

УДК 631.4:577.15

## ФЕРМЕНТАТИВНАЯ АКТИВНОСТЬ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫБРОСОВ ПРЕДПРИЯТИЯ ПО ПРОИЗВОДСТВУ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

E. A. САМУСИК<sup>1)</sup>, С. Е. ГОЛОВАТЫЙ<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Гродненский государственный университет им. Янки Купалы,  
ул. Ожешко, 22, 230023, г. Гродно, Беларусь

<sup>2)</sup>Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова,  
Белорусский государственный университет,  
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

Представлены результаты исследований влияния крупного промышленного предприятия на почвенный покров. Показано, что продукты его функционирования в значительной мере влияют на агрохимические и биологические показатели почв, что сказывается на изменении кислотности дерново-подзолистых супесчаных почв и сдвига показателя рН<sub>KCl</sub> в сторону подщелачивания. Установлено, что в данной зоне преобладают почвы со слабощелочными (рН<sub>KCl</sub> от 7,06 до 7,42) и щелочными условиями среды (рН<sub>KCl</sub> от 7,55 до 8,09). Рассматриваются особенности протекания ферментативных процессов в почвах, подверженных газопылевому загрязнению. Определены уровни активности окислительно-восстановительных (каталазы, дегидрогеназы) и гидролитических (инвертазы, уреазы) ферментов в градиенте расстояния от источника загрязнения и по направлениям распространения воздушных масс. Наблюдается снижение их активности в дерново-подзолистых супесчаных почвах лесных и сельскохозяйственных земель по мере приближения к источнику загрязнения. Показано, что в радиусе до 2 км от источника загрязнения почвы характеризуются как очень бедные по обогащенности изучаемыми ферментами. По результатам корреляционного анализа отмечается изменение влияния реакции почвенной среды на изученные ферменты статистически достоверной отрицательной взаимосвязью.

**Ключевые слова:** цементное загрязнение; дерново-подзолистые почвы; реакция почвенной среды; ферментативная активность; каталаза; дегидрогеназа; инвертаза; уреаза.

## ENZYMIC ACTIVITY OF SOD-PODZOLIC SOILS UNDER THE CONDITIONS OF EXPOSURE TO EMISSIONS OF A BUILDING MATERIALS MANUFACTURING ENTERPRISE

E. A. SAMUSIK<sup>a</sup>, S. E. GOLOVATYI<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Yanka Kupala State University of Grodno,  
22 Ažeshka Street, Grodno 230023, Belarus

<sup>b</sup>International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,  
23/1 Daïhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

Corresponding author: E. A. Samusik (e.samusik@mail.ru)

### Образец цитирования:

Самусик ЕА, Головатый СЕ. Ферментативная активность дерново-подзолистых почв в условиях воздействия выбросов предприятия по производству строительных материалов. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;1:104–113.

<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-104-113>

### For citation:

Samusik EA, Golovaty SE. Enzymatic activity of sod-podzolic soils under the conditions of exposure to emissions of a building materials manufacturing enterprise. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;1:104–113. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2022-1-104-113>

### Авторы:

Елена Андреевна Самусик – старший преподаватель кафедры экологии.

Сергей Ефимович Головатый – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; заведующий кафедрой экологического мониторинга и менеджмента.

### Authors:

Elena A. Samusik, senior lecture at the department of ecology.  
[e.samusik@mail.ru](mailto:e.samusik@mail.ru)

Sergey E. Golovaty, doctor of science (agriculture), full professor; head of the department of environmental monitoring and management.  
[sscience@yandex.ru](mailto:sscience@yandex.ru)

The article presents the results of studies of the influence of a large industrial enterprise on the soil cover. It is shown that the enterprise for the production of building materials significantly affects the agrochemical and biological indicators of soils. This is manifested primarily in the change in the acidity of soddy-podzolic sandy loamy soils and the shift in the pH<sub>KCl</sub> index towards alkalization. It has been established that soils with slightly alkaline (pH<sub>KCl</sub> from 7.06 to 7.42) and alkaline environmental conditions (pH<sub>KCl</sub> from 7.55 to 8.09) prevail in this zone. The features of the course of enzymatic processes in soils subject to gas and dust pollution have been established. The levels of activity of redox (catalase, dehydrogenase) and hydrolytic (invertase, urease) enzymes were determined in the distance gradient from the source of pollution and along the directions of air mass propagation. There is a decrease in the activity of these enzymes in soddy-podzolic sandy loamy soils of forest and agricultural lands as one approaches the source of pollution. It is shown that within a radius of up to 2 km from the source of pollution, the soils of forest and agricultural lands are characterized as very poor in terms of enrichment with the studied enzymes. According to the results of the correlation analysis, there is a change in the influence of the reaction of the soil environment on the studied enzymes with a statistically significant negative relationship.

**Keywords:** cement pollution; sod-podzolic soils; reaction of soil environment; enzymatic activity; catalase; dehydrogenase; invertase; urease.

## Введение

Множество одновременно происходящих в почве взаимосвязанных процессов определяется ее генетическими особенностями и регулируется факторами внешнего воздействия. Компонентам почвенного биоценоза свойственно стремление к состоянию динамического равновесия, однако любое воздействие на почвенную среду оказывает влияние состав и деятельность микроорганизмов [1].

В связи с этим возрастаёт экологическая значимость диагностики экологического состояния почв, являющегося одним из основных критериев оценки уровня антропогенной нагрузки. Как правило, при возрастающем уровне антропогенной нагрузки отмечается ускорение биологического круговорота веществ и изменение биологической активности почв, которое может сопровождаться усиленной минерализацией органического вещества и приводить к развитию процессов, влияющих на снижение плодородия [2].

Для оценки биологического состояния почв в настоящее время используется широкий спектр показателей, что обусловлено многообразием функций почвенных микроорганизмов.

Ферментативная активность – многофункциональная характеристика почв. Почвенные ферменты катализируют разнонаправленные процессы, поэтому для объективной характеристики экологического состояния почвы невозможно выбрать один биохимический показатель [3]. В почвах обнаружены представители всех шести известных современной энзимологии классов ферментов, однако наиболее значимую роль играют 2 класса – гидролитические и окислительные ферменты [4].

Интенсивность ферментативных процессов зависит от конкретных условий: наличия и концентрации субстрата, значений pH, температуры, влажности и др. Изучение влияния pH почвы на ее биологическую активность имеет экологическую значимость. При неблагоприятных показателях реакции почвенной среды снижается численность населяющих ее микроорганизмов, отмечаются негативные изменения структуры микробных сообществ. Важнейшие ферменты, связанные с циклами основных биогенных элементов, могут при этом частично денатурировать, что приводит к нарушению круговорота биогенных элементов и процессов формирования гумуса [2; 5].

Окислительно-восстановительные и гидролитические ферменты выступают объектами особого внимания при изучении изменения почвенных процессов под воздействием антропогенных факторов. В связи с этим является актуальным количественная оценка активности окислительно-восстановительных (каталазы, дегидрогеназы) и гидролитических (инвертазы, уреазы) ферментов в дерново-подзолистых почвах в зоне влияния выбросов предприятия по производству строительных материалов (на примере ОАО «Красносельскстройматериалы», Беларусь).

## Материалы и методы исследования

Объектом исследования служили образцы дерново-подзолистых супесчаных почв лесных и прилегающих к ним сельскохозяйственных земель, отобранные на разном расстоянии от предприятия (1; 1,5; 2; 2,5; 3,5; 5 (6,5); 8; 15 км) с учетом «розы ветров» (СЗ, ЮЗ, СВ, ЮВ). Отбор проб проводился в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01–83<sup>1</sup>, ГОСТ 28168–89<sup>2</sup>. Отбор контрольных (фоновых) образцов почвы был осуществлен на расстоянии 15 км от источника загрязнения.

Климатические условия территории, прилегающей к цементному предприятию, оценивали по метеорологическим показателям Волковысской метеорологической станции. Преобладающими ветрами на

<sup>1</sup>ГОСТ 17.4.3.01–83. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. Введен 01.07.84. Москва: Издательство стандартов; 1984.

<sup>2</sup>ГОСТ 28168–89. Почвы. Отбор проб. Введ. 01.04.90. Москва: Издательство стандартов; 1990.

протяжении всего года являются ветры западных и южных направлений. На рис. 1 приведена «роза ветров» в зимние, летние месяцы и за год в целом.

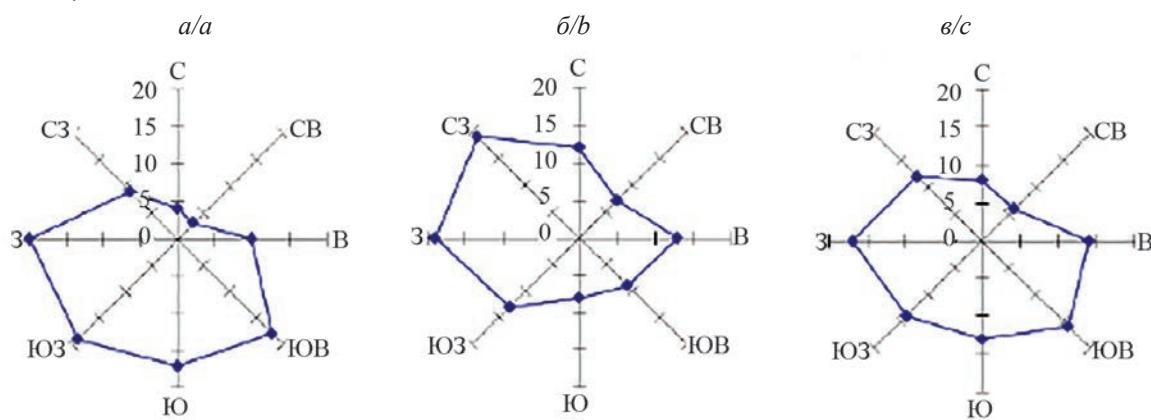


Рис. 1. Повторяемость направлений ветра (а – январь, б – июль, в – среднегодовая)<sup>3</sup>

Fig. 1. Repeatability of wind directions (a – January, b – July, c – average annual rate)<sup>3</sup>

Почвенный покров территории исследования представлен дерново-подзолистыми супесчаными почвами на моренных связанных песках и супесчаными почвами на моренных пылевато-песчанистых рыхлых супесях. Пробы почвенных образцов отбирали с помощью пробоотборника из горизонта 0–20 см. На каждой пробной площадке ( $n = 60$ ) отбирали по пять точечных проб.

Исследования биологической активности проводили в образцах летнего периода отбора (июль). Ферментативная диагностика почвы проведена по гидролитическим (уреаза, инвертаза) и окислительным (каталаза, дегидрогеназа) ферментам. Для определения активности инвертазы использовали физический метод В. Ф. Купревича и Т. А. Щербаковой с использованием сахарозы в качестве ферментного субстрата. Уреазную активность определяли по методу Т. А. Щербаковой, ферментным субстратом служила мочевина. Каталазную активность определяли газометрическим методом. Для определения активности дегидрогеназы применяли метод Ленарда в модификации А. Ш. Галстяна. Ферментативную активность почв определяли в пятикратной повторности в воздушно-сухих образцах [6].

Статистическая обработка данных включала: оценку формы распределения полученных данных с помощью гистограмм и критериев Колмогорова–Смирнова с поправкой Лиллифорса и Шапиро–Уилка, а также корреляционный, дисперсионный и кластерный анализ. Процедура кластерного анализа выполнялась методом иерархической агломеративной кластеризации. В качестве меры расстояния использовался квадрат расстояния Евклида, классификация проводилась методом Варда [7]. Критическое значение уровня значимости принималось равным 5 %. Анализ данных проводился с помощью пакетов программ *Excel 2016* и *Statistica 10*.

## Результаты исследования и их обсуждение

Одним из важных показателей состояния почвы и степени ее трансформации является реакция почвенной среды, с которой тесно взаимосвязаны процессы превращения минеральной и органической составляющих почв. Газопылевые выбросы, в том числе и цементная пыль, от изучаемого промышленного объекта через атмосферные потоки приходят на земную поверхность, где оказывают определенное влияние на свойства почв. В наших исследованиях установлено, что это влияние приводит к изменению кислотно-щелочных условий почв. В табл. 1 представлен диапазон варьирования значений  $pH_{KCl}$  почвенных образцов территорий, прилегающих к предприятию по производству строительных материалов. Анализ данных по кислотности дерново-подзолистых супесчаных почв показал преобладание слабощелочных (при значениях  $pH_{KCl}$  от 7,06 до 7,42) и щелочных условий (при значениях  $pH_{KCl}$  от 7,55 до 8,09).

Диапазон варьирования усредненных значений кислотности в градиенте расстояния от источника загрязнения и в зависимости от направления ветра для почвенных образцов лесных земель составил  $pH_{KCl}$  6,46–6,91, для сельскохозяйственных земель –  $pH_{KCl}$  6,31–7,02, (рис. 2, 3). Следует отметить, что для почвенных образцов лесных земель с учетом «розы ветров» статистически достоверной разницы между средними значениями  $pH_{KCl}$  выявлено не было, однако зафиксированы статистически достоверные

<sup>3</sup>Оценка воздействия на окружающую среду [Электронный ресурс]. URL: <https://volkovysk.grodno-region.by/uploads/files/OVOS-dlja-obsuzhdenij.pdf> (дата обращения: 10.01.2022).

различия для почв сельскохозяйственных земель северо-восточного и юго-восточного направлений ( $p=0,000725$ ).

Таблица 1

**Реакция дерново-подзолистых почв в градиенте расстояния от источника загрязнения и по направлениям распространения воздушных масс**

Table 1

**The reaction of sod-podzolic soils in the gradient of the distance from the source of pollution and in the directions of distribution of air masses**

Показатель	Направление ветра	Расстояние от источника загрязнения, км							контроль (фон)
		1	1,5	2	2,5	3,5	5 (6,5)	8	
$\text{pH}_{\text{KCl}}$	лес	ЮЗ	6,81	7,20	7,06	7,31	6,21	6,10	—*
		ЮВ	7,35	7,61	6,71	—	5,21	—	5,32
		С3	7,42	7,55	—	—	6,95	6,82	5,67
		СВ	—	7,57	—	7,25	6,87	7,90	4,79
	поле	ЮЗ	—	—	—	—	—	—	—
		ЮВ	7,20	7,21	—	—	4,77	6,02	6,32
		С3	—	6,91	6,92	—	6,90	6,83	6,38
		СВ	7,57	—	7,30	7,25	7,12	8,09	—

Примечание. \*Отсутствие возможности отбора проб почвенных образцов в связи с неоднородностью рельефа.

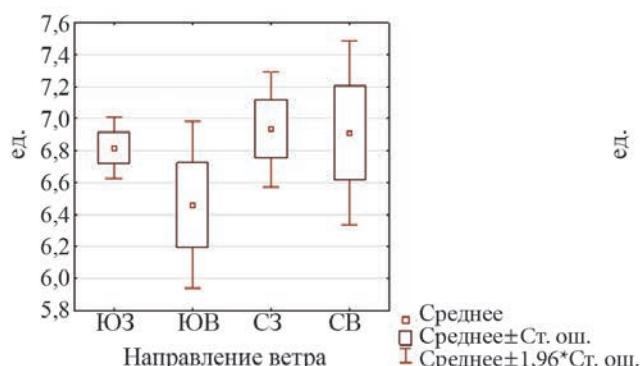


Рис. 2. Диаграмма размаха средних значений  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  почв лесных земель по направлениям ветра

Fig. 2. Diagram of the range of average values of  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  of soils of forest lands in wind directions

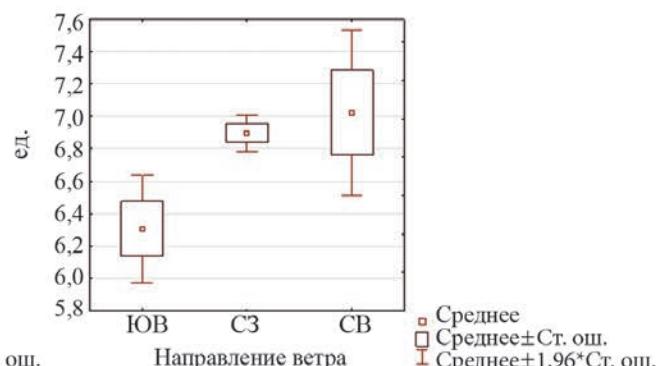


Рис. 3. Диаграмма размаха средних значений  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  почв сельскохозяйственных земель по направлениям ветра

Fig. 3. The diagram of the span of the average values of  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  of soils of agricultural lands in the wind directions

Результаты иерархического кластерного анализа средних значений  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  почв лесных земель иллюстрирует рис. 4. На основании анализа полученных данных можно выделить 3 группы значений изучаемого фактора, близких по средним значениям  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  почв лесных земель в градиенте расстояния от источника загрязнения: 1–2,5 км –  $\text{pH}_{\text{KCl}} 7,3$ ; 3,5–6,5 км –  $\text{pH}_{\text{KCl}} 6,6$ ; 8–15 км –  $\text{pH}_{\text{KCl}} 5,4$  (рис. 5).

Результаты иерархического кластерного анализа средних значений  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  почв сельскохозяйственных земель представлены на рис. 6. Выверенные данные свидетельствуют, что выделяются 3 группы близких по средним значениям кислотности в градиенте расстояния от источника загрязнения: 1,0–1,5 км –  $\text{pH}_{\text{KCl}} 7,2$ ; 2–6,5 км –  $\text{pH}_{\text{KCl}} 6,8$ ; 8–15 км –  $\text{pH}_{\text{KCl}} 5,4$  (рис. 7).

Непараметрический тест сравнения групп кластеров (по критерию Краскела–Уоллиса)  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  дерново-подзолистых почв лесных и сельскохозяйственных земель в градиенте расстояния от источника загрязнения показал статистически достоверные различия между 1 и 3 кластерами с  $p=0,00043$  и  $p=0,00566$  соответственно (рис. 5 и 7). Следует отметить, что реакция почвенной среды, классифицируемая иерархическим кластерным анализом в градиенте расстояния от источника загрязнения, независимо от розы ветров, изменялась линейно.

Для изученных дерново-подзолистых почв сельскохозяйственных земель установлена зона максимального влияния газопылевых выбросов цементного предприятия на реакцию почвы в градиенте 1–1,5 км, а для лесных земель – 1–2,5 км от источника загрязнения.

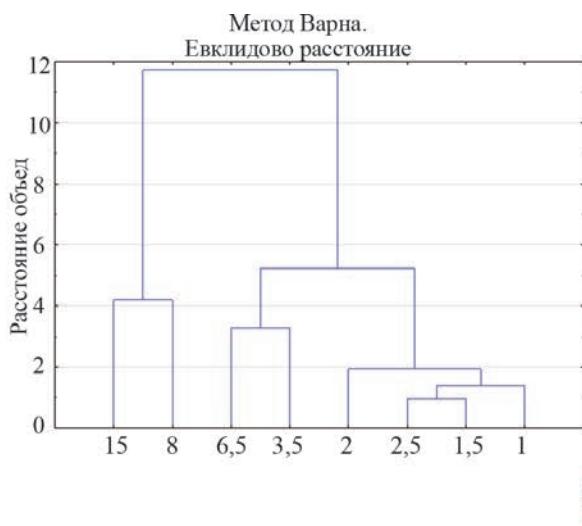


Рис. 4. Дендрограмма классификации средних значений  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  почв лесных земель

Fig. 4. Dendrogram of classification of average values of  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  of soils of forest lands

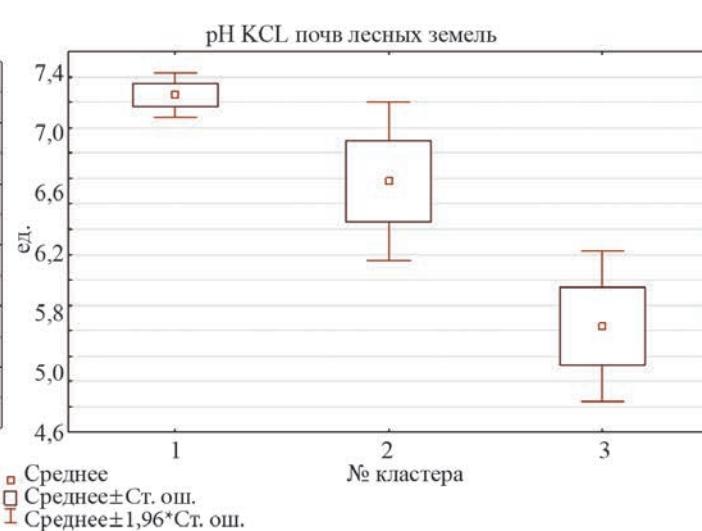


Рис. 5. Сравнение групп (кластеров) средних значений показателя  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  почв лесных земель

Fig. 5. Comparison of groups (clusters) of average values of the  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  index of soils of forest lands

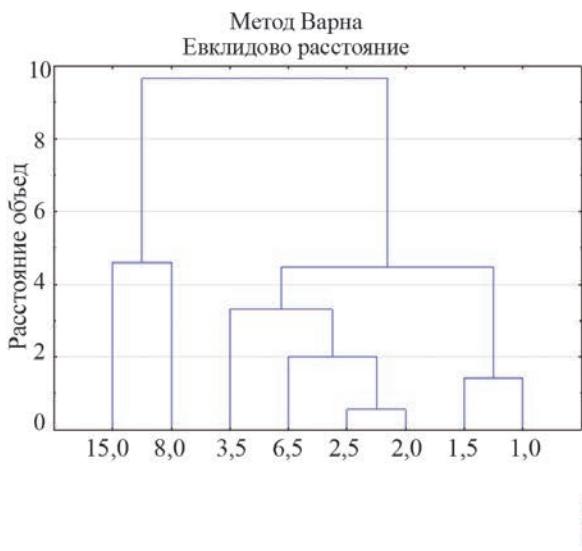


Рис. 6. Дендрограмма классификации средних значений  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  почв сельскохозяйственных земель

Fig. 6. Dendrogram of classification of average values of  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  of soils of agricultural lands

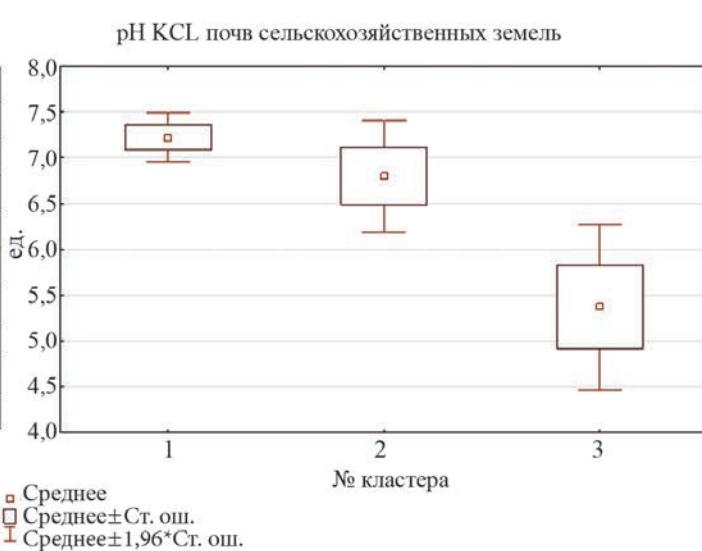


Рис. 7. Сравнение групп (кластеров) средних значений  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  почв сельскохозяйственных земель

Fig. 7. Comparison of groups (clusters) of average  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  values of soils of agricultural lands

Одним из характерных показателей биологической активности почвы является активность каталазы. Каталаза разлагает ядовитую для клеток перекись водорода, образующуюся в процессе дыхания живых организмов и в результате различных биохимических реакций окисления органических веществ.

Для изучаемых дерново-подзолистых супесчаных почв, испытывающих воздействие газопылевых выбросов предприятия по производству цемента, нами установлены следующие количественные значения каталазной активности, представленные в табл. 2.

Диапазон изменения активности каталазы в градиенте расстояния 1–8 км от источника загрязнения варьирует по всем направлениям ветра (за исключением юго-западного) в почвах лесных земель в пределах 0,98–1,26 мг, в почвах сельскохозяйственных земель – 0,87–1,24 мл  $\text{O}_2$  на 1 г в.-с. почвы за 1 мин. Максимальная каталазная активность в наших исследованиях установлена в почвах под лесным фитоценозом юго-западного направления, где составляла 1,53 мл  $\text{O}_2$  на 1 г в.-с. почвы за 1 мин.

В соответствии со шкалой оценки степени обогащенности почв ферментами (каталазой), разработанной Д. Г. Звягинцевым [7], установлено, что почвы лесных и сельскохозяйственных земель во всех направлениях (за исключением юго-западного) в радиусе 2 км от источника загрязнения относятся к очень бедным, то есть < 1 мл  $\text{O}_2$  на 1 г в.-с. почвы за 1 мин.

Таблица 2

**Катализная активность дерново-подзолистых почв в градиенте расстояния от источника загрязнения и по направлениям распространения воздушных масс**

Table 2

**Catalase activity of sod-podzolic soils in the gradient of the distance from the source of pollution and in the directions of distribution of air masses**

Показатель	Направление	Расстояние от источника загрязнения, км							
		1	1,5	2	2,5	3,5	6,5(5,0)	8	
Каталина, мл $O_2/1\text{ г}/1\text{ мин.}$	лес	ЮЗ	1,3	1,3	1,4	1,4	1,8	1,9	
		ЮВ	0,4	0,9	1,6	—	1,6	—	
		СЗ	0,8	0,9	—	—	1,1	1,5	
		СВ	—	0,4	—	1,1	1,2	0,6	
	поле	ЮЗ	—	—	—	—	—	—	
		ЮВ	0,6	0,6	—	—	1,7	2,0	
		СЗ	—	0,7	0,9	—	1,0	0,7	
		СВ	0,5	—	0,5	0,5	1,2	1,2	

Для оценки общего уровня биогенности почвы в наших исследованиях использовалась дегидрогеназная активность. Как известно, дегидрогеназы имеются у абсолютного большинства микроорганизмов, они характеризуют интенсивность процессов дегидрирования органических субстратов и метаболическую активность микрофлоры. В отличие от других ферментов, дегидрогеназы не имеют внеклеточного компонента, они не адсорбируются и не накапливаются в почве, дегидрирование органического субстрата идет за счет дегидрогеназ живых микробных клеток [9].

Именно поэтому дегидрогеназная активность относится к наиболее объективным характеристикам как актуальной численности, так и метаболической активности микробных сообществ почвы.

Для дерново-подзолистых супесчаных почв, испытывающих воздействие газопылевых выбросов предприятия по производству цемента, установлены значения дегидрогеназной активности, которые представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Дегидрогеназная активность дерново-подзолистых почв в градиенте расстояния от источника загрязнения и по направлениям распространения воздушных масс**

Table 3

**Dehydrogenase activity of sod-podzolic soils in the gradient of the distance from the source of pollution and in the directions of distribution of air masses**

Показатель	Направление	Расстояние от источника загрязнения, км							
		1	1,5	2	2,5	3,5	6,5(5,0)	8	
ДГ, мг $TFF/10\text{ г}/24\text{ ч}$	лес	ЮЗ	2,4	2,0	1,9	1,0	0,4	0,7	
		ЮВ	0,3	0,4	1,1	—	0,7	—	
		СЗ	0,6	0,2	—	—	0,6	0,2	
		СВ	—	0,2	—	0,3	0,5	0,8	
	поле	ЮЗ	—	—	—	—	—	—	
		ЮВ	0,3	0,5	—	—	0,3	0,6	
		СЗ	—	1,1	2,2	—	0,2	0,2	
		СВ	2,1	—	0,9	1,1	0,4	2,1	

В результате проведенных исследований установлено, что минимальной дегидрогеназной активностью обладают почвы сельскохозяйственных земель юго-восточного направления в градиенте расстояния от источника загрязнения. В соответствии со шкалой оценки степени обогащенности почв ферментами (дегидрогеназа), по Д. Г. Звягинцеву [8], установлено, что данные почвы относятся к очень бедным, то есть <1 мг ТФФ на 10 г в.-с. почвы за 24 ч. Снижение этого показателя свидетельствует об ухудшении условий для жизнедеятельности микроорганизмов, выделяющих дегидрогеназы.

Для выявления влияния отдельных экологических параметров нами была проведена обработка полученных данных многофакторным дисперсионным анализом.

Результаты дисперсионного анализа для изученных дерново-подзолистых супесчаных почв лесных и сельскохозяйственных земель, прилегающих к изучаемому предприятию, представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Результаты многофакторного дисперсионного анализа влияния расстояния от источника загрязнения и реакции почвенной среды на каталазную активность почв лесных земель и сельскохозяйственных земель**

Table 4

**Results of multivariate dispersion analysis of the influence of the distance from the source of pollution and the reaction of the soil environment on the catalase activity of soils of forest lands and agricultural lands**

Показатель		Статистические показатели	Расстояние от источника загрязнения	Реакция среды ( $\text{pH}_{\text{KCl}}$ )
Катализ, мл $\text{O}_2/1 \text{ г}/1 \text{ мин}$	лес	$\eta^2$ , %	64,8	71,6
		F	4,99	11,59
		P	<b>0,002*</b>	<b>0,000011</b>
	поле	$\eta^2$ , %	62,8	90,2
		F	2,81	20,34
		P	0,072	<b>0,000032</b>

Примечание. \*Жирным шрифтом выделены значения при  $p < 0,05$ .

На основе дисперсионного анализа установлено, что существует тесная отрицательная корреляционная связь между активностью каталазы в почвенных образцах и расстоянием от источника загрязнения. По активности дегидрогеназы в почвенных образцах такой зависимости не установлено.

На активность каталазы для почв лесных земель сила влияния расстояния от источника загрязнения составила 64,8 % и для сельскохозяйственных земель – 62,8 %. При этом сила влияния реакции почвенной среды ( $\text{pH}_{\text{KCl}}$ ) на активность фермента каталазы для почв лесных земель составила от 71,6 %, а для почв сельскохозяйственных земель – 90,2 %. Отмечено изменение влияния реакции почвенной среды на активность каталазы отрицательной взаимосвязью (для почв лесных земель –  $r = -0,86$ , а для почв сельскохозяйственных земель –  $r = -0,74$  при  $p < 0,05$ ).

Гидролитические ферменты обеспечивают ускоренное протекание сложных многостадийных процессов минерализации разнообразных по химическому составу органических соединений и высвобождение элементов питания [10; 11]. Однако по значимости можно выделить ключевые гидролитические ферменты, связанные с разложением наиболее распространенных в почве форм нахождения основных биогенных элементов, углерода и азота. Преобладающие формы органического углерода в почвах – поли- и олигосахариды [14], их минерализация – самый масштабный деструкционный процесс [4]. В связи с этим интенсивность минерализации в цикле углерода целесообразно оценивать по гидролитической деградации поли- и олигосахаридов с учетом того, что наиболее объективную оценку интенсивности процесса дает определение активности ферментов завершающих стадий гидролиза, когда в почву непосредственно поступают конечные продукты – моносахариды [8].

Выбор инвертазной активности в качестве диагностического показателя обусловлен ее критической ролью в высвобождении низкомолекулярных сахаров, глюкозы и фруктозы, которые являются основным источником энергии для микроорганизмов.

Для изучаемых дерново-подзолистых супесчаных почв, испытывающих воздействие газопылевых выбросов предприятия по производству цементного, установлены значения инвертазной активности, которые представлены в табл. 5.

В результате проведенных исследований выявлено, что минимальной инвертазной активностью обладают почвы лесных земель юго-восточного направления (2,4–3,4 мг глюкозы/1г/24ч) и сельскохозяйственных земель северо-восточного направления (1,5–3,0 мг глюкозы/1г/24ч). В соответствии со шкалой оценки степени обогащенности почв ферментами (инвертаза), по Д. Г. Зягинцеву, установлено, что данные почвы относятся к очень бедным, то есть  $< 5$  мг глюкозы/1 г/24 ч. Низкий уровень активности инвертазы свидетельствует об ухудшении условий для жизнедеятельности почвенных микроорганизмов, что проявляется в снижении развития микробной биомассы и нарушении определенного уровня биогенности почвы.

Таблица 5

**Инвертазная активность дерново-подзолистых почв в градиенте расстояния от источника загрязнения и по направлениям распространения воздушных масс**

Table 5

**Invertase activity of sod-podzolic soils in the gradient of the distance from the source of pollution and in the directions of distribution of air masses**

Показатель	Направление	Расстояние от источника загрязнения, км								
		1	1,5	2	2,5	3,5	6,5	8	контроль	
Инвертаза, мг глюкозы/1 г/24 ч	лес	ЮЗ	7,8	8,2	7,7	6,6	6,6	9,7	—	10,1
		ЮВ	2,4	3,5	4,1	—	4,95	—	3,4	3,6
		С3	12	9,9	—	—	8,8	10,9	8,7	13,8
		СВ	—	6,64	—	5,8	8,4	6,1	6,3	9,1
	поле	ЮЗ	—	—	—	—	—	—	—	—
		ЮВ	6,8	5	—	—	3,8	2,6	7,6	13,2
		С3	—	6,3	10,6	—	8,6	8,5	13,7	14,9
		СВ	2,6	—	2,69	2,95	1,495	9,38	—	10,85

Известно, что в почвах наиболее широко распространены амидные формы органического азота [12]. В цикле азота универсальным деградационным процессом является аммонификация, в результате которой азот органических соединений становится доступным для растений. На завершающих стадиях аммонификации, обеспечивающих образование аммония, действуют амидогидролазы, к которым относятся уреазы. Активность минерализации в цикле азота целесообразно определять по активности уреаз, играющих критическую роль в высвобождении неорганического азота, который непосредственно ассимилируется растениями и микроорганизмами.

Сравнительный анализ данных по уреазной активности (табл. 6) показывает, что в почвах лесных и сельскохозяйственных земель северо-восточного направлений отмечается уменьшение активности уреазы, свидетельствующее о снижении интенсивности накопления минерального азота в почве.

Таблица 6

**Уреазная активность дерново-подзолистых почв в градиенте расстояния от источника загрязнения и по направлениям распространения воздушных масс**

Table 6

**Urease activity of sod-podzolic soils in the gradient of the distance from the source of pollution and in the directions of distribution of air masses**

Показатель	Направление	Расстояние от источника загрязнения, км								
		1	1,5	2	2,5	3,5	6,5	8	контроль	
Уреаза, мг (N-NH <sub>4</sub> )/1 г/4 ч	лес	ЮЗ	148,8	143,8	130,3	126,5	126,5	129,5	—	165,5
		ЮВ	74,8	123,3	109,8	—	136,3	—	145,3	161,5
		С3	114,8	103,3	—	—	98,5	119,3	114,0	147,0
		СВ	—	90,4	—	94,2	69,5	74,3	165,3	173,0
	поле	ЮЗ	—	—	—	—	—	—	—	—
		ЮВ	153,3	117,0	—	—	122,3	100,5	180,3	183,0
		С3	—	140,5	103,8	—	110,5	135,3	130,3	191,3
		СВ	89,7	—	80,1	113,5	77,0	92,0	—	118,3

По результатам корреляционного анализа, представленных в табл. 5, отмечается изменение влияния реакции почвенной среды на изученные ферменты статистически достоверной отрицательной взаимосвязью.

Многими исследователями отмечена корреляционная взаимосвязь между активностью инвертазы и активностью других почвенных карбогидраз [13]. В наших исследованиях обнаружена тесная взаимосвязь между активностью инвертазы и дегидрогеназной активностью ( $r = 0,75\text{--}0,81$  при  $p < 0,05$ ), что свидетельствует о преимуществе в почве инвертазы микробного происхождения. Снижение инвертазной активности в почве способствует снижению метаболической активности почвенных микробных сообществ.

Таблица 7

**Результаты корреляционного анализа взаимосвязи показателей ферментативной активности и реакции почвенной среды для почв лесных и сельскохозяйственных земель по направлениям**

Table 7

**Results of correlation analysis of the relationship between indicators of enzymatic activity and the reaction of the soil environment for soils of forest and agricultural lands in the following directions**

Дегидрогеназа				Каталаза				Уреаза				Инвертаза			
Почвы под лесом															
ЮЗ	ЮВ	C3	СВ	ЮЗ	ЮВ	C3	СВ	ЮЗ	ЮВ	C3	СВ	ЮЗ	ЮВ	C3	СВ
–	<b>–0,54</b>	<b>–0,46</b>	–	–	<b>–0,64</b>	<b>–0,94</b>	<b>–0,89</b>	–	<b>–0,60</b>	<b>–0,60</b>	<b>–0,60</b>	–	<b>–0,49</b>	–	<b>–0,43</b>
Почвы сельскохозяйственных угодий															
–	<b>–0,43</b>	<b>–0,65</b>	–	–	<b>–0,93</b>	<b>–0,65</b>	<b>–0,51</b>	–	–	<b>–0,58</b>	–	–	–	<b>–0,69</b>	–

Примечание. \*Жирным шрифтом выделены значения при  $p < 0,05$ .

## Заключение

Результаты исследований подтверждают значимость ферментативной активности в качестве диагностических показателей экологического состояния почвы. Для изученных дерново-подзолистых супесчаных почв лесных и сельскохозяйственных земель установлены уровни активности почвенных ферментов: каталазы, дегидрогеназы, инвертазы и уреазы в условиях воздействия предприятия по производству строительных материалов. Отмечено снижение активности окислительных и гидролитических ферментов по мере приближения к источнику загрязнения. По результатам корреляционного анализа отмечается изменение влияния реакции почвенной среды на изученные ферменты статистически достоверной отрицательной взаимосвязью.

## Библиографические ссылки

1. Мамитко АВ, Никитина ЗИ. Динамика микробных популяций в разных почвах. *Биодинамика и плодородие почвы*. Таллин: [б. и.]; 1979. с. 64–68.
2. Туев НА. *Микробиологические процессы гумусообразования*. Москва: Агропромиздат; 1989. 237 с.
3. Bandick AK, Dick RP. Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry*. 1999;31(11):1471–1479.
4. Звягинцев ДГ, Бабьева ИЛ, Зенова ГМ. *Биология почв*. Москва: МГУ; 2005. 445 с.
5. Tabatabai MA, et al. Soils enzymes. Methods of soil analysis : microbiological and biochemical properties. *Soil Science Society of America*. 1994;5:775–833.
6. Хазиев ФХ. *Методы почвенной энзимологии*. Москва: Наука; 2005. 252 с.
7. Буреева НН. *Многомерный статистический анализ с использованием ППП «Statistica»*. Нижний Новгород: [б. и.]; 2007. 112 с.
8. Звягинцев ДГ. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей. *Почвоведение*. 1978;6:48–52.
9. Петерсон НВ, Периг ГТ. Окислительно-восстановительные условия и дегидрогеназная активность в некоторых почвах западных областей Украины. *Научные труды Львовского СХИ*. 1968;17:76–84.
10. Dick RP. Enzymes in the Environment: Activity, Ecology & Applications. Granada, Spain: [publisher unknown]; 1999. p. 164.
11. Speir TW, Ross DJ. Hydrolytic Enzyme Activities to Assess Soil Degradation and Recovery. *Enzymes in the Environments: Activity, Ecology and Applications*. 2002;2:407–431.
12. Knicker H, Lüdemann HD, Haider K. Incorporation studies of  $\text{NH}_4^+$  during incubation of organic residues by  $^{15}\text{N}$ -CPMAS-NMR-spectroscopy. *European Journal Soil Science*. 1997;48:431–441.
13. Галстян АШ. *Ферментативная активность почв Армении*. Ереван: Айстан; 1974. 260 с.

## References

1. Mamatko AV, Nikitina ZI. *Dinamika mikrobynykh populyatsiy v raznykh pochvakh. Biodinamika i plodorodiye pochvy* [Dynamics of microbial populations in different soils. Biodynamics and soil fertility]. Tallinn: [publisher unknown]; 1979. p. 64–68. Russian.
2. Tuev NA. *Mikrobiologicheskiye protsessy gumusoobrazovaniya* [Microbiological processes of humus formation]. Moscow: Agropromizdat; 1989. 237 p. Russian.
3. Bandick AK, Dick RP. Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry*. 1999;31(11):1471–1479.
4. Zvyagintsev DG, Babieva IL, Zenova GM. *Biologiya pochv* [Biology of soils]. Moscow: MSU; 2005. 445 p. Russian.
5. Tabatabai MA, et al. Soils enzymes. Methods of soil analysis : microbiological and biochemical properties. *Soil Science Society of America*. 1994;5:775–833.
6. Khaziev FH. *Metody pochvennoy enzimologii* [Methods of soil enzymology]. Moscow: Nauka; 2005. Russian.
7. Bureeva NN. *Mnogomernyy statisticheskiy analiz s ispolzovaniyem PPP «Statistica»* [Multivariate statistical analysis using the «Statistica» PPP]. Nizhny Novgorod: [publisher unknown]; 2007. 112 p. Russian.
8. Zvyagintsev DG. Biological activity of soils and scales for assessing some of its indicators. *Pochvovedenie* [Soil science]. 1978;6:48–52. Russian.
9. Peterson NV, Perig GT. Redox conditions and dehydrogenase activity in some soils of the western regions of Ukraine. *Scientific works of the Lviv SCI*. 1968;17:76–84. Russian.
10. Dick RP. Enzymes in the Environment: Activity, Ecology & Applications. Granada, Spain: [publisher unknown]; 1999. p. 164.
11. Speir TW, Ross DJ. Hydrolytic Enzyme Activities to Assess Soil Degradation and Recovery. *Enzymes in the Environments: Activity, Ecology and Applications*. 2002;2:407–431.
12. Knicker H, Lüdemann HD, Haider K. Incorporation studies of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> during incubation of organic residues by <sup>15</sup>N-CPMAS-NMR-spectroscopy. *European Journal Soil Science*. 1997;48:431–441.
13. Galstyan AL. *Fermentativnaya aktivnost' pochv Armenii* [Enzymatic activity of Armenian soils]. Yerevan: Aistan; 1974. 260 p. Russian.

Статья поступила в редакцию 11.02.2022.  
Received by editorial board 11.02.2022.