех площадок с лесами разного породного состава, статистически значимо отличаются по активности фосфатазы за исключением двух площадок с лиственными лесами – березняком и дубняком (табл. 3).

Максимальная активность фосфатазы, как и инвертазы, наблюдалась в почвах под искусственными посадками ели. Корреляция между инвертазой и фосфатазой в исследованных почвах сильная ($r=0,86$, $p<0,05$). Взаимосвязь между активностью фосфатазы и запасами углерода в слое 0–30 см средняя ($r=0,61$, $p<0,05$), как и с запасами в подстилке ($r=0,69$, $p<0,05$). С содержанием гумуса в горизонте A1 взаимосвязь слабая ($r=0,46$, $p<0,05$), как и с содержанием валового азота ($r=0,45$, $p<0,05$).

Средняя активность фосфатазы в дерново-подзолистых почвах исследованных участков составила $2,14 \pm 0,21$ мг P_2O_5 /10 г почвы за 24 часа, в серых лесных

5,01±0,41 мг P₂O₅ /10 г почвы за 24 часа (рис. 5), то есть в серых лесных почвах в 2,5 выше. Разница статистически значима.

Таблица 3

Оценка значимости разницы по активности фосфатазы согласно тесту Тьюки (Tukey HSD test) под лесами разного породного состава

Преобладающие породы	diff	lwr	upr	p adj
дуб-береза	0,321	-0,858	1,500	0,928
ель-береза	3,599	2,420	4,778	0,000*
лиственница-береза	1,614	0,435	2,793	0,004*
сосна-береза	-1,540	-2,561	-0,519	0,001*
ель-дуб	3,278	2,099	4,457	0,000*
лиственница-дуб	1,293	0,114	2,472	0,027*
сосна-дуб	-1,861	-2,882	-0,840	0,000*
лиственница-ель	-1,985	-3,164	-0,806	0,000*
сосна-ель	-5,139	-6,160	-4,118	0,000*
сосна-лиственница	-3,154	-4,175	-2,133	0,000*

Примечание: *разница значима

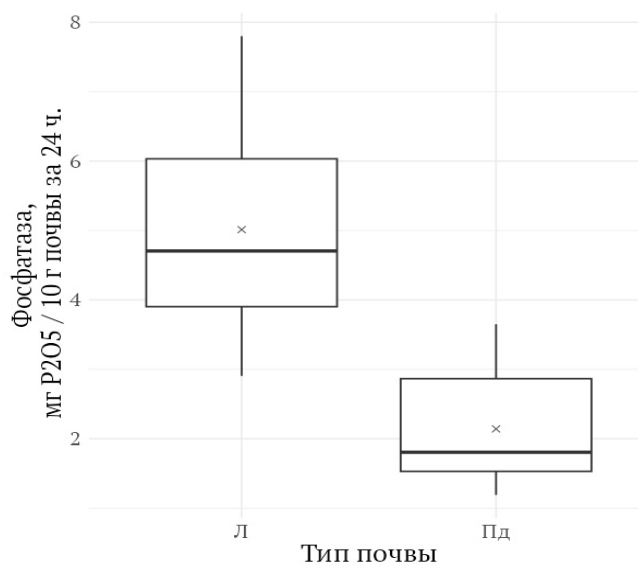


Рис. 5. Активность фосфатазы в серых лесных и дерново-подзолистых почвах пробных площадок. Крестиком обозначено среднее значение, жирной линией – медиана, точки – «выбросы» значений. Пд – дерново-подзолистые, Л – серые лесные почвы.

Каталаза

Каталаза способствует разложению перекиси водорода, образующейся в процессе дыхания живых организмов, находящихся в почве, на воду и молекулярный кислород [17, 20].

Активность каталазы в почвах исследованных участков колеблется от 1,27 до 2,67 мл 0,1 KMnO_4 / г почвы за 20 мин (рис. 6).

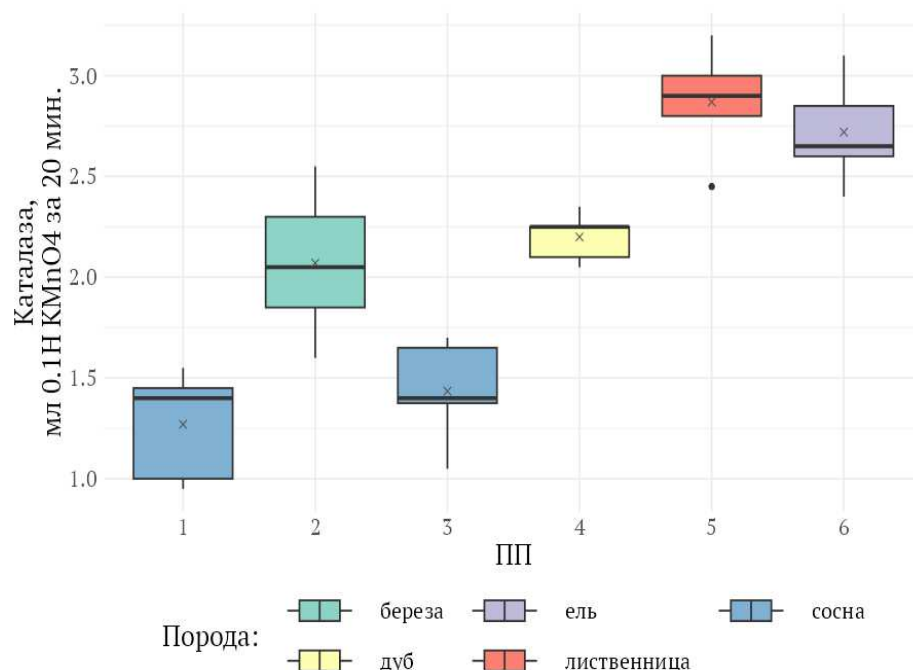


Рис. 6. Активность каталазы в почвах пробных площадок. Расшифровку номеров площадок см. в тексте. Крестиком обозначено среднее значение, жирной линией – медиана, точки – «выбросы» значений.

Каталаза – единственный из исследованных ферментов, чья средняя активность в почве под лиственничником выше, чем под ельником, хотя тест Тьюки свидетельствует об отсутствии статистически значимой разницы между ними (табл. 3). Почвы участков с лиственными лесами (дубняком и березняком) также статистически значимо не отличались по активности каталазы. Между остальными лесами разница значима.

Самая низкая активность фермента обнаружена в почвах под сосняками, она ниже, чем активность в почвах лиственных лесов, что согласуется с исследованиями, проведенными в Волжско-Камском заповеднике [19].

Активность каталазы в ельниках и лиственничниках Татарстана до этого не изучалась, но согласно полученным нами результатам, именно в почвах этих искусственных посадок она максимальна. Телеснина В. М. с соавторами,

изучавшие ферментативную активность почв в Костромской области, обнаружили максимальную активность каталазы в почве смешанного березово-елового леса. Они же связывали увеличение каталазной активности в почвах под древесной растительностью с влиянием выделений корневой системы и наличием лесной подстилки [23]. Следует отметить, что на исследованных площадках именно в ельнике густота древостоя максимальна, а ельнике и лиственничнике – самые большие запасы углерода в подстилке.

Таблица 4

**Оценка значимости разницы по активности каталазы согласно тесту Тьюки
(Tukey HSD test) под лесами разного породного состава**

Преобладающие породы	diff	lwr	upr	p adj
дуб-береза	0,130	-0,375	0,635	0,941
ель-береза	0,650	0,145	1,155	0,007*
лиственница-береза	0,800	0,295	1,305	0,001*
сосна-береза	-0,718	-1,154	-0,281	0,001*
ель-дуб	0,520	0,015	1,025	0,041*
лиственница-дуб	0,670	0,165	1,175	0,005*
сосна-дуб	-0,848	-1,284	-0,411	0,000*
лиственница-ель	0,150	-0,355	0,655	0,904
сосна-ель	-1,368	-1,804	-0,931	0,000*
сосна-лиственница	-1,518	-1,954	-1,081	0,000*

Примечание: *разница значима

Взаимосвязь активности каталазы с активностью инвертазы и фосфатазы высокая ($r=0,71$ и $r=0,78$ соответственно, $p<0,05$), что объясняется участием всех трех ферментов в круговороте углерода в лесных экосистемах, хотя они являются катализаторами разных реакций.

Взаимосвязь активности каталазы с запасами углерода в слое почв 0–30 см средняя ($r=0,50$, $p<0,05$), с запасами в лесной подстилке – низкая ($r=0,44$, $p<0,05$), с содержанием гумуса и азота – низкая ($r=0,38$ и $r=0,39$ соответственно, $p<0,05$). Ранее полученные данные свидетельствовали о более тесной связи между содержанием гумуса и активностью каталазы в почвах Татарстана [4, 19], однако большая часть ранее изученных лесов имела естественное происхождение.

Если рассматривать активность каталазы отдельно в разных типах почв, то серых лесных почвах средняя активность каталазы примерно в 1,5 раза выше, чем в дерново-подзолистых – $2,60 \pm 0,09$ мл 0,1 н KMnO_4 за 20 мин. и $1,59 \pm 0,12$ мл 0,1 н KMnO_4 за 20 мин. соответственно (рис. 7). Разница статистически значима согласно Tukey HSD test.

Полученные данные согласуются с выводами Хазиева Ф. Х. о том, что в генетическом ряду равнинных почв ферментативная активность возрастает от дерново-подзолистых к серым лесным почвам [9].

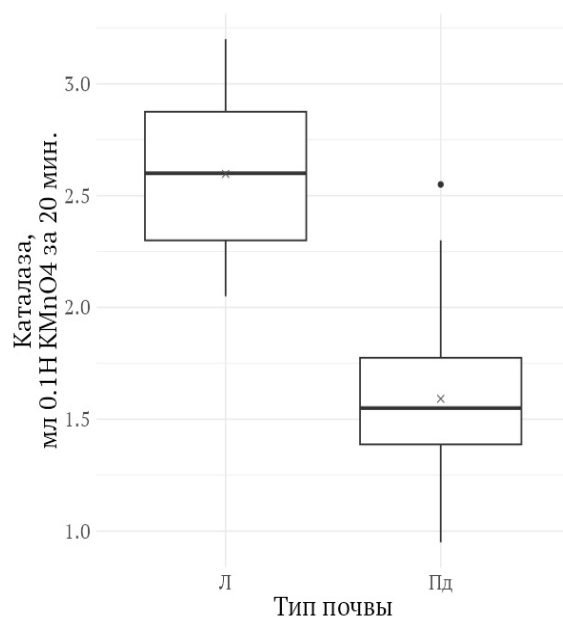


Рис. 7. Активность каталазы в серых лесных и дерново-подзолистых почвах пробных площадок. Крестиком обозначено среднее значение, жирной линией – медиана, точки – «выбросы» значений. Пд – дерново-подзолистые, Л – серые лесные почвы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что средняя активность инвертазы, фосфатазы и каталазы в серых лесных почвах исследованных пробных площадок в 1,5–3 раза выше, чем в дерново-подзолистых. Разница статистически значима согласно Tukey HSD test. Существенная разница в биохимических свойствах серых лесных и дерново-подзолистых почв еще раз подтверждает необходимость учета типа почв при исследованиях лесных экосистем.

Активность почвенных ферментов увеличивалась в ряду: сосняки < березняк + дубняк < лиственничник + ельник. Почвы березняка и дубняка не имели статистически значимых отличий по активности изученных ферментов. Высокая биохимическая активность в почвах ельников требует дополнительных исследований.

Обнаружена высокая степень взаимосвязи между инвертазой, фосфатазой и каталазой на исследованных участках ($r=0,71-0,86$, $p<0,05$), что объясняется участием изученных ферментов в круговороте углерода.

Показано, что активность инвертазы, фосфатазы и каталазы проявила более тесную корреляционную взаимосвязь с запасами углерода в слое почвы 0–30 см, чем с содержанием гумуса и азота в гумусовом горизонте. Взаимосвязь с запасами углерода в слое 0–30 см средняя ($r = 0,50–0,68$, $p < 0,05$), с гумусом и азотом – слабая ($r = 0,37–0,46$, $p < 0,05$). Установлено, что взаимосвязь с запасами углерода в лесной подстилке средняя для инвертазы и фосфатазы ($r = 0,67$ и $r = 0,69$, $p < 0,05$), и слабая для каталазы ($r = 0,44$, $p < 0,05$). Более тесная взаимосвязь ферментативной активности с пулами углерода в подстилке и почве, чем с текущим содержанием гумуса, подтверждает активную вовлеченность ферментов в круговорот углерода в лесных экосистемах.

Изучение взаимосвязи активности почвенных ферментов с круговоротом углерода в лесах разного породного состава должно быть продолжено.

Список литературы

1. Замолотчиков Д. Г. Системы оценки и прогноза запасов углерода в лесных экосистемах / Д. Г. Замолотчиков // Устойчивое лесопользование. – 2011. – №4. – С. 15–22.
2. Кузнецова А. И. Влияние растительности на запасы почвенного углерода в лесах (обзор) / А. И. Кузнецова // Вопросы лесной науки. – 2021. – Т. 4, №4. – С. 1–54.
3. Пристова Т. А. Запасы углерода в почве березово-елового молодняка средней тайги Республики Коми / Т. А. Пристова // Экосистемы. – 2024. – Вып. 40. – С. 76–83.
4. Кулагина В. И. Активность ферментов в дерново-подзолистых почвах молодых и средневозрастных лесов / В. И. Кулагина, Л. М. Сунгатуллина, С. С. Рязанов, А. Б. Александрова, Р. Р. Шагидуллин, Э. Х. Рупова // Экосистемы. – 2025. – № 42. – С. 72–78.
5. Кулагина В. И. Закономерности распределения запасов углерода в почвах и лесной подстилке Волжско-Камского заповедника / В. И. Кулагина, А. Б. Александрова, С. С. Рязанов, Р. Р. Шагидуллин, Л. М. Сунгатуллина, Э. Х. Рупова // Российский журнал прикладной экологии. – 2024. – № 3 (39). – С. 28–33.
6. Методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов. Утв. Распоряжением Минприроды России от 30.06.2017 №20-р.
7. Kujur M. Kinetics of soil enzyme activities under different ecosystems: An index of soil quality / M. Kujur, A. KumarPatel // Chilean journal of agricultural research. – 2014. – No 74(1). – P. 96–104.
8. Цандекова О. Л. Влияние эдафических факторов на активность ферментов почвы в подкроновом пространстве древесных растений в условиях Кемеровской области / О. Л. Цандекова // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. – 2025. – № 3 (55). – С. 68–77.
9. Хазиев Ф. Х. Экологические связи ферментативной активности почв / Ф. Х. Хазиев // Экобиотех. – 2018. – Т. 1, № 2. – С. 80–92.
10. Галибина Н. А. Биохимическая активность подстилки как индикатор качества почв сосновых лесов Восточной Финляндии / Н. А. Галибина, К. М. Никерова, Е. В. Мошкина, А. В. Климова // Почвоведение. – 2024. – №11. – С. 1589–1604.
11. Тах И. П. Ферментативная активность различных типов почв лесостепного пояса в условиях Западного Кавказа / И. П. Тах, А. Х. Агиров // Новые технологии. – 2009. – № 4. – С. 63–67.
12. Чернышева Е. В. Микробная биомасса и ферментативная активность целинных и пахотных почв как показатели физиологического состояния микробных сообществ / Е. В. Чернышева, К. С. Душанова, Т. Э. Хомутова, А. В. Борисов // Успехи современной биологии. – 2023. – Т. 143, № 4. – С. 403–416.
13. Перминова Е. М. Каталитическая активность подзолистых почв коренного ельника черничного и разновозрастных лиственно-хвойных сообществ / Е. М. Перминова, Е. М. Лаптева // Аграрный вестник Урала. – 2018. – № 5 (172). – С. 44–53.

14. Guolong Hou. A meta-analysis of changes in soil organic carbon stocks after afforestation with deciduous broadleaved, sempervirent broadleaved, and conifer tree species / Guolong Hou, Claudio O. Delang, Xixi Lu, Lei Gao // *Annals of Forest Science*. – 2020. – 77 (4). – P.92. – [ff10.1007/s13595-020-00997-3](https://doi.org/10.1007/s13595-020-00997-3). [ffhal-03354949f184](https://doi.org/10.1007/s13595-020-00997-3)
15. Daunoras J. Role of Soil Microbiota Enzymes in Soil Health and Activity Changes Depending on Climate Change and the Type of Soil Ecosystem / J. Daunoras, A. Kačergius, R. Gudiukaitė // *Biology (Basel)* – 2024. – 13(2). – P.85. <https://doi.org/10.3390/biology13020085>
16. Булаткин Г. А. Оценка влияния управляемых лесов на баланс углекислого газа в атмосфере Земли / Г. А. Булаткин // *Жизнь земли*. – 2021. – Т 43, №1. – С. 54–66.
17. Казеев К. Ш. Биодиагностика почв: методология и методы исследований / К. Ш. Казеев, С. И. Колесников. – Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та, 2012. – 260 с.
18. Anderson T. H. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality / T. H. Anderson // *Agriculture, ecosystems and environment*. – 2003. – Vol. 98, No 1-3. – P. 285–293.
19. Кулагина В. И. Микробная биомасса и ферментативная активность лесных почв Раифского участка Волжско-Камского заповедника / В. И. Кулагина, Л. М. Сунгатуллина, С. С. Рязанов, Р. Р. Шагидуллин, А. Б. Александрова, Э. Х. Рупова // *Российский журнал прикладной экологии*. – 2023. – № 2 (34). – С. 49–56.
20. Перминова Е. М. Биохимическая активность подзолистых почв на вырубках среднетаёжных еловых лесов / Е. М. Перминова, Н. Н. Бондаренко, Т. Н. Щемелинина, Е. М. Лаптева // *Теоретическая и прикладная экология*. – 2023. – № 1. – С. 56–66.
21. Дроздова Н. И. Исследование инвертазной и протеазной активности почвы территорий, сопредельных с полигонами твердых коммунальных отходов / Н. И. Дроздова, В. С. Аверин // *Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины*. – 2023. – № 3 (138). – С. 15–20.
22. Проблемы и основные направления повышения эффективности функционирования АПК региона в условиях глобализации и импортозамещения / Монография. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2025. – 392 с.
23. Телеснина В. М. Особенности морфологии и химических свойств постагрогенных почв южной тайги на легких отложениях (Костромская область) / В. М. Телеснина, И. Е. Ваганов, А. А. Карлсен, А. Е. Иванова, М. А. Жуков, С. М. Лебедев // *Почвоведение*. – 2016. – №1. – С. 115–129.

ENZYME ACTIVITY IN GRAY FOREST AND SOD-PODZOLIC SOILS OF TATARSTAN FORESTS

***Kulagina V. I., Alexandrova A. B., Ryazanov S. S., Sungatullina L. M., Gordeeva K. A.,
Khairullina A. M., Rupova E. H.***

*Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of
Sciences, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia
E-mail: viksoil@mail.ru*

Multiple factors, including the activity of enzymes involved in the carbon cycle, influence the carbon balance in pools of forest ecosystems such as soil and forest litter. However, regional features of enzymatic activity under the soil-climatic conditions of the Volga region, to which Tatarstan belongs, remain insufficiently studied. Despite the availability of extensive data on enzymatic activity on a global scale, information regarding quantitative indicators of enzyme activity in gray forest and sod-podzolic soils of Tatarstan, as well as their relationship with qualitative characteristics of litter and

organic carbon stocks, remains fragmentary. The lack of systematized data hinders the development of accurate element cycling models for the region. The aim of this study was to assess enzyme activity in sod-podzolic and gray forest soils of the Republic of Tatarstan, to identify the relationship between enzymatic activity and organic carbon stocks in soil and forest litter, and to conduct a comparative analysis of the biochemical properties of soils under forests of different species compositions. Research was conducted in May 2025 across six sampling plots characterized by gray forest and sod-podzolic soils. Dominant tree species included pine, birch, oak, spruce, and larch, with forest ages ranging from 71 to 110 years. Five plots were established in artificially planted forests, while one 110-year-old oak stand was of natural origin. Catalase activity was determined using the Johnson and Temple method, invertase activity according to Shcherbakova T.A., and phosphatase activity following the method of Heller I.T. and Ginzburg K.E. The results indicated that mean invertase activity across the sampling plots ranged from 0.73 to 5.50 mg glucose/g soil per 4 hours, phosphatase activity from 1.42 to 6.77 mg P₂O₅/10 g soil per 24 hours, and catalase activity from 1.27 to 2.67 mL 0.1 N KMnO₄/g soil per 20 minutes. It was established that the mean activity of invertase, phosphatase, and catalase in gray forest soils was 1.5 to 3 times higher than in sod-podzolic soils; this difference was statistically significant according to the Tukey HSD test. The substantial difference in biochemical properties between gray forest and sod-podzolic soils further confirms the necessity of accounting for soil type in forest ecosystem research. Soil enzyme activity increased in the following order: pine stands < birch and oak stands < larch and spruce stands. No statistically significant differences in the activity of the studied enzymes were observed between soils of birch and oak stands. The high biochemical activity observed in spruce stand soils warrants further investigation. A strong interrelationship was detected among invertase, phosphatase, and catalase activities across the studied sites ($r = 0.71\text{--}0.86$, $p < 0.05$), attributable to the participation of these enzymes in the carbon cycle. Furthermore, the activities of invertase, phosphatase, and catalase demonstrated a stronger correlation with carbon stocks in the 0–30 cm soil layer than with humus and nitrogen content in the humus horizon. The correlation with carbon stocks in the 0–30 cm layer was moderate ($r = 0.50\text{--}0.68$, $p < 0.05$), whereas correlations with humus and nitrogen were weak ($r = 0.37\text{--}0.46$, $p < 0.05$). Additionally, a moderate relationship was found between forest litter carbon stocks and the activities of invertase ($r = 0.67$, $p < 0.05$) and phosphatase ($r = 0.69$, $p < 0.05$), while the relationship with catalase was weak ($r = 0.44$, $p < 0.05$). The tighter association of enzymatic activity with carbon pools in litter and soil, compared to current humus content, confirms the active involvement of enzymes in the carbon cycle within forest ecosystems. Further research into the relationship between soil enzyme activity and carbon cycling in forests of varying species compositions is recommended.

Keywords: soil, forest ecosystems, invertase, catalase, phosphatase.

References

1. Zamolodchikov D. G. Systems for assessing and forecasting carbon reserves in forest ecosystems, *Sustainable forest management*, **4**, 15 (2011).

2. Kuznetsova A. I. Influence of vegetation on soil carbon stocks in forests (review), *Issues of forest science*, **4**, 4, 1 (2021).
3. Pristova T. A. Carbon Reserves in the Soil of Young Birch-Spruce Forests in the Middle Taiga of the Komi Republic, *Ecosystems*, **40**, 76 (2024).
4. 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 Forest, *Ecosystems*, **42**, 72 (2025).
5. Kulagina V. I., Alexandrova A. B., Ryazanov S. S., Shagidullin R. R., Sungatullina L. M., Rupova E. H. Carbon stocks distribution patterns in soils and forest litter of Volga-Kama Reserve, *Russian Journal of Applied Ecology*, **3**, 28 (2024).
6. Guidelines for the quantitative determination of the volume of absorption of greenhouse gases. Approved By order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated June 30, 2017 №. 20-p.
7. Kujur M., Kumar Patel A. Kinetics of soil enzyme activities under different ecosystems: An index of soil quality, *Chilean journal of agricultural research*, **1**, 96 (2014).
8. 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*, **3**, 68 (2025).
9. Khaziev F. Kh. Ecological relations of the enzymatic activity of soils, *Ecobiotech journal*, **2**, 80 (2018).
10. Galibina N. A., Nikerova K. M., Voshkina E. V., Klimova A. V. The biological activity of litter as an indicator of soil quality in pine forests of Eastern Fennoscandia, *Soil science*, **11**, 1589, (2024).
11. Takh I. P., Agirov A. H. Enzymatic activity of various soil types of forest and steppe zone in Western Caucasus, *New technologies*, **4**, 63 (2009).
12. Chernysheva E. V., Dushchanova K. S., Khomutova T. E., Borisova A. V. Soil Enzyme Activity in Natural and Ploughed Catenas as Parameters of Physiological State of Microbial Communities, *Advances in Current Biology*, **4**, 403 (2023).
13. Perminova E. M., Lapteva E. M. Catalase activity of podzolic soils in the native spruce bilberry forest and deciduous spruce forest stands of different age, *Agrarian Bulletin of the Urals*, **5**, 44 (2018).
14. Guolong Hou, Claudio O. Delang, Xixi Lu, Lei Gao. A meta-analysis of changes in soil organic carbon stocks after afforestation with deciduous broadleaved, sempervirent broadleaved, and conifer tree species, *Annals of Forest Science*, **77** (4), 92 (2020). [ff10.1007/s13595-020-00997-3](https://doi.org/10.1007/s13595-020-00997-3) [ffhal-03354949f](https://doi.org/10.1007/s13595-020-00997-3)
15. Daunoras J., Kačergius A., Gudiukaitė R. Role of Soil Microbiota Enzymes in Soil Health and Activity Changes Depending on Climate Change and the Type of Soil Ecosystem, *Biology (Basel)*, **13**(2), 85 (2024). <https://doi.org/10.3390/biology13020085>
16. Bulatkin G. A. Influence of the manager forests on CO₂ balance in Earth's atmosphere, *Life of the Earth*, **1**, 54 (2021).
17. Kazeev K. Sh., Kolesnikov S. I. *Soil biodiagnostics: methodology and research methods*, 260 (Southern Federal University Publishing House, Rostov-on-Don, 2012).
18. Anderson T. H. Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality, *Agriculture, ecosystems and environment*, **1-3**, 285 (2003).
19. Kulagina V. I., Sungatullina L. M., Ryazanov S. S., Shagidullin R. R., Alexandrova A. B., Rupova E. H. Microbial biomass and enzymatic activity of forest soils in the Raifa area of the Volzhsko-Kamsky reserve, *Russian Journal of Applied Ecology*, **2**, 49 (2023).
20. Perminova E. M., Bondarenko N. N., Shchemelinina T. N., Lapteva E. M. Biochemical activity of podzolic soils at the cuttings in middle taiga spruce forest, *Theoretical and applied ecology*, **1**, 56 (2023).
21. Drozdova A. N., Averin V. S. Study of invertase and protease activity of the soil of territories adjacent to solid municipal waste landfills, *Proceedings of Francisk Scorina Gomel State University*, **3**, 15 (2023).
22. *Problems and main directions for improving the efficiency of the regional agro-industrial complex in the context of globalization and import substitution*, 392 (Penza State Agrarian University, Penza, 2025).
23. Telesnina V. M., Vaganov I. E., Karlsen A. A., Ivanova A. E., Zhukov M. A., Lebedev S. M. Specific features of the morphology and chemical properties of coarse-textured postagrogenic soils of the southern taiga (Kostroma oblast), *Soil science*, **1**, 115 (2016).