

<http://doi.org/10.32864/polymmattech-2025-11-2-51-58>

УДК 504.05:678.7:678.742.2

ВЛИЯНИЕ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ПЛЕНОК С МЕТАЛЛОСОДЕРЖАЩИМИ ОКСОРАЗЛАГАЕМЫМИ ДОБАВКАМИ НА КИСЛОТНОСТЬ ПОЧВЫ И АКТИВНОСТЬ ФЕРМЕНТОВ КЛАССА ОКСИДОРЕДУКТАЗ

Е. В. ВОРОБЬЕВА¹⁺, А. А. ПОПОВ^{2,3}

¹Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, ул. Советская, 104, 246028, г. Гомель, Беларусь

²Институт биохимической физики имени Н. М. Эмануэля РАН (ИБХФ РАН), ул. Косыгина, 4, 119334, г. Москва, Россия

³Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, Стремянный пер., 36, 115054, г. Москва, Россия

Цель работы — выявить изменения активности оксидоредуктазных ферментов почвы (полифенолоксидазы и пероксидазы), а также изменение уровня её кислотности под воздействием экспериментального загрязнения полиэтиленовыми пленками с металлосодержащими оксоразлагаемыми добавками.

Проведен модельный эксперимент продолжительностью 8 месяцев по искусственному загрязнению почвы полиэтиленовыми пленками с оксоразлагаемыми добавками, содержащими органические слабые антиоксиданты (лимонная и аскорбиновая кислоты) и дисперсные металлы переменной валентности (медь, железо, цинк). По окончании эксперимента в пленках отмечены структурные изменения, которые указывают на развитие окислительных и деструктивных процессов в полимерной матрице.

Показано, что внесение экспериментальных оксоразлагаемых пленок в почву привело к снижению окислительно-восстановительного потенциала почвенных вытяжек и уменьшению гидролитической кислотности почвы, при этом pH водных вытяжек почв достоверно не изменилось. Установлено, что активность почвенных ферментов оказалась чрезвычайно восприимчивой к присутствию полиэтиленовых пленок с оксодобавками в почве. Так, активность пероксидазы максимально снижалась в 4,7 раз, активность фермента полифенолоксидазы — в 3,8 раз. Выявлено, что ключевую роль в этом процессе играет металл, содержащийся в оксодобавке. Полученные данные свидетельствуют о негативном влиянии оксоразлагаемых полиэтиленовых пленок на химическое состояние и биологические свойства почвы, подчеркивая необходимость дальнейшего изучения эффектов оксобиоразлагаемых материалов на экологические системы.

Ключевые слова: полиэтилен, загрязнение почв, оксодобавки, металлы переменной валентности, ферментативная активность почв, полифенолоксидаза, пероксидаза, окислительно-восстановительный потенциал почвы, гидролитическая кислотность.

INFLUENCE OF POLYETHYLENE FILMS WITH METAL-CONTAINING OXODEGRADABLE ADDITIVES ON SOIL ACIDITY AND ACTIVITY OF OXIDOREDUCTASE CLASS ENZYMES

E. V. VOROBYOVA¹⁺, A. A. POPOV^{2,3}

¹Francisk Skorina Gomel State University, Sovetskaya St., 104, 246028, Gomel, Belarus

²N. M. Emanuel Institute of Biochemical Physics RAS, Kosygin St., 4, 119334, Moscow, Russia

³Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny Lane, 36, 115054, Moscow, Russia

⁺Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: evorobyova@gsu.by

The aim of the work is to identify changes in the activity of soil oxidoreductase enzymes (polyphenol oxidase and peroxidase), as well as changes in its acidity level under the influence of experimental contamination by polyethylene films with metal-containing oxodegradable additives.

A model experiment lasting eight months was conducted to simulate artificial contamination of soil with polyethylene films containing oxo-degradable additives comprising organic weak antioxidants (citric and ascorbic acids) and dispersed metals of variable valence (copper, iron, zinc). At the end of the experiment, structural changes were noted in the films indicating the development of oxidative and destructive processes within the polymer matrix.

The study has shown that introducing experimental oxo-degradable films into soil leads to a reduction in the redox potential (ORP) of soil leachates and a decrease in soil hydrolytic acidity, whereas no significant changes were observed in the pH of soil water extracts. The activity of soil enzymes proved to be extremely sensitive to the presence of polyethylene films containing oxo-additives in the soil. Specifically, peroxidase activity decreased by 4.7-fold, and polyphenol oxidase activity reduced by 3.8-fold. It was determined that the metal present in the oxo-additive plays a crucial role in these processes. Consequently, the experiment demonstrated the adverse effect of oxo-degradable polyethylene films on both the chemical composition and biological activity of soil, thereby underscoring the need for additional studies investigating the influence of oxobiodegradable materials on ecosystems.

Keywords: polyethylene, soil pollution, oxo-additives, metals of variable valency, soil enzyme activity, polyphenol oxidase, peroxidase, soil redox potential, hydrolytic acidity.

Поступила в редакцию 13.01.2025

© Е. В. Воробьева, А. А. Попов, 2025

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в [редакцию журнала](#)
Full text of articles can be purchased from the editorial office

Адрес редакции: ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь
Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11

Address: Kirov St., 32a, 246050, Gomel, Belarus
Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11

E-mail: polmattex@gmail.com
Web: <http://mpri.org.by/izdaniya/pmt/>

Образец цитирования:

Воробьева Е. В., Попов А. А. Влияние полиэтиленовых пленок с металлосодержащими оксоразлагаемыми добавками на кислотность почвы и активность ферментов класса оксидоредуктаз // Полимерные материалы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 51–58. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2025-11-2-51-58>

Citation sample:

Vorob'eva E. V., Popov A. A. Vliyanie polietilenovykh plenok s metallosoderzhashchimi oksorazлагаemymi dobavkami na kislotnost' pochvy i aktivnost' fermentov klassa oksidoreduktaz [Influence of polyethylene films with metal-containing oxodegradable additives on soil acidity and activity of oxidoreductase class enzymes]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2025, vol. 11, no. 2, pp. 51–58. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2025-11-2-51-58>

Литература

1. Воробьева Е. В., Попов А. А. Биоразлагаемые композиты на основе ископаемых видов сырья. Часть I: стратегии получения, характерные свойства и развитие рынка (обзор) // Полимерные материалы и технологии. 2022. Т. 8, № 2. С. 6–24.
2. Попов А. А., Воробьева Е. В. О стандартизации оксо-биоразлагаемости пластиков // Полимерные материалы и технологии. 2020. Т. 6, № 3. С. 5. doi: 10.32864/polymmattech-2020-6-3-5-5
3. Луканина Ю. К., Колесникова Н. Н., Попов А. А., Хватов А. В. Металлосодержащие добавки для оксо-разложения полиэтилена // Химическая физика. 2019. Т. 38, № 4. С. 69–73. doi: 10.1134/S0207401X19040095
4. Benítez A., Sánchez J. J., Arnal M. L., Müller A. J., Rodríguez O., Morales G. Abiotic degradation of LDPE and LLDPE formulated with a pro-oxidant additive // *Polymer Degradation and Stability*, 2013, vol. 98, is. 2, pp. 490–501. doi:
5. Reddy M. M., Deighton M., Gupta R. K., Bhattacharya S. N., Parthasarathy R. Biodegradation of oxo-biodegradable polyethylene // *Journal*

- of Applied Polymer Science, 2009, vol. 111, is. 3, pp. 1426–1432. doi: 10.1002/app.29073
6. Rizzarelli P., Rapisarda M., Ascione L., Innocenti, F. D., La Mantia F. P. Influence of photo-oxidation on the performance and soil degradation of oxo- and biodegradable polymer-based items for agricultural applications // *Polymer Degradation and Stability*, 2021, vol. 188. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109578
 7. Bandonpadyay S., Sintim H. Y., DeBruyn J. M. Effects of biodegradable plastic film mulching on soil microbial communities in two agroecosystems // *PeerJ*, 2020, vol. 8. doi: 10.7717/peerj.9015/supp-1
 8. Nannipieri P., Giagnoni L., Renella G., Puglisi E., Ceccanti B., Masciandaro G., Fornasier F., Moscatelli M. C., Marinari S. Soil enzymology: Classical and molecular approaches // *Biology and Fertility of Soils*, 2011, vol. 48, is. 1, pp. 743–762. doi: 10.1007/s00374-012-0723-0
 9. Новоселова Е. И., Турьянова Р. Р., Волкова О. О., Нигматуллина Н. Р., Михайлова Е. И. Активность почвенных ферментов вдоль автомобильной дороги // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016. № 1-2 (43). С. 105–107. doi: 10.18454/IRJ.2016.43.126
 10. Khosrozadeh S., Guber A., Kravchenko A., Ghaderi N., Blagodatskaya E. Soil oxidoreductase zymography: Visualizing spatial distributions of peroxidase and phenol oxidase activities at the root-soil interface // *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, vol. 167. doi: 10.1016/j.soilbio.2022.108610
 11. Хазиев Ф. Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 1990. 189 с.
 12. Поляк Ю. М., Сухаревич В. И. Почвенные ферменты и загрязнение почв: биodeградация, биоремедиация, биоиндикация // *Агрохимия*. 2020. № 3. С. 83–93. doi: 10.31857/S0002188120010123
 13. Liu S., Huang, K., Yuan, G., Yang, C. Effects of Polyethylene Microplastics and Phenanthrene on Soil Properties, Enzyme Activities and Bacterial Communities // *Processes*, 2022, vol. 10. doi: 10.3390/pr10102128
 14. Karaca A., Cetin S. C., Turgay O. C., Kizilkaya R. Effects of heavy metals on soil enzyme activities // *Soil heavy metals / Eds: I. Sherameti, A. Varma. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2010, pp. 237–262. doi: 10.1016/j.ecoenv.2008.03.08*
 15. Doelman P., Haanstra L. Short-and long-term effects of heavy metals on urease activity in soils // *Biology and Fertility of Soils*, 1986, vol. 2, pp. 213–218. doi: 10.1007/BF00260846
 16. Zheng L., Li Y., Shang W., Dong X., Tang Q., Cheng H. The inhibitory effect of cadmium and/or mercury on soil enzyme activity, basal respiration, and microbial community structure in coal mine-affected agricultural soil // *Annals of Microbiology*, 2019, vol. 69, pp. 849–859. doi: 10.1007/s13213-019-01478-3
 17. Carine F., Enrique A. G., Stéven C. Metal effects on phenol oxidase activities of soils // *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, vol. 72, is. 1, pp. 108–114. doi: 10.1016/j.ecoenv.2008.03.008
 18. Effron D., de la Horra A. M., Defrieri R. L., Fontanive V., Palma R. M. Effect of cadmium, copper, and lead on different enzyme activities in a native forest soil // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2004, vol. 35, is. 9-10, pp. 1309–1321. doi: 10.1081/CSS-120037548
 19. Aponte H., Meli P., Butler B., Paolini J., Matus F., Merino C., Cornejo P., Kuzyakov Y. Meta-analysis of heavy metal effects on soil enzyme activities // *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 737. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139744
 20. Piotrowska-Długosz A., Długosz J., Fraç M., Gryta A., Breza-Boruta B. Enzymatic activity and functional diversity of soil microorganisms along the soil profile – A matter of soil depth and soil-forming processes // *Geoderma*, 2022, vol. 416. doi: 10.1016/j.geoderma.2022.115779
 21. Хазиев Ф. Х. Системно-экологический анализ ферментативной активности почв: монография. Москва: Наука, 1982. 203 с.
 22. Дроздова Н. И., Шихалова А. А. Анализ влияния тяжелых металлов на активность пероксидаз почв // *Эпоха науки*. 2023. № 36. С. 411–418.

References

1. Vorob'eva E. V., Popov A. A. Biorazлагаемые композиты на основе ископаемых видов сырья. Част' I: стратегии получения, характерные свойства и развитие рынка (обзор) [Biodegradable composites based on natural components. Part I: strategies, characteristic properties and market development (review)]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2022, vol. 8, no. 2, pp. 6–24.
2. Popov A. A., Vorob'eva E. V. O standartizatsii okso-biorazлагаемости plastikov [On the standardization of oxo-biodegradability of plastics]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2020, vol. 6, no. 3, pp. 5. doi: 10.32864/polymmattech-2020-6-3-5-5
3. Lukanina Yu. K., Kolesnikova N. N., Popov A. A., Khvatov A. V. Metallosoderzhashchie dobavki dlya okso-razlozheniya polietilena [Metal-containing additives for oxo-degradation of polyethylene]. *Khimicheskaya fizika* [Chemical physics], 2019, vol. 38, no. 4, pp. 69–73. doi: 10.1134/S0207401X19040095
4. Benítez A., Sánchez J. J., Arnal M. L., Müller A. J., Rodríguez O., Morales G. Abiotic degradation of LDPE and LLDPE formulated with a pro-oxidant additive. *Polymer Degradation and Stability*, 2013, vol. 98, is. 2, pp. 490–501. doi:
5. Reddy M. M., Deighton M., Gupta R. K., Bhattacharya S. N., Parthasarathy R. Biodegradation of oxo-biodegradable polyethylene. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, vol. 111, is. 3, pp. 1426–1432. doi: 10.1002/app.29073
6. Rizzarelli P., Rapisarda M., Ascione L., Innocenti, F. D., La Mantia F. P. Influence of photo-oxidation on the performance and soil degradation of oxo- and biodegradable polymer-based items for agricultural applications. *Polymer Degradation and Stability*, 2021, vol. 188. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109578
7. Bandonpadyay S., Sintim H. Y., DeBruyn J. M. Effects of biodegradable plastic film mulching on soil microbial communities in two agroecosystems. *PeerJ*, 2020, vol. 8. doi: 10.7717/peerj.9015/supp-1
8. Nannipieri P., Giagnoni L., Renella G., Puglisi E., Ceccanti B., Masciandaro G., Fornasier F., Moscatelli M. C., Marinari S. Soil enzymology: Classical and molecular approaches. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, vol. 48, is. 1, pp. 743–762. doi: 10.1007/s00374-012-0723-0
9. Новоселова Е. И., Турьянова Р. Р., Волкова О. О., Нигматуллина Н. Р., Михайлова Е. И. Активность почвенных ферментов вдоль автомобильной дороги [Soil enzyme activity along a road]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2016, no. № 1-2 (43), pp. 105–107. doi: 10.18454/IRJ.2016.43.126
10. Khosrozadeh S., Guber A., Kravchenko A., Ghaderi N., Blagodatskaya E. Soil oxidoreductase zymography: Visualizing spatial distributions of peroxidase and phenol oxidase activities at the root-soil interface. *Soil Biology and Bio-chemistry*, 2022, vol. 167. doi: 10.1016/j.soilbio.2022.108610
11. Khaziev F. Kh. Metody pochvennoy enzimologii [Methods of soil enzymology]. Moscow: Nauka Publ., 1990. 189 p.
12. Polyak Yu. M., Sukharevich V. I. Pochvennye fermenty i zagryaznenie pochv: biodegradatsiya, bioremediatsiya, bio-indikatsiya [Soil enzymes and soil pollution: biodegradation, bioremediation, bioindication]. *Agrokimiya* [Agrochemistry], 2020 no. 3, pp. 83–93. doi: 10.31857/S0002188120010123

13. Liu S., Huang, K., Yuan, G., Yang, C. Effects of Polyeth-ylene Microplastics and Phenanthrene on Soil Properties, Enzyme Activities and Bacterial Communities. *Processes*, 2022, vol. 10. doi: 10.3390/pr10102128
 14. Karaca A., Cetin S. C., Turgay O. C., Kizilkaya R. *Effects of heavy metals on soil enzyme activities. Soil heavy metals*. Eds: I. Sherameti, A. Varma. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2010, pp. 237–262. doi: 10.1016/j.ecoenv.2008.03.08
 15. Doelman P., Haanstra L. Short-and long-term effects of heavy metals on urease activity in soils. *Biology and Fertility of Soils*, 1986, vol. 2, pp. 213–218. doi: 10.1007/BF00260846
 16. Zheng L., Li Y., Shang W., Dong X., Tang Q., Cheng H. The inhibitory effect of cadmium and/or mercury on soil enzyme activity, basal respiration, and microbial community structure in coal mine-affected agricultural soil. *Annals of Microbiology*, 2019, vol. 69, pp. 849–859. doi: 10.1007/s13213-019-01478-3
 17. Carine F., Enrique A. G., Stéven C. Metal effects on phenol oxidase activities of soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, vol. 72, is. 1, pp. 108–114. doi: 10.1016/j.ecoenv.2008.03.008
 18. Effron D., de la Horra A. M., Defrieri R. L., Fontanive V., Palma R. M. Effect of cadmium, copper, and lead on different enzyme activities in a native forest soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2004, vol. 35, is. 9-10, pp. 1309–1321. doi: 10.1081/CSS-120037548
 19. Aponte H., Meli P., Butler B., Paolini J., Matus F., Merino C., Cornejo P., Kuzyakov Y. Meta-analysis of heavy metal effects on soil enzyme activities. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 737. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139744
 20. Piotrowska-Długosz A., Długosz J., Fraç M., Gryta A., Breza-Boruta B. Enzymatic activity and functional diversity of soil microorganisms along the soil profile – A matter of soil depth and soil-forming processes. *Geoderma*, 2022, vol. 416. doi: 10.1016/j.geoderma.2022.115779
 21. Khaziev F. Kh. *Sistemno-ekologicheskij analiz fermenta-tivnoy aktivnosti pochv* [System-ecological analysis of the enzymatic activity of soils]. Moscow : Nauka PUBL., 1982. 203 p.
 22. Drozdova N. I., Shikhalova A. A. Analiz vliyaniya tyazhelykh metallov na aktivnost' peroksidaz pochv [Analysis of the influence of heavy metals on the activity of soil peroxidases]. *Epokha nauki* [Epoch of Science], 2023, no. 36, pp. 411–418.
-