

**УДК 631.465**

**DOI 10.29039/2413-1725-2024-10-3-92-105**

## **ФЕРМЕНТАТИВНАЯ АКТИВНОСТЬ ПОЧВ САРАЛИНСКОГО УЧАСТКА ВОЛЖСКО-КАМСКОГО ЗАПОВЕДНИКА**

*Кулагина В. И., Сунгатуллина Л. М., Александрова А. Б., Рязанов С. С.,  
Шагидуллин Р. Р., Хайруллина А. М., Гордеева К. А.*

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

Определена активность инвертазы, каталазы и фосфатазы в почвах Саралинского участка Волжско-Камского заповедника. Установлено, что каталаза и инвертаза проявляют сильную корреляционную зависимость с содержанием гумуса в почвах (коэффициент корреляции 0,769 и 0,882, соответственно), фосфатаза – слабую (0,349). Согласно тесту Anova (Type I) на активность инвертазы, каталазы и фосфатазы в исследованных почвах оказывают значимое воздействие вид преобладающей породы, группа возраста и совместное воздействие этих факторов. Активность ферментов статистически значимо ниже в почвах сосняков по сравнению с почвами лиственных лесов. Тенденция увеличения активности ферментов с возрастом леса хорошо прослеживается, однако статистическая обработка подтвердила значимую разницу по активности всех ферментов только между почвами сосняков средневозрастных и сосняков перестойных.

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

### **ВВЕДЕНИЕ**

Почвенные ферменты участвуют в биогеохимических круговоротах важнейших веществ, в том числе в циклах углерода и азота, вызывающих наибольший интерес в настоящее время в связи с проблемой парниковых газов. Ферменты попадают в почву благодаря деятельности почвенных микроорганизмов, почвенной фауны, из корневых выделений растений. В почве ферменты могут существовать достаточно длительное время, сохраняя активность и проявляя ее при создании благоприятных условий влажности, температуры, реакции среды и др. [1]. В отличие от численности трофических групп микроорганизмов активность ферментов в почвах изменяется не так быстро, но это является плюсом, если необходимо установить корреляционную взаимосвязь с также медленно изменяющимися почвенными свойствами, например, содержанием гумуса [1, 2].

Находящиеся в почве ферменты участвуют во всех этапах трансформации попадающих в почву органических остатков [1]. Однако взаимосвязи запасов органического углерода с активностью ферментов в лесных биогеоценозах изучены недостаточно. Ферментативная активность почв гораздо лучше изучена в агроценозах или на загрязненных территориях. Можно отметить работы о

ферментативной активности на зарастающих вырубках, гарях, в загрязненных почвах лесов [3–7]. Вместе с тем, активность почвенных ферментов в естественных биоценозах может быть весьма полезным индикатором ускоренной или замедленной минерализации, гумификации, накопления органического углерода в почвах и др. Использование активности почвенных ферментов для выявления направленности почвенных процессов, связанных с круговоротом углерода на покрытых лесом землях, является актуальной проблемой.

Цель данной работы – оценка активности почвенных ферментов в почвах лесов Саралинского участка Волжско-Камского заповедника.

### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Саралинский участок Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника (ВКГПБЗ) расположен в Лаишевском районе Республики Татарстан, его общая площадь 5456 га. Площадь территории, занятой лесом – 3706 га. Липняки составляют 42 % от площади лесов, сосняки и березняки 25 % и 24 % соответственно. Около 7 % территории занимают осинники. Преобладают леса старших возрастных групп, то есть средневозрастные и старше.

В мае-июне 2023 г. на территории Саралинского участка заложено 7 пробных площадок под лесами преобладающих пород и групп возраста, на каждой из которых закладывалось по 5 почвенных разрезов. Почвенный покров представлен дерново-подзолистыми почвами. Почвенные образцы отбирались в соответствии с генетическими горизонтами.

Содержание органического вещества определяли по методу И. В. Тюрина (ГОСТ 26213–91).

**Таблица 1**  
**Содержание гумуса в почвах пробных площадок Саралинского участка**

| Характеристика древостоя  | Гумус, % | Коэффициент вариации, % |
|---------------------------|----------|-------------------------|
| Березняк средневозрастный | 3,3±0,2  | 10,5                    |
| Березняк перестойный      | 5,5±0,5  | 21,7                    |
| Липняк средневозрастный   | 3,9±0,4  | 20,8                    |
| Липняк перестойный        | 6,9±0,4  | 13,6                    |
| Сосняк средневозрастный   | 2,4±0,3  | 33,8                    |
| Сосняк перестойный        | 4,4±0,3  | 18,6                    |
| Осинник средневозрастный  | 4,6±0,4  | 21,2                    |

Почвы березняков, липняков и сосняков, относящихся к разным возрастным категориям, статистически значимо отличаются друг от друга по содержанию гумуса. Более подробные сведения по содержанию гумуса и запасам углерода в почвах Волжско-Камского заповедника приведены в ранее опубликованной статье [8].

Активность почвенных ферментов определялась следующими методами: каталазы – методом Джонсона и Темпле, инвертазы – по Щербакову Т. А., фосфатазы по методу Геллера И. Т. и Гинзбург К. Е.

Оценка статистической значимости разницы проводилась с использованием различных непараметрических и параметрических критериев и способов обработки данных.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

Проведенные исследования позволили выявить сильную прямую корреляционную зависимость между активностью инвертазы и содержанием органического углерода в гумусовых горизонтах почв Саралинского участка Волжско-Камского заповедника – коэффициент корреляции Пирсона равен 0,882 ( $\rho=0,01$ ), что выше, чем в почвах Раифского участка [9].

Полученные данные по активности инвертазы согласуются с обобщенными сведениями Казеева К. Ш. с соавторами о четкой корреляции данного фермента в почвах с содержанием гумуса [2].

Мищенко Н. В. с соавторами, проводившие исследования дерново-подзолистых и серых лесных почв Владимирской области, также обращали внимание на определенную взаимосвязь этих показателей: они отмечали максимальную активность инвертазы в почвах с самым высоким содержанием гумуса [10].

Активность инвертазы в гумусовых горизонтах почв Саралинского участка Волжско-Камского заповедника колеблется от 0,44 до 5,19 мг глюкозы / 1 г почвы за 4 часа. Согласно оценочной шкале Звягинцева обогащенность почв инвертазой варьирует от очень бедной до среднеобогатенной. Максимальная активность фермента отмечена в гумусовом горизонте почв под липняком перестойным, минимальная – под сосняком средневозрастным (рис. 1). Это согласуется с исследованиями, проведенными на территории другого участка заповедника, Раифского, где минимальная инвертазная активность также наблюдалась в почвах под сосняками [9].

Разница ферментативной активности почв под лесами разного породного состава и возраста определяется качеством и количеством поступающего опада. Круговорот веществ в хвойных лесах заторможен по сравнению с лиственными лесами из-за устойчивости хвойного опада к разложению [11]. Наличие хорошо выраженного травянистого покрова под пологом леса, наоборот, может привести к увеличению активности фермента, что, по-видимому, наблюдается для сосняка перестойного Саралинского участка заповедника.

Согласно тесту Anova (Type I) вид преобладающей породы, группа возраста и совместно воздействие этих факторов оказывают значимое воздействие на активность инвертазы в горизонте А1 дерново-подзолистых почв Саралинского участка заповедника (табл. 2).

Согласно тесту Тьюки (Tukey HSD test) без учета возрастной группы статистически значимая разница по активности инвертазы в почве на Саралинском участке заповедника наблюдается только между сосняками и липняками (табл. 3).

Применение того же теста Тьюки к активности инвертазы в почвах уже не просто под преобладающими породами, но и с учетом преобладающих групп

возраста, позволило получить несколько другой результат (табл. 4).

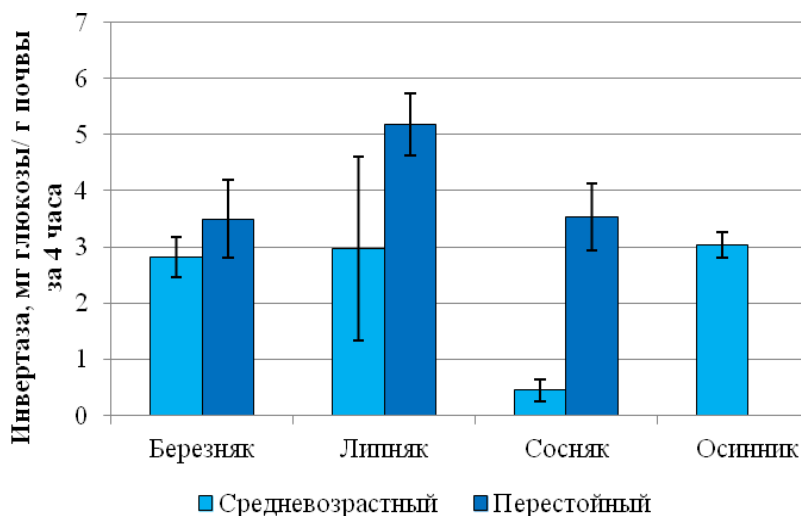


Рис. 1. Активность инвертазы в гумусовых горизонтах почв Саралинского участка заповедника (среднее  $\pm$  стандартное отклонение).

Таблица 2

Оценка значимости разницы по активности инвертазы согласно тесту Anova (Type I)

| Показатель                               | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|------------------------------------------|----|--------|---------|---------|--------|
| Преобладающая порода                     | 3  | 0,153  | 0,051   | 10,056  | 0,000* |
| Группа возраста                          | 1  | 0,108  | 0,108   | 21,296  | 0,000* |
| Преобладающая порода+<br>Группа возраста | 2  | 0,087  | 0,043   | 8,574   | 0,001* |
| Остатки /Residuals                       | 28 | 0,142  | 0,005   |         |        |

Примечание: \*разница значима

Активность инвертазы под сосняком средневозрастным статистически значимо отличается от активности инвертазы в почвах под всеми другими лесами. Значимой оказалась также разница между липняком перестойным и березняком средневозрастным (табл. 4).

На рис. 1 хорошо прослеживается тенденция к увеличению активности инвертазы в почвах перестойных лесов по сравнению со средневозрастными для всех преобладающих пород. Тест Тьюки подтвердил статистически значимую разницу для липняков и сосняков разного возраста. В почвах под березняками разного возраста активность инвертазы статистически значимых отличий не имеет (табл. 4).

Таблица 3

Оценка значимости разницы по активности инвертазы в почвах под преобладающими породами согласно тесту Тьюки (Tukey HSD test)

| Преобладающие породы | diff   | lwr    | upr    | p adj  |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|
| Липа-Береза          | 0,924  | -0,351 | 2,199  | 0,198  |
| Осина-Береза         | -0,128 | -1,690 | 1,433  | 0,995  |
| Сосна-Береза         | -1,171 | -2,446 | 0,104  | 0,077  |
| Осина-Липа           | -1,053 | -2,614 | 0,509  | 0,249  |
| Сосна-Липа           | -2,095 | -3,370 | -0,820 | 0,001* |
| Сосна-Осина          | -1,043 | -2,604 | 0,519  | 0,256  |

Примечание: \*разница значима

Таблица 4

Оценка значимости разницы по активности инвертазы согласно тесту Тьюки (Tukey HSD test) под насаждениями пробных площадок

| Характеристика древостоя пробных площадок  | diff   | lwr    | upr    | p adj  |
|--------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Липняк перестойный - Березняк перестойный  | 1,692  | -0,497 | 3,880  | 0,192  |
| Сосняк перестойный – Березняк перестойный  | 0,032  | -2,157 | 2,220  | 1,000  |
| Березняк средневозр – Березняк перестойный | -0,680 | -2,869 | 1,509  | 0,947  |
| Липняк средневозр. – Березняк перестойный  | -0,523 | -2,712 | 1,665  | 0,987  |
| Осинник средневозр. – Березняк перестойный | -0,468 | -2,657 | 1,720  | 0,993  |
| Сосняк средневозр. – Березняк перестойный  | -3,053 | -5,242 | -0,865 | 0,004* |
| Сосняк перестойный – Липняк перестойный    | -1,660 | -3,849 | 0,529  | 0,208  |
| Березняк средневозр. – Липняк перестойный  | -2,372 | -4,560 | -0,183 | 0,030* |
| Липняк средневозр. – Липняк перестойный    | -2,215 | -4,404 | -0,026 | 0,046* |
| Осинник средневозр. – Липняк перестойный   | -2,160 | -4,349 | 0,029  | 0,054  |
| Сосняк средневозр. – Липняк перестойный    | -4,745 | -6,934 | -2,556 | 0,000* |
| Березняк средневозр. – Сосняк перестойный  | -0,712 | -2,900 | 1,477  | 0,934  |
| Липняк средневозр. - Сосняк перестойный    | -0,555 | -2,744 | 1,634  | 0,982  |
| Осинник средневозр. - Сосняк перестойный   | -0,500 | -2,689 | 1,689  | 0,990  |
| Сосняк средневозр. – Сосняк перестойный    | -3,085 | -5,274 | -0,896 | 0,004* |
| Липняк средневозр.-- Березняк средневозр.  | 0,157  | -2,032 | 2,345  | 1,000  |
| Осинник средневозр. – Березняк средневозр. | 0,212  | -1,977 | 2,400  | 1,000  |
| Сосняк средневозр. – Березняк средневозр.  | -2,373 | -4,562 | -0,185 | 0,029* |
| Осинник средневозр. – Липняк средневозр.   | 0,055  | -2,134 | 2,244  | 1,000  |
| Сосняк средневозр. – Липняк средневозр.    | -2,530 | -4,719 | -0,341 | 0,019* |
| Сосняк средневозр. – Осинник средневозр.   | -2,585 | -4,774 | -0,396 | 0,016* |

Примечание: \*разница значима

Полученные данные подтверждают выводы Телесиной В. М. с соавторами о том, что инвертазная активность увеличивается с возрастом леса и достигает максимума в старовозрастных лесах [12].

Полученные результаты также согласуются с данными Макеевой Н. А. с соавторами [13], отмечавшими низкую активность инвертазы в сосняках с наиболее сомкнутыми кронами. Изученный нами сосняк средневозрастный отличался большей густотой древостоя и сомкнутостью крон, чем сосняк перестойный.

Активность каталазы в почвах Саралинского участка колеблется от 1,03 мл 0,1 н  $\text{KMnO}_4$  /1 г почвы за 20 мин под сосняком средневозрастным до 3,63 мл 0,1 н  $\text{KMnO}_4$  /1 г почвы 20 мин под липняком перестойным (рис. 2). Согласно шкале Звягинцева почвы относятся к очень бедным каталазой.

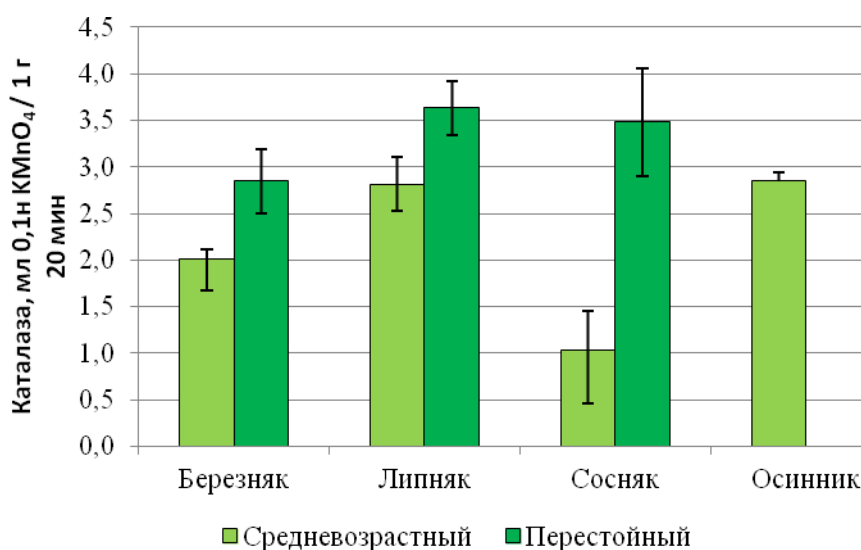


Рис. 2. Активность каталазы в гумусовых горизонтах почв Саралинского участка заповедника (среднее  $\pm$  стандартное отклонение).

Выявлена высокая степень взаимосвязи активности каталазы в почвах Саралинского участка заповедника с содержанием гумуса (коэффициент корреляции равен 0,769) и с активностью инвертазы (коэффициент корреляции равен 0,840).

Каталаза ускоряет реакцию разложения перекиси водорода, образующейся в результате дыхания или биохимических реакций, инвертаза считается катализатором гидролиза сахаров [2]. То есть, оба фермента непосредственно участвуют в круговороте углерода, с чем и связана их высокая корреляционная зависимость. Полученные результаты согласуются с данными для почв Раифского участка заповедника, где также отмечалась сильная взаимосвязь между активностью каталазы и инвертазы [9].

Согласно тесту Анова (Туре I) на активность каталазы, как и на активность инвертазы, оказывают значимое воздействие все рассматриваемые факторы: вид

преобладающей породы, группа возраста и совместное воздействие преобладающей породы и возраста (табл. 5).

Полученные данные несколько отличаются от выводов Перминовой Е. М. с соавторами [7], о том, что тип фитоценоза на активность каталазы существенного влияния не оказывает. Разница объясняется тем, что Перминова Е. М. с соавторами изучали почвы относительно молодых лесов, возобновляющихся после сплошных рубок.

Таблица 5

Оценка значимости разницы по активности каталазы  
согласно тесту Anova (Type I)

| Показатель                               | Df | Sum Sq | Mean Sq | F value | Pr(>F) |
|------------------------------------------|----|--------|---------|---------|--------|
| Преобладающая порода                     | 3  | 3,30   | 1,10    | 9,42    | 0,001* |
| Группа возраста                          | 1  | 8,41   | 8,41    | 72,04   | 0,000* |
| Преобладающая порода+<br>Группа возраста | 2  | 2,64   | 1,32    | 11,32   | 0,001* |
| Остатки /Residuals                       | 14 | 1,63   | 0,12    |         |        |

Примечание: \*разница значима

Тенденция к увеличению активности каталазы с переходом от средневозрастных лесов к перестойным хорошо прослеживается для всех преобладающих пород (рис. 2), и согласуется с данными Телесиной В. М. с соавторами [12]. Однако тест Тьюки подтвердил статистически значимую разницу только между почвами сосняков разного возраста (табл. 6).

Статистически значимая разница по активности каталазы отмечена между сосняками средневозрастными и лесами разного породного состава практически всех остальных пробных площадок (табл. 6).

Почвы сосняка перестойного статистически значимо отличались от почв березняка перестойного.

Разница между активностью каталазы в почвах лиственных лесов отмечена лишь при сопоставлении активности каталазы под березняком средневозрастным и липняком перестойным.

То есть в шести случаях из семи статистически значимая разница по активности каталазы наблюдалась между почвами сосняков и лиственных лесов Саралинского участка. Полученные данные согласуются с результатами, полученными для Раифского участка заповедника, где также отмечалась статистически значимая разница по активности каталазы между почвами сосняков и лиственных лесов [9].

Фермент фосфатаза отвечает за минерализацию органического фосфора [14], то есть также участвует в круговороте углерода, по крайней мере, в разложении органических соединений, содержащих фосфор. В почвах Саралинского участка заповедника активность фосфатазы проявила слабую корреляционную зависимость с содержанием гумуса в почве (коэффициент корреляции равен 0,349). Корреляция с активностью инвертазы и каталазы средняя (коэффициент корреляции 0,508 и 0,506

соответственно). Активность фосфатазы в почвах Саралинского участка колеблется от 2,93 мг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/10 г почвы за 24 часа под сосняками средневозрастными до 9,63 мг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/10 г почвы за 24 часа под березняками средневозрастными (рис. 3). Согласно шкале Звягинцева обогащенность почв ферментом фосфатазой от средней до богатой.

**Таблица 6**  
**Оценка значимости разницы по активности каталазы согласно тесту Тьюки (Tukey HSD test) под насаждениями пробных площадок**

| Характеристика древостоя пробных площадок  | diff   | lwr    | upr    | p adj  |
|--------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Липняк перестойный – Березняк перестойный  | 0,783  | -0,201 | 1,767  | 0,169  |
| Сосняк перестойный – Березняк перестойный  | 0,633  | -0,351 | 1,617  | 0,371  |
| Березняк средневозр – Березняк перестойный | -0,833 | -1,817 | 0,151  | 0,126  |
| Липняк средневозр. – Березняк перестойный  | -0,033 | -1,017 | 0,951  | 1,000  |
| Осинник средневозр. – Березняк перестойный | 0,000  | -0,984 | 0,984  | 1,000  |
| Сосняк средневозр. – Березняк перестойный  | -1,817 | -2,801 | -0,833 | 0,000* |
| Сосняк перестойный – Липняк перестойный    | -0,150 | -1,134 | 0,834  | 0,999  |
| Березняк средневозр. – Липняк перестойный  | -1,617 | -2,601 | -0,633 | 0,001* |
| Липняк средневозр. – Липняк перестойный    | -0,817 | -1,801 | 0,167  | 0,139  |
| Осинник средневозр. – Липняк перестойный   | -0,783 | -1,767 | 0,201  | 0,169  |
| Сосняк средневозр. – Липняк перестойный    | -2,600 | -3,584 | -1,616 | 0,000* |
| Березняк средневозр. – Сосняк перестойный  | -1,467 | -2,451 | -0,483 | 0,002* |
| Липняк средневозр. – Сосняк перестойный    | -0,667 | -1,651 | 0,317  | 0,316  |
| Осинник средневозр. – Сосняк перестойный   | -0,633 | -1,617 | 0,351  | 0,371  |
| Сосняк средневозр. – Сосняк перестойный    | -2,450 | -3,434 | -1,466 | 0,000* |
| Липняк средневозр. – Березняк средневозр.  | 0,800  | -0,184 | 1,784  | 0,154  |
| Осинник средневозр. – Березняк средневозр. | 0,833  | -0,151 | 1,817  | 0,126  |
| Сосняк средневозр. – Березняк средневозр.  | -0,983 | -1,967 | 0,001  | 0,050  |
| Осинник средневозр. – Липняк средневозр.   | 0,033  | -0,951 | 1,017  | 1,000  |
| Сосняк средневозр. – Липняк средневозр.    | -1,783 | -2,767 | -0,799 | 0,000* |
| Сосняк средневозр. – Осинник средневозр.   | -1,817 | -2,801 | -0,833 | 0,000* |

Примечание: \*разница значима

Согласно тесту Апова (Туре I) на активность фосфатазы оказывают значимое воздействие вид преобладающей породы, группа возраста и совместное воздействие этих факторов (табл. 7). В этом фосфатаза не отличается от двух других исследованных ферментов.



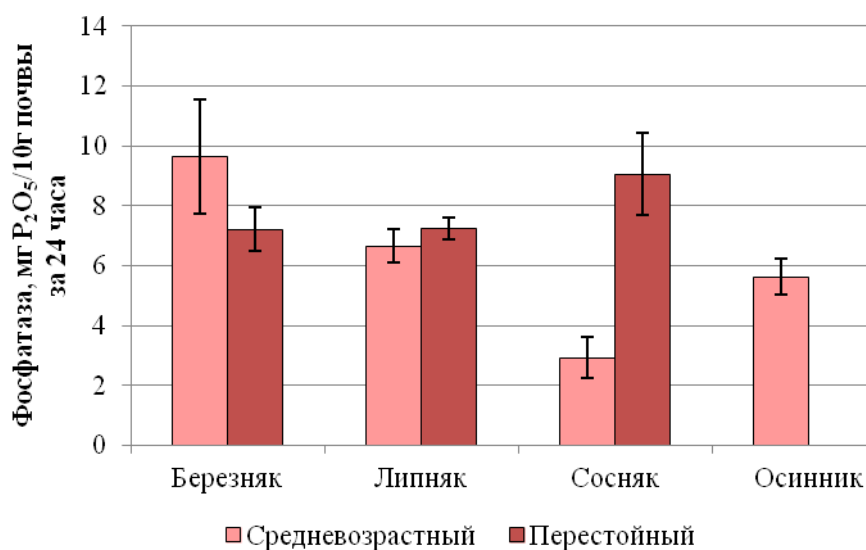


Рис. 3. Активность фосфатазы в гумусовых горизонтах почв Саралинского участка заповедника (среднее  $\pm$  стандартное отклонение).

Таблица 7

Оценка значимости разницы по активности фосфатазы согласно тесту Anova (Type I)

| Показатель                               | Df | Sum Sq   | Mean Sq  | F value | Pr(>F) |
|------------------------------------------|----|----------|----------|---------|--------|
| Преобладающая порода                     | 3  | 8387,641 | 2795,880 | 35,125  | 0,000* |
| Группа возраста                          | 1  | 2002,114 | 2002,114 | 25,153  | 0,000* |
| Преобладающая порода+<br>Группа возраста | 2  | 2190,522 | 1095,261 | 13,760  | 0,000* |
| Остатки /Residuals                       | 14 | 1114,364 | 79,597   |         |        |

Примечание: \*разница значима

Однако в отличие от инвертазы и каталазы тенденция к увеличению активности фермента с возрастом леса для фосфатазы прослеживается только в почвах липняков и сосняков. В почвах березняков тенденция обратная.

Курганова И. Н. с соавторами отмечали увеличение активности фосфатазы с возрастом в почвах мелколиственных лесов, к которым относится и береза [15]. Однако их исследования охватывали леса возрастом от 0 до 40 лет, то есть от молодняков до средневозрастных. Наши исследования затрагивали березняки другого возрастного интервала – от средневозрастных и старше, где могут наблюдаться другие закономерности.

**ФЕРМЕНТАТИВНАЯ АКТИВНОСТЬ ПОЧВ САРАЛИНСКОГО УЧАСТКА ...**

Впрочем, тест Тьюки подтвердил статистически значимую разницу по активности фосфатазы только для сосняков разного возраста, для березняков и липняков разница не значима (табл. 8). Статистически значимая разница по активности фосфатазы отмечена в двух случаях между почвами лиственных лесов, и в семи между почвами сосновых и лиственных лесов.

**Таблица 8**  
**Оценка значимости разницы по активности фосфатазы согласно тесту Тьюки (Tukey HSD test) под насаждениями пробных площадок**

| <b>Характеристика древостоя пробных площадок</b> | <b>diff</b> | <b>lwr</b> | <b>upr</b> | <b>p adj</b> |
|--------------------------------------------------|-------------|------------|------------|--------------|
| Липняк перестойный – Березняк перестойный        | 0,045       | -2,910     | 3,000      | 1,000        |
| Сосняк перестойный – Березняк перестойный        | 1,859       | -1,095     | 4,814      | 0,395        |
| Березняк средневозр. – Березняк перестойный      | 2,428       | -0,527     | 5,383      | 0,146        |
| Липняк средневозр. – Березняк перестойный        | -0,556      | -3,511     | 2,399      | 0,997        |
| Осинник средневозр. – Березняк перестойный       | -1,585      | -4,540     | 1,370      | 0,576        |
| Сосняк средневозр. – Березняк перестойный        | -4,275      | -7,230     | -1,320     | 0,003*       |
| Сосняк перестойный – Липняк перестойный          | 1,815       | -1,140     | 4,770      | 0,423        |
| Березняк средневозр. – Липняк перестойный        | 2,383       | -0,571     | 5,338      | 0,159        |
| Липняк средневозр. – Липняк перестойный          | -0,601      | -3,555     | 2,354      | 0,995        |
| Осинник средневозр. – Липняк перестойный         | -1,629      | -4,584     | 1,325      | 0,545        |
| Сосняк средневозр. – Липняк перестойный          | -4,320      | -7,274     | -1,365     | 0,003*       |
| Березняк средневозр. – Сосняк перестойный        | 0,569       | -2,386     | 3,524      | 0,996        |
| Липняк средневозр. – Сосняк перестойный          | -2,415      | -5,370     | 0,539      | 0,150        |
| Осинник средневозр. – Сосняк перестойный         | -3,444      | -6,399     | -0,489     | 0,018*       |
| Сосняк средневозр. – Сосняк перестойный          | -6,134      | -9,089     | -3,180     | 0,000*       |
| Липняк средневозр. – Березняк средневозр.        | -2,984      | -5,939     | -0,029     | 0,047*       |
| Осинник средневозр. – Березняк средневозр.       | -4,013      | -6,968     | -1,058     | 0,005*       |
| Сосняк средневозр. – Березняк средневозр.        | -6,703      | -9,658     | -3,748     | 0,000*       |
| Осинник средневозр. – Липняк средневозр.         | -1,029      | -3,984     | 1,926      | 0,910        |
| Сосняк средневозр. – Липняк средневозр.          | -3,719      | -6,674     | -0,764     | 0,010*       |
| Сосняк средневозр. – Осинник средневозр.         | -2,690      | -5,645     | 0,265      | 0,087        |

*Примечание: \*разница значима*

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Полученные данные по ферментативной активности почв лесов Саралинского участка показали, что для всех трех исследованных ферментов наблюдаются общие закономерности.

Статистическая обработка результатов показала, что существенное влияние на активность инвертазы, каталазы и фосфатазы в гумусовых горизонтах оказывают: преобладающая порода, возраст леса и совместное влияние этих факторов.

Активность всех трех ферментов статистически значимо выше в почвах лиственных лесов по сравнению с сосняками, отличающимися замедленным круговоротом углерода.

Для каталазы и инвертазы прослеживается четкая тенденция к увеличению активности ферментов с возрастом леса для лесов всех преобладающих пород: липняков, березняков, сосняков. Для фосфатазы – только березняков и сосняков. Однако увеличение активности всех ферментов статистически доказано только для сосняков. Для инвертазы статистически значима также разница между почвами липняков разного возраста.

Корреляция активности ферментов с содержанием гумуса в верхних горизонтах почв уменьшается в ряду: инвертаза > каталаза > фосфатаза.

Таким образом, активность всех трех ферментов взаимосвязана с биологическим круговоротом углерода в почвах под лесными насаждениями. Инвертаза, каталаза и фосфатаза могут служить показателями интенсивности протекающих процессов и накопления гумуса. Однако согласно проведенным исследованиям, наибольшая корреляция с параметрами леса и содержанием гумуса в почве отмечена для инвертазы, которую и следует рекомендовать для биомониторинга почв лесных экосистем.

Изучение взаимосвязи активности почвенных ферментов с круговоротом веществ в лесах России должно быть продолжено.

#### Список литературы

1. Хазиев Ф. Х. Функциональная роль ферментов в почвенных процессах / Ф. Х. Хазиев // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. – 2015. – Том 20, № 2 (78). – С. 14–24.
2. Казеев К. Ш. Биодиагностика почв: методология и методы исследований / К. Ш. Казеев, С. И. Колесников – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2012. – 260 с.
3. Сорокин Н. Д. Микробиологическая диагностика состояния почв и филлосферы лесных экосистем Сибири / Н. Д. Сорокин, Е. Н. Афанасова // Известия РАН. Серия биологическая. – 2012. – №1. – С. 100–108.
4. Завалишин С. И. Зависимость активности почвенных ферментов от физико-химических свойств дерново-подзолистых почв трансформированных лесных угодий / С. И. Завалишин, В. С. Карелина // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – №6 (166). – С. 47–52.
5. Bartkowiak A. Effect of forest fire on changes in the content of total and available forms of selected heavy metals and catalase activity in soil / A. Bartkowiak, J. Lemanowicz // Soil science annual. – 2017. – Vol. 68, No. 3. – P. 140–148. DOI: 10.1515/ssa-2017-0017
6. Kazeev K. Sh. Post-fire changes in the biological properties of the brown soils in the Utrish state nature reserve (Russia) / K. Sh. Kazeev, T. A. Poltoratskaya, A. S. Yakimova, M. Yu. Odobashyan, A. K. Shkhatpatsev, S. I. Kolesnikov // Nature Conservation Research. Заповедная наука. – 2019. – No. 4 (Suppl.1). – P. 93–104. <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2019.055>
7. Перминова Е. М. Каталазная активность подзолистых почв коренного ельника черничного и разновозрастных лиственно-хвойных сообществ / Е. М. Перминова, Е. М. Лаптева // Аграрный вестник Урала. – 2018. – №5. – С. 44–53.

8. Кулагина В. И. Запасы углерода, содержание гумуса и азота в почвах Саралинского и Раифского участков Волжско-Камского заповедника / В. И. Кулагина, А. Б. Александрова, С. С. Рязанов, Р. Р. Шагидуллин, Л. М. Сунгатуллина, К. А. Гордеева // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. – 2024. – Т. 10, № 1. – С. 145–158.
9. 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.
10. Мищенко Н. В. Оценка состояния почв необрабатываемых сельскохозяйственных угодий по показателям ферментативной активности, гумуса и тяжелых металлов / Н. В. Мищенко, И. Н. Курочкин, Н. В. Чугай, Е. Ю. Кулагина // Вестник НВГУ. – 2021. – №2(54). – С. 106–111.
11. Глазман Г. Р. Структурная организация лесных подстилок в условиях стационарных насыпных лизиметров факультета почвоведения МГУ имени М. В. Ломоносова / Г. Р. Глазман, Л. Г. Богатырев, В. М. Телеснина, Ф. И. Земсков, А. И. Бенедиктова, М. М. Карпухин, В. В. Демин // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 2022. – № 3. – С. 101–112.
12. 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.
13. Макеева Н. А. Особенности биологической активности почвы в насаждениях сосны обыкновенной различной степени сомкнутости крон / Н. А. Макеева, Е. Ю. Колмогорова, В. И. Уфимцев // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. – 2023. – 16(2). – С. 178–192.
14. Наими О. И. Фосфатный режим и активность фосфатазы в черноземе обыкновенном при возделывании нута / О. И. Наими, О. С. Безуглова, Е. А. Полиенко, В. А. Лыхман, А. В. Горовцов, Ю. С. Поволоцкая, М. Н. Дубинина, Е. С. Патрикеев // Агрехимический вестник. – 2020. – № 3. – С. 25–29.
15. Курганова И. Н. Изменение запасов углерода, микробной и ферментативной активности агродерново-подзолов южной тайги в ходе постагрогенной эволюции / И. Н. Курганова, В. М. Телеснина, В. О. Лопес де Гереню, В. И. Личко, Л. А. Овсепян // Почвоведение. – 2022. – № 7. – С. 825–842.

**SOIL ENZYME ACTIVITY OF THE SARALINSKY SECTION OF THE  
VOLZHSKO-KAMSKY NATURE RESERVE**

***Kulagina V. I., Sungatullina L. M., Alexandrova A. B., Ryazanov S. S.,  
Shagidullin R. R., Khairullina A. M., Gordeeva K. A.***

*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*

Soil enzymes participate in the carbon cycle, at the same time being indicators of the intensity of ongoing processes of humification, decomposition and mineralization of organic matter, and carbon accumulation in soils. The study of soil enzyme interactions with the carbon cycle in forest ecosystems in different regions of Russia remains a relevant topic in connection with the greenhouse gas problem. The purpose of this work

was to assess the soil enzyme activity in the forests of the Saralinsky section of the Volga-Kama Nature Reserve. On the territory of the Saralinsky site, linden forests make up 42 % of the forest area, pine and birch forests 25 % and 24 %, respectively. About 7 % of the territory is occupied by aspen forests. Forests of middle-aged and older age groups predominate. On the territory of the Saralinsky section 7 test plots have been established under forests of the predominant species and age groups. Soil samples were taken from five sections at each plot. The activity of invertase, catalase, and phosphatase in the humus horizons of the soils was determined. It has been established that catalase and invertase exhibit a strong correlation with the humus content in soils (correlation coefficients of 0.769 and 0.882, respectively), phosphatase is a weak one (0.349). The correlation between invertase and catalase was strong (coefficient 0.840), and the correlation between invertase and phosphatase was average (coefficient 0.508). The invertase activity in the humus horizons of the Saralinsky site ranged from 0.44 to 5.19 mg of glucose per 1 g of soil in 4 hours; catalase activity was from 1.03 to 3.63 ml of 0.1 N KMnO<sub>4</sub> per 1 g of soil in 20 minutes; and phosphatase activity was from 2.93 to 9.63 mg of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per 10 g of soil in 24 hours. According to the Zvyagintsev scale, the soils of the Saralinsky site were very poor in catalase, phosphatase enrichment ranged from medium to rich, and invertase enrichment ranged from very poor to medium. According to the Anova test (Type I), the invertase, catalase, and phosphatase activity in the studied soils was significantly influenced by the type of dominant species, age group, and the combined effect of these factors. According to the Tukey HSD test, the activity of all three enzymes was significantly higher in the soils under deciduous forests compared to middle-aged pine forests, characterized by a slower carbon cycle. A significant difference in enzyme activity between soils of linden, birch, and aspen forests of the same age group was observed only for phosphatase. For catalase and invertase, there was a clear tendency towards an increase in enzyme activity with the age of the forest in linden, birch, and pine forests. For phosphatase, only under birch and pine forests. However, the Tukey HSD test statistically proved an increase in the activity of soil enzymes only during the transition from middle-aged pine forests to over-mature pine forests for all enzymes and for invertase during the transition from middle-aged linden forests to over-mature linden forests. Thus, the activity of all three enzymes was interconnected with the biological carbon cycle in soils under forest plantations. However, according to the studies, the greatest correlation with forest parameters and humus content in the soil was noted for invertase, which should be recommended for biomonitoring of soils in forest ecosystems.

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

#### References

1. Khaziev F. Kh. Functional role of enzymes in soil processes, *Bulletin of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*, **20**, **2**, 14 (2015).
2. Kazeev K. Sh., Kolesnikov S. I. *Soil biodiagnosics: methodology and research methods*, 260 (Southern Federal University Publishing House, Rostov-on-Don, 2012).
3. Sorokin N. D., Afanasova E. N. Microbiological diagnostics of the state of soils and phyllosphere of forest ecosystems in Siberia, *Izvestiya Russian Academy of Sciences. Biological series*, **1**, 100 (2012).

4. Zavalishin S. I., Karelina V. S. Dependence of soil enzymes activity on physical and chemical properties of soddy-podzolic soils of transformed forest lands, *Bulletin of the Altai State Agricultural University*, **6**, 47 (2018).
5. Bartkowiak A., Lemanowicz J. Effect of forest fire on changes in the content of total and available forms of selected heavy metals and catalase activity in soil, *Soil science annual*, **68**, **3**, 140 (2017). DOI: 10.1515/ssa-2017-0017
6. Kazeev K. Sh., Poltoratskaya T. A., Yakimova A. S., Odobashyan M. Yu., Shkhatpatsev A. K., Kolesnikov S. I. Post-fire changes in the biological properties of the brown soils in the Utrish state nature reserve (Russia), *Nature Conservation Research. Заповедная наука*, **4**, 93 (2019) <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2019.055>
7. Perminova E. M., Lapteva E. M. Catalase Activity of Podzolic Soils of Indigenous Blueberry Spruce Forest and Different Age Deciduous-Coniferous Communities, *Agrarian bulletin of the Urals*, **5**, 44 (2018).
8. Kulagina V. I., Alexandrova A. B., Ryazanov S. S., Shagidullin R. R., Sungatullina L. M., Gordeeva K. A. Organic carbon stocks, humus and nitrogen contents in the soils of the Saralinsky and Raifa sections of the Volzhsko-Kamsky reserve, *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*, **1**, 145 (2024).
9. 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).
10. Mischenko, N.V., Kurochkin, I.N., Chugay, N.V., Kulagina, E.Yu. Assessment of the State of Soils of Uncultivated Agricultural Lands by Indicators of Enzymatic Activity, Humus, and Heavy Metals, *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, **2**, 106 (2021).
11. Glazman G. R., Bogatyrev L. G., Telesnina V. M., Zemskov Ph. I., Benediktova A. I., Karpukhin M. M., Demin V. V. Structural organization of forest floor under stationary bulk lysimeters of soil science faculty of Lomonosov Moscow state university, *Moscow University Soil Science Bulletin*, **3**, 101 (2022).
12. Telesnina V. M., Vaganov I. E., Carlsen A. A., Ivanova A. E., Zhukov M. A., Lebedev S. M. Features of the morphology and chemical properties of postagrogenic soils of the southern taiga on light sediments (Kostroma region), *Soil Science*, **1**, 115 (2016).
13. Makeeva N. A., Kolmogorova E. Yu., Ufitsev V. I. Biological activity of soil in Scots pine stands with varying degrees of crown closure, *Journal of the Siberian Federal University. Biology*, **16(2)**, 178 (2023).
14. Naimi O. I., Bezuglova O. S., Polienko E. A., Lykhman V. A., Gorovtsov A. V., Povolotskaya Yu. S., Dubinina M. N., Patrikeev E. S. Phosphate regime and phosphatase activity in ordinary chernozem when cultivating chickpeas, *Agrochemical herald*, **3**, 25 (2020).
15. Kurganova I. N., Telesnina V. M., Lopes de Gerenyu V. O., Lichko V. I., Ovsepyan L. A. Changes in the carbon stocks, microbial and enzyme activities of retic albic podzol in southern taiga during postagrogenic evolution, *Eurasian Soil Science*, **7**, 895 (2022).