

УДК 549.25 [577.152.193:614.771]:628.472  
ГРНТИ 31.27.17

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА АКТИВНОСТЬ ПЕРОКСИДАЗ ПОЧВ

**Дроздова Наталья Ивановна**

к.х.н., доцент, заведующий кафедрой химии

**Шихалова Анастасия Андреевна**

магистрант биологического факультета

УО «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины»

Республика Беларусь, г. Гомель

**Аннотация:** Активность пероксидаз, принимающих участие в процессах гумификации, является одним из важнейших показателей состояния почв, отражающей ее потенциальное плодородие. Выполнен анализ биологической активности и содержания тяжелых металлов в почве территорий, граничащих с санитарно-защитной зоной полигона твердых коммунальных отходов г. Гомеля. Установлено, что к числу приоритетных загрязнителей почвы относятся подвижные формы меди, содержание которых на удалении 500-1000 м от обваловки полигона в 100 % проанализированных образцов превышает ПДК. Активность пероксидаз характеризуется преимущественно низким уровнем, что может быть следствием нарушенности состояния почвенной экосистемы на данной территории. По результатам корреляционного анализа установлена тесная обратная связь между активностью пероксидазы и содержанием в почве меди, цинка, кадмия и свинца.

**Ключевые слова:** почва, полигон твердых коммунальных отходов, активность пероксидазы, тяжелые металлы, предельно допустимые концентрации, корреляция.

## ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF HEAVY METALS ON THE ACTIVITY OF SOIL PEROXIDASE IN TERRITORIES ADJACENT TO THE SANITARY PROTECTION ZONE OF THE MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILL

**Drozdova Natalya Ivanovna**

Ph.D., Associate Professor, Head of the Department of Chemistry

**Shikhalova Anastasia Andreevna**

Master's student of the Faculty of Biology

Francisk Skorina Gomel State University

Republic of Belarus, Gomel

**Abstract:** The activity of peroxidases involved in humification processes is one of their most important indicators of soil condition, reflecting its potential fertility. The analysis of the biological activity and the content of heavy metals in the soil of the territories bordering the sanitary protection zone of the municipal solid waste landfill of Gomel was carried out. It has been established that mobile forms of copper are among the priority soil pollutants, the content of which at a distance of 500-1000 m from the landfill embankment exceeds the MPC in 100% of the analyzed samples. The activity of peroxidases is characterized by a predominantly low level, which may be a consequence of the disturbed state of the soil ecosystem in this area. According to the results of the correlation analysis, a close inverse relationship was established between the activity of peroxidase and the content of copper, zinc, cadmium and lead in the soil.

**Keywords:** soil, municipal solid waste landfill, peroxidase activity, heavy metals, maximum permissible concentrations, correlation.

Почва является сложной биохимической системой, в которой особая роль принадлежит природным катализаторам – ферментам. Активность ферментов играет важную роль в функционировании почвенной экосистемы и поддержании гомеостаза. Современная наука насчитывает порядка тысячи почвенных энзимов. К числу наиболее изученных классов относят оксидоредуктазы и гидролазы.

Переоксидазы являются представителями класса оксидоредуктаз [1]. Биологическая роль данных ферментов заключается в участии в процессах синтеза и деструкции органического вещества почвы, в том числе, в процессах распада гуминовых кислот [2].

В настоящее время показателям ферментативной активности отводится важная роль в биоиндикации состояния почв, так как они чувствительны к влиянию различного рода загрязняющих факторов [3]. Их эффективность в боимониторинге уже доказана благодаря исследованиями многих авторов [3, 4, 5, 6].

Согласно исследованиям, Ю. М. Поляк, В. И. Сухаревича [3], выделяют несколько групп основных загрязняющих факторов, достоверно влияющих на активность пероксидаз: нефть и нефтепродукты, антибиотики, тяжелые металлы и пестициды.

Однако однозначность влияния тяжелых металлов на активность ферментов в различных типах почв исходя из данных исследований авторов [7, 8] не установлена.

**Целью исследований** являлся анализ влияния тяжелых металлов (далее – ТМ) на активность пероксидаз в почве территорий, граничащих с санитарно-защитной зоной полигона твердых коммунальных отходов (далее – ТКО).

**Объектом исследования** служили образцы дерново-подзолистой почвы, отобранные в зоне влияния городского полигона ТКО г. Гомеля (полигон высокой мощности, средняя нагрузка более 870 тыс. м<sup>3</sup>/ год).

Пробоотбор почвы осуществлялся в июле 2022-2023 гг. на глубину 0-20 см. Отдаленность площадок пробоотбора от зоны обваловки полигона составляла 500 м (граница санитарно-защитной зоны полигона (далее – СЗЗ)), 650 м, 800 м, 1000 м и 2500 м (контрольные участки).

Определение активности пероксидазы проводили методом К.А. Козлова [9]. Определение содержания тяжелых металлов в почве проводилось атомно-абсорбционным методом на базе КУП «Гомельская областная проектно-изыскательская станция химизации сельского хозяйства». Элементный анализ выполнен на спектрофотометре ААС NovAA 300. Подвижные формы экстрагировали 1 н раствором HCl в отношении почва - раствор 1:10. Для извлечения валовых форм использован метод сухого озоления проб [10].

Результаты исследования активности почвенных ферментов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Средние значения активностей пероксидаз почве в районе влияния полигона ТКО г. Гомеля

Отдаленность площадки отбора от обваловки полигона	В мл 0,01 н I <sub>2</sub> / 1 г почвы	
	Активность пероксидаз	
	2022 г.	2023 г.
500 м	0,72 ± 0,017	0,26±0,0321
650 м	0,95 ± 0,041	0,34±0,0404
800 м	1,15 ± 0,035	0,92±0,0346
1000 м	1,27 ± 0,167	0,50±0,0173
контроль (2500 м)	1,99	1,27±0,0231

Преобладание показателей ниже 1,8 мл 0,01 н I<sub>2</sub> / 1 г почвы позволяет оценить активность пероксидазы в почве исследуемых территорий как преимущественно низкую и среднюю (1,8 -3,0 мл 0,01 н I<sub>2</sub> / 1 г).

Установлено, что активность пероксидазы в образцах почвы, отобранных в июле 2022 г. находилась в пределах 0,72 – 1,27 мл 0,01 н I<sub>2</sub>/1 г почвы. За аналогичный период 2023 года – 0,26 – 1,27 мл 0,01 н I<sub>2</sub> / 1 г почвы. При этом максимальная активность была выявлена для почвы контрольных участков: 1,99 и 1,27 мл 0,01 н I<sub>2</sub> / 1 г, минимальная - для почвы на границе санитарно-защитной зоны полигона.

Полученные результаты для оценки достоверности наблюдаемых различий в активности ферментов пероксидаз в 2022 и 2023 г.г. подвергли однофакторному дисперсионному анализу (рисунок 1). Установлено, что различия носят статистически значимый характер.

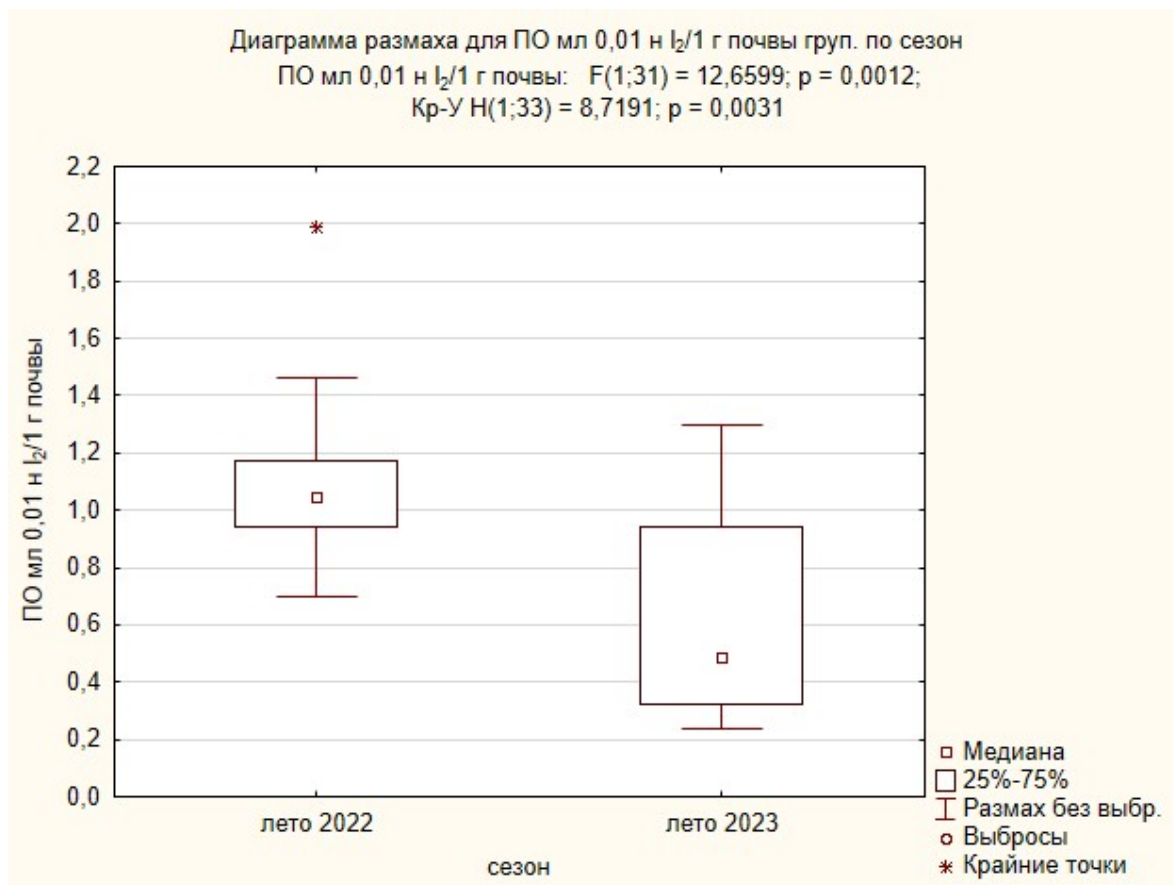


Рисунок 1 –Анализ активности пероксидазы в почве

Среди факторов, оказывающих влияние на наблюдаемые различия в активности ферментов в почве в аналогичные периоды 2022 и 2023 гг. могут быть, в том числе, и различия в гидротермических показателях данных периодов. Из всех контролируемых параметров метеорологического состояния природной среды наибольшая значимость для настоящих исследований принадлежит температуре и количеству атмосферных осадков.

Норма среднемесячной температуры июля: 20,4 °С. Фактическая средняя температура месяца в Гомеле за июль 2022 года была ниже климатической нормы на 0,5°С и составила 18,4°С. Температура воздуха днем на протяжении месяца в основном составляла 18 - 29°С, а в самые теплые сутки поднималась до +30°С и более. Температура воздуха ночью на протяжении месяца находилась в основном в пределах 8 - 19°С. За месяц в среднем по республике выпало 104,4 мм осадков, что составило 117 % климатической нормы. По территории страны условия увлажнения были крайне неоднородны: по большей части выпало 70-120% нормы.

Температурный режим за июль 2023 года был ниже климатической нормы на -0,3°С, что составило +18,6°С. Дневная температура в среднем составляла +20 +29°С, в наиболее

жаркие дни поднималась до +30°C и более. Ночью температура составляла от +10 до +19°C. Среднее количество осадков по стране составило 85,9 мм (96% от климатической нормы). В районе анализируемой нами территории выпало 100-200% нормы осадков за месяц [11, 12, 13, 14]. Избыточная увлажненность почвы территории из-за обильных осадков в июле 2023 года могла послужить одной из причин уменьшения активности пероксидаз.

Как было отмечено ранее, по данным ряда авторов на активность пероксидаз оказывает содержание в почве тяжелых металлов. Согласно Постановлению Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 22 июля 2020 г. № 15 о локальном мониторинге окружающей среды [17] тяжелые металлы входят в перечень параметров обязательного контроля состояния почвы. В почвах санитарно-защитных зон полигонов ТКО (500 м от обваловки полигонов) с периодичностью один раз в три года осуществляется контроль содержания кадмия, меди, никеля, свинца, хрома, цинка, ртути и мышьяка. Однако с учетом возможности распространения загрязнителей с грунтовыми водами, стоками, пылевым разномом контроль за состоянием почвы на сопредельных территориях представляет несомненный интерес для возможности прогнозирования рисков неблагоприятных экологических последствий.

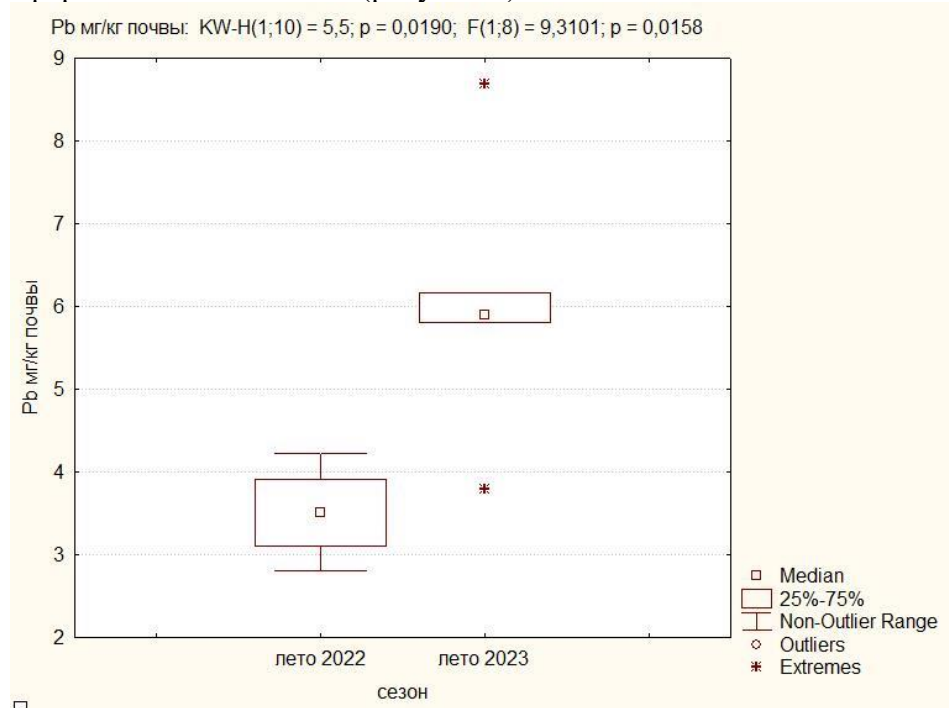
В таблице 2 представлены результаты определения содержания валовых и подвижных форм тяжелых металлов в почве территорий, сопредельных с СЗЗ полигона ТКО.

Таблица 2 – Средние значения содержания подвижных и валовых форм тяжелых металлов в почве исследуемых территорий

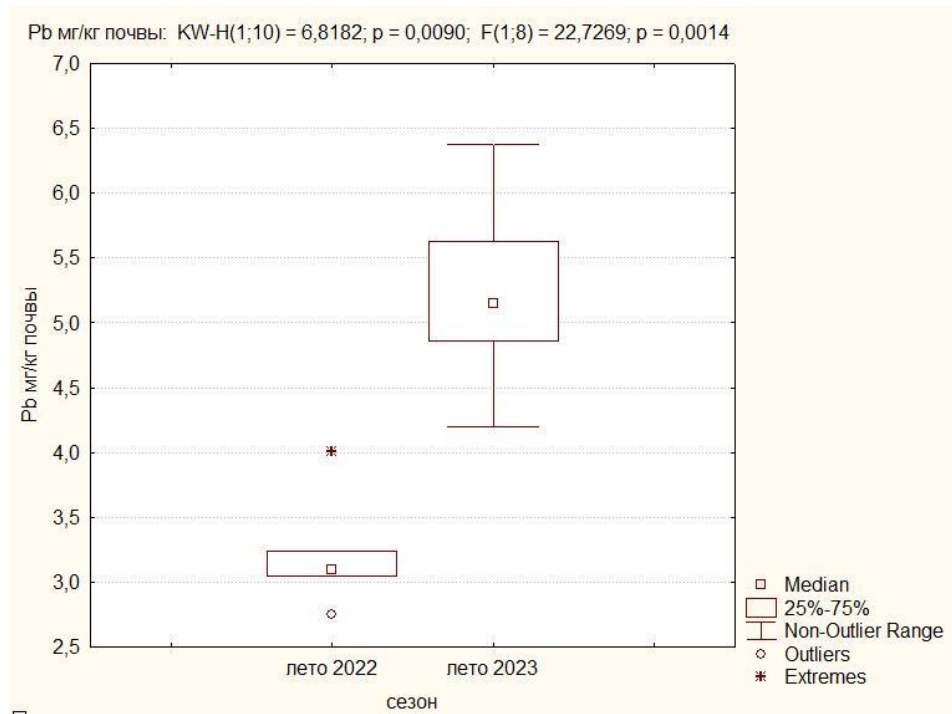
Отдаленность площадки отбора от обваловки полигона	2022 г.				2023 г.			
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd
	подвижные формы							
500 м	4,190	8,400	2,750	0,120	6,400	17,320	6,380	0,210
650 м	7,940	9,910	3,240	0,210	8,200	10,370	5,630	0,190
800 м	9,620	15,030	4,010	0,310	9,770	11,760	5,150	0,230
1000 м	5,450	7,720	3,090	0,100	8,830	13,000	4,860	0,250
контроль (2500 м)	1,080	4,870	3,050	0,010	1,890	6,480	4,200	0,070
	валовые формы							
500 м	4,260	15,220	2,810	0,130	10,060	30,180	8,690	0,250
650 м	14,770	37,700	3,410	0,220	10,380	21,960	5,980	0,240
800 м	10,110	32,810	4,220	0,330	13,820	23,220	6,170	0,270
1000 м	5,350	30,940	3,590	0,130	12,240	25,450	5,810	0,280
контроль (2500 м)	1,220	10,030	3,790	0,050	2,800	12,390	5,800	0,090

Валовые содержания металлов в почвах за период наблюдений не превышали ПДК/ОДК. Для исследуемых территорий, находящихся в районе полигона ТКО г. Гомеля было установлено превышение в почве ПДК только для подвижных форм меди: в 100 % проанализированных образцов, отобранных на удалении (500÷1000) м от зоны обваловки полигона содержание меди превышало допустимые концентрации в 1,13 – 3,43 раза. Для кадмия и свинца установлены единичные случаи превышения допустимых концентраций. Превышение ПДК подвижных форм металлов в почвах контрольных участков не выявлено.

Отмечали, что содержание тяжелых металлов в почве пробных площадей в июле 2023 года превышало соответствующие показатели за 2022 год в среднем в 1,5-2,5 раза. Однако статистически значимыми являлись различия в концентрациях валовых и подвижных форм только для свинца (рисунок 2).



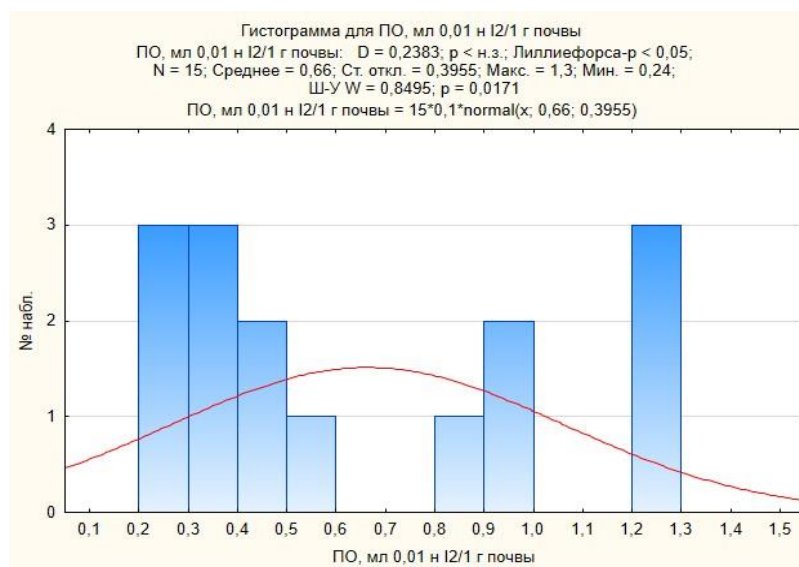
(а)



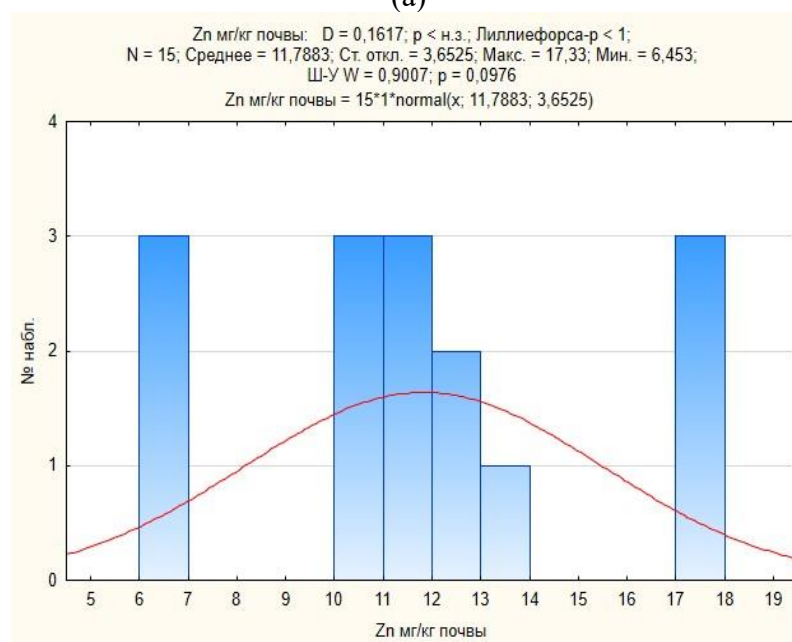
(б)

Рисунок 2 – Анализ различий концентраций валовых (а) и подвижных (б) форм свинца в почвах исследуемых территорий в 2022-2023 гг.

Для проведения статистического анализа полученных данных нами предварительно была осуществлена проверка на нормальность распределения всех параметров в программе Statistica 10. Было установлено, что нормальность распределения характерна только для ряда показателей: подвижные формы цинка и свинца. Для содержания других форм тяжелых металлов, а также активности пероксидаз выявлено ненормальное распределение показателей, что указывает на необходимость применения в дальнейшем анализе методов непараметрической статистики. Примеры гистограмм распределения представлены на рисунке 3.



(а)



(б)

Рисунок 3 – Проверка на нормальность распределений:  
 (а) ПО, мл 0,01 н I<sub>2</sub>/г почвы, (б) Zn мг/кг почвы (подвижные формы)

Для изучения влияния тяжелых металлов на активность ферментов пероксидаз проведены расчеты парных коэффициентов корреляции (таблица 3) в диапазонах варьирования показателей, представленных в таблицах 1 и 2.

Таблица 3 – Результаты корреляционного непараметрического анализа

Активность ПО, мл 0,01 н I <sub>2</sub> /г почвы	мг/ кг почвы					
	2022 г.		2023 г.			
	Подвижные формы		Валовые формы		Подвижные формы	
	Cu	Cd	Zn	Pb	Zn	Pb
	-0,60	-0,58	-0,67	-0,61	-0,67	-0,86

Результатом корреляционного анализа стало установление достоверной обратной корреляции между показателями активность пероксидаз и содержанием тяжелых металлов. Значения коэффициентов корреляции указывают на ингибирующий характер влияния на активность пероксидаз меди, цинка, кадмия и свинца. Различия в результатах, полученных по наблюдениям 2022 и 2023 года, отчасти можно объяснить достоверным увеличением концентрации свинца в почве в 2023 году, который, по-видимому, оказывает более выраженное ингибирующее влияние на активность фермента. Однако, данное утверждение требует продолжения исследований и выявления дополнительных закономерностей.

**Заключение.** Как показал анализ данных, активность пероксидаз в почве территорий, сопредельных с полигоном ТКО г. Гомеля характеризуется преимущественно низким уровнем, что может быть следствием нарушенности состояния почвенной экосистемы. Для выявления достоверных пространственно-временных различий в активности ферментов необходимо учитывать влияние антропогенных факторов (загрязнение территории) и климатических условий (температура, количество осадков), которые в совокупности определяют формирование условий для функционирования ферментов в почве.

#### Список литературы:

1. Поволоцкая, Ю. С. Общее представление о почвенных ферментах / Ю. С. Поволоцкая // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – Новосибирск, 2020. – № 1-1. – С. 21-23. – doi:10.24411/2500-1000-2020-10005.
2. Хази́ев, Ф. Х. Методы почвенной энзимологии / Ф. Х. Хази́ев. – М. : Наука, 1990. – 189 с.
3. Поляк, Ю. М. Почвенные ферменты и загрязнение почв: биодegradация, биоремедиация, биоиндикация / Ю. М. Поляк, В. И. Сухаревич // Агрохимия. – М., 2020. – № 3. – С. 83–93.
4. Rao, M. A. Enzymes as useful tools for environmental purposes / M. A. Rao, R. Scelza, F. Acevedo, M. C. Diez, L. Gianfreda // Chemosphere. – № 107. – 2014. – P. 145-162.
5. Schaffer, A. Pesticide effects on enzyme activities in the soil ecosystem / A. Schaffer // Soil Biochemistry. – N.Y.: Marcel Dekker, 1993. – P. 273-340.
6. Галиулин, Р. В. Ферментативная индикация загрязнения почв тяжелыми металлами / Р. В. Галиулишн, Р. А. Галиулина // Агрохимия. – № 11. – 2006. – С. 84-95.
7. Новоселова, Е. И. Ферментативная трансформация органических остатков в почвах, загрязненных тяжелыми металлами / Е. И. Новоселова, О. О. Волкова, Р. Р. Турьянова // Экология урбанизированных территорий. – № 1, 2019. – С. 75-81. doi:10.24411/1816-1863-2019-11075
8. Мосина, Л. В. Экологическая опасность загрязнения почвы тяжелыми металлами (на примере свинца) / Л. В. Мосина, Э. А. Довлетярова, С. Ю. Ефремова, Норвосурэн Ж. // Известия ПГПУ им. В.Г. Белинского. – № 29. – 2012. – С. 383-386.
9. Минеев, В. Г. Практикум по агрохимии: учеб. пособие для ун-тов / В. Г. Минеев. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 303 с.
10. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства / редкол.: А. М. Артюшин (гл. ред.) [и др.]. – 2-е издание – М. : 1992. – 62 с.
11. Самусик Е.А. Полифенолоксидазная и пероксидазная активность дерново-подзолистых почв в условиях воздействия выбросов предприятия по производству

строительных материалов / Е.А. Самусик, Т.П. Марчик, С.Е. Головатый // Экология. – Минск, 2019. – № 3. – С. 65-79.

12. World Weather. Прогноз погоды. Погода в Гомельской области [Электронный ресурс]. – URL: [https://world-weather.ru/pogoda/belarus/homiel\\_voblast/](https://world-weather.ru/pogoda/belarus/homiel_voblast/)

13. Белгидромет. Климатическая характеристика июля 2022 года. [Электронный ресурс]. – URL : <https://belgidromet.by/ru/climatolog-ru/view/klimaticheskaja-harakteristika-ijulja-2022-goda-5828-2022/>

14. Белгидромет. Климатическая характеристика июля 2023 года. [Электронный ресурс]. – URL : <https://belgidromet.by/ru/climatolog-ru/view/klimaticheskaja-harakteristika-ijulja-2023-goda-7294-2023/>

15. Climate-Data.org. Климат Гомель (Беларусь) [Электронный ресурс]. – URL: <https://ru.climate-data.org/европа/беларусь/г%20омельская-область/гомель-222/>

16. Погода и климат. [Электронный ресурс]. – URL: <https://web.archive.org/web/20140223054242/http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php>

17. О локальном мониторинге окружающей среды [Электронный ресурс]: постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ Беларусь, 11 янвр. 2017 г., № 5 // // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21731743> . – Дата доступа: 24.11.2023.

