

УДК 631.421:628.4.043

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-13>

Інна РИБАЛКА

кандидат біологічних наук, доцент кафедри інженерної екології міст та кафедри ландшафтного проектування та садово-паркового мистецтва, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Черноглазівська, 17, м. Харків, Україна, 61002

ORCID: 0000-0001-8225-3041

Scopus Author ID: 56703200700

Ніка ІВАХ

здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Черноглазівська, 17, м. Харків, Україна, 61002

Оксана МЕЛЬНИКОВА

кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Черноглазівська, 17, м. Харків, Україна, 61002

ORCID: 0000-0001-5649-2997

Scopus Author ID: 57190493508

Оксана ЛЕНЕВИЧ

кандидат біологічних наук, молодший науковий співробітник відділу екосистемології, Інститут екології Карпат Національної академії наук України, вул. Козельницька, 4, м. Львів, Україна, 79000; інженер кафедри ґрунтознавства і географії ґрунтів, Львівський національний університет імені Івана Франка, Університетська, 1, м. Львів, Україна, 79000

ORCID: 0000-0003-2258-2569

Юрій ВЕРГЕЛЕС

старший викладач кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Черноглазівська, 17, м. Харків, Україна, 61002

ORCID: 0000-0002-4915-1489

Scopus Author ID: 41262433200

Бібліографічний опис статті: Рибалка, І., Івах, Н., Мельникова, О., Леневиц, О., Вергелес, Ю. (2025). Експериментальне дослідження деградації біоупаковки, паперових і звичайних пластикових пакетів у ґрунті. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2, 102–111, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-13>

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ БІОУПАКОВКИ, ПАПЕРОВИХ І ЗВИЧАЙНИХ ПЛАСТИКОВИХ ПАКЕТІВ У ҐРУНТІ

Збільшення використання пластикових виробів та перехід до одноразової пластмаси призвели до надмірного накопичення пластикового сміття в навколишньому середовищі. Довговічність пластику оцінюється від сотень до тисяч років. За останні два десятиліття запропоновано альтернативу традиційним синтетичним полімерам – біопластик, але питання, пов'язані з його деструкцією, залишаються мало вивченими. **Мета дослідження** – порівняти швидкість деструкції у ґрунті паперових, звичайних одноразових поліетиленових пакетів та пакетів із маркуванням «біорозкладний». **Методологія.** Дослідження проведені на території міста Богодухова (Харківська область) у період із початку липня по кінець листопада 2024 року. Ділянку для відбору ґрунту обрано в саду зі стихійною трав'янистою рослинністю на території одного із приватних домогосподарств. Ґрунт перенесено до 15 прозорих пластикових контейнерів однакового розміру і форми. У п'ять із них було закладено фраг-

менти звичайного одноразового поліетиленового пакета, так само у н'ять – біорозкладного, у три – фрагменти паперового пакета, решта два контейнери лишили просто з ґрунтом (контроль). Усі контейнери витримували в однакових умовах. Аналіз проводили за характеристиками втрати фізичної цілісності пакетів на 36-тий день, 85-тий і 141-ий день від закладення експерименту. Площу ділянок, які піддалися деструкції, визначали з використанням програмного забезпечення ItagJ. **Наукова новизна.** Побудовано лінійну регресійну модель процесу деструкції біоупаковки. **Висновки.** Біорозкладні пакети починають розкладатися швидше, ніж звичайні одноразові поліетиленові пакети, що підтверджено статистично, і ця різниця проявляється щонайменш вже після місяця від початку експерименту. Майже за три місяці експерименту рівень деструкції біоупаковки досягнув 10 %, але повній деструкції, як очікувалось, вони за цей час не піддалися. За майже шість місяців експерименту (тобто термін, вдвічі більший, ніж заявлено виробником) біоупаковка досягнула лише 18 % деструкції. За результатами моделювання оцінено, що для повного руйнування фрагментів біорозкладних пакетів знадобиться близько 2 років за умови стабільності зовнішнього середовища.

Ключові слова: токсичність, звичайні пластикові пакети, біоупаковка, паперові пакети, ґрунтове середовище, деструкція, регресійна модель.

Inna RYBALKA

Candidate of Sciences in Biology, Associate Professor at the Department of Urban Environmental Engineering and Department of Landscape Design, Urban Forestry & Horticulture, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17 Chornoglazivska str., Kharkiv, Ukraine, 61002

ORCID: 0000-0001-8225-3041

Scopus Author ID: 56703200700

Nika IVAKH

Graduate (Master) Student at the Department of Urban Environmental Engineering, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17 Chornoglazivska str., Kharkiv, Ukraine, 61002

Oksana MELNIKOVA

Candidate of Sciences in Environmental Safety, Associate Professor at the Department of Urban Environmental Engineering, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17 Chornoglazivska str., Kharkiv, Ukraine, 61002

ORCID: 0000-0001-5649-2997

Scopus Author ID: 57190493508

Oksana LENEVYCH

Candidate of Sciences in Biology, Junior research fellow at the Division of Ecosystems Science, The Institute of Ecology of the Carpathians of the NAS of Ukraine, 4 Kozelnytska str., Lviv, Ukraine, 79000; Engineer at the Department of Soil Science and Soil Geography, Ivan Franko National University of Lviv, 1 Universytetska str., Lviv, Ukraine, 79000

ORCID: 0000-0003-2258-2569

Yuriy VERGELES

Senior Lecturer at the Department of Urban Environmental Engineering, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17 Chornoglazivska str., Kharkiv, Ukraine, 61002

ORCID: 0000-0002-4915-1489

Scopus Author ID: 41262433200

To cite this article: Rybalka, I., Ivakh, N., Melnikova, O., Lenevych, O., Vergeles, Yu. (2025). Eksperymentalne doslidzhennia dehradatsii bioupakovky, paperovykh i zvychaynykh plastykovykh paketiv u grunti [Experimental study of degradation of bio-based packaging, paper and conventional plastic bags in soil]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 2, 102–111, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-13>

EXPERIMENTAL STUDY OF DEGRADATION OF BIO-BASED PACKAGING, PAPER AND CONVENTIONAL PLASTIC BAGS IN SOIL

The increased use of plastic products and the shift to single-use plastics have led to an excessive accumulation of plastic waste in the environment. The durability of plastic is estimated at hundreds to thousands of years. Over the past two decades, bioplastics have been proposed as an alternative to traditional synthetic polymers, but issues related to their degradation remain poorly studied. **The purpose of this study** is to compare the degradation rates of paper and conventional disposable plastic bags, as well as bags labeled “biodegradable”, in soil. **Research methodology.** The research was done in the city of Bohodukhiv (Kharkiv Oblast) from early July till late November 2024. The site for soil sampling was selected in a garden with spontaneous herbaceous vegetation on the territory of a private household. The soil was transferred to 15 transparent plastic containers of the same size and shape. Five of the containers were filled with fragments of a regular disposable plastic bag, five with biodegradable plastic bags, three with fragments of a paper bag, and the remaining two containers were left with bare soil (control). All containers were kept in the same conditions. The analysis was carried out according to the characteristics of the loss of physical integrity of the bags on the 36th, 85th, and 141st day after the start of the experiment. The surface area of patches that underwent destruction was measured using the *ImagJ* software. **Novelty.** A linear regression model of the process of bio-based packaging degradation was built. **Conclusions.** Biodegradable bags begin to decompose faster than conventional disposable plastic bags, with the difference statistically proven. This difference is evident at least after a month from the start of the experiment. In almost three months of the experiment, the level of bio-based packaging degradation reached 10 %, and they did not undergo complete degradation during this time as expected prior to the experiment. After almost six months of experimentation (i.e., twice as long as the manufacturer claimed), the bio-based packaging reached only 18 % degradation. According to the modeling results, it is estimated that it will take about 2 years for the fragments of biodegradable bags to completely break down, provided the environmental conditions are stable.

Key words: toxicity, conventional disposal plastic bags, biodegradable plastics, paper bags, soil medium, destruction, linear regression.

Актуальність проблеми. Пластик – недорогий, легкий, міцний, довговічний, корозійностійкий матеріал із високими тепло- та електроізоляційними властивостями. Він знайшов своє широке застосування в різних галузях промисловості – від упаковки до виробництва іграшок, від продуктових пакетів до пластикових столових приборів, від соломинок до надрукованих на 3D-принтері ракетних сопел. Використання пластика у багатьох аспектах сприяє досягненню цілей сталого розвитку: так, пластик захищає їжу й допомагає зменшити обсяг утворення харчових відходів, дозволяє створювати легші транспортні засоби та ізолювати електричні кабелі (Thompson et al., 2009; Nielsen et al., 2019; Atiwesh et al., 2021). Як наслідок, світове виробництво пластику за майже 75 років суттєво зросло – із приблизно 2 мільйонів тонн у 1950 році до понад 400 мільйонів тонн у 2022 році (Pilaritiya & Ratnayake, 2024), що становить 200-кратне збільшення. Для виробництва пластмас використовують органічні сполуки. Крім того, звичайні полімери містять добавки, такі як стабілізатори, пігменти та токсичні хімічні компоненти (антипірени, антиоксиданти та спінювачі) (Gilbert, 2017). Попри істотні переваги використання пластику порівняно з іншими матеріалами, його недоліки стають все більш очевидними (Bilo et al.,

2018; Porta, 2021). Величезна кількість пластикових відходів є однією з найбільш актуальних проблем у світі, що становить серйозну загрозу як довкілля, так і для здоров'я людини (Barnes et al., 2008; Bergami et al., 2020; Thushari & Senevirathna, 2020; Porta, 2021; Івах та ін., 2024). Довговічність пластику оцінюється від сотень до тисяч років (Pilaritiya & Ratnayake, 2024; Yan, Cordier & Uehara, 2024). З цієї причини за останні два десятиліття запропоновано альтернативу традиційним синтетичним полімерам на основі нафти. Однією з таких альтернатив є пластик, що біологічно розкладається, або «біопластик», який є полімерами, виготовленими з відновлюваних ресурсів, таких як кукурудза, цукор, картопля, рис тощо (Atiwesh et al., 2021; Bilo et al., 2018).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині частка біопластику на ринку становить ~1 % та має тенденцію до зростання (Lackner, 2015; Thakur et al., 2018). Біорозкладні пластмаси можуть мати властивості, подібні до властивостей нафтохімічних полімерів, а також додаткові переваги завдяки мінімальному впливу на довкілля (Гадаєва & Самойленко, 2024). Біопластик розкладається мікроорганізмами – бактеріями, водоростями та грибами. Його деградація залежить від умов середовища (температура, вода, кисень) і хімічних

властивостей полімеру. Вважають, що за наявності достатньої вологості, кисню і відповідної кількості мікроорганізмів такий процес має спроможність завершитись дуже швидко (за 20–45 днів) (Гадаєва & Самойленко, 2024; Sarasa et al., 2009).

Проте експериментальні дослідження, проведені в Україні, показали, що за три місяці (тобто термін, вдвічі більший, ніж 45 днів) рівень деструкції біоупаковки від різних виробників у ґрунті складав у середньому 28 % в умовах теплиць та у середньому 45 % на присадибній території (Гадаєва & Самойленко, 2024).

Близькі оцінки швидкості розкладання біоупаковки наводять й інші автори (Sarasa et al., 2009; Gilbert, 2017) Отже, вивчення швидкості розкладання біоупаковки у ґрунті є актуальною науково-практичною задачею.

Мета дослідження – порівняти швидкість деструкції у ґрунті паперових, звичайних одноразових поліетиленових пакетів та пакетів із маркуванням «біорозкладний».

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження проведені на території міста Богодухова Харківської області у період із початку липня по кінець листопада 2024 року. Місто Богодухів є адміністративним центром Богодухівського району, розташоване на обох берегах річки Мерло в Лісостеповій зоні. Рельєф території переважно є рівнинним слабохвилястим. Ґрунтове різноманіття представлене чорноземами звичайними, типовими, реградованими, вилуженими та опідзоленими ґрунтами. Клімат помірно-континентальний. У середньому за рік спостерігається приблизно 160 днів з опадами, причому в холодний період їх кількість зазвичай більша. Вихідний тип ґрунту, з яким ми працювали, – чорноземи реградовані.

Ділянку для відбору ґрунту обрано в саду зі стихійною трав'янистою рослинністю на території одного із приватних домоволодінь. Індивідуальні зразки ґрунту для формування середньої проби змішаних зразків відбирали по діагоналях уявного квадрата. Прикопки робили із зони ризосфери рослин, при цьому рослинний відпад й верхній шар ґрунту (декілька сантиметрів) було знято. Відібраний ґрунт було ретельно перемішано в емальованій металевій ємності.

Далі його переносили до 15 прозорих пластикових контейнерів однакового розміру

і форми. Спочатку всі контейнери заповнили ґрунтом тільки на половину. Після цього до 13-ти із них заклали фрагменти пакетів розміром 9 × 9 см. Для цього ми заздалегідь підготували 5 фрагментів звичайного одноразового поліетиленового пакета, так само 5 фрагментів пакета з маркуванням «біорозкладний», а також 3 фрагменти паперового пакета. З доступних на ринку звичайних одноразових поліетиленових пакетів і біорозкладних ми обирали пакети для тестування так, щоб їхні фрагменти розміром 9 × 9 см мали максимально близьку масу. Розмір фрагментів також не був обраний випадково. Він дозволяв фрагменту вільно поміщатися у контейнері і не мати заломів.

Для забезпечення рівномірної фільтрації води через ґрунтову товщу при поливі, у фрагментах звичайного одноразового поліетиленового пакета і фрагментах біорозкладного полімерного пакета ми зробили чотири тонких отвори голкою. Вони знаходились по центру фрагмента розміром 9 × 9 см і формували квадрат розміром 3 × 3 см.

Коли всі 13 фрагментів пакетів були акуратно розміщені на поверхні ґрунту, положення кожного із них зафіксували перманентним маркером на стінці контейнера. В двох контейнерах, які лишилися без фрагментів пакетів, ми так само зробили позначки перманентним маркером (це дозволяло нам у ході експерименту відбирати ґрунт для лабораторного аналізу з однакової глибини).

На цьому етапі роботи кожен із контейнерів також отримав свій унікальний номер. Контейнери, в яких знаходилися фрагменти звичайного одноразового пакета, отримали номери «З-1», «З-2», ..., «З-5». Контейнери, в яких знаходилися фрагменти пакета з маркуванням «біорозкладний», отримали номери «Б-1», «Б-2», ..., «Б-5». Нарешті контейнери, в яких знаходилися фрагменти паперового пакета, отримали номери «П-1», «П-2», «П-3». Після цього всі 13 контейнерів досипали ґрунтом. Від краю ємності ми залишили 1 см заглиблення для поливу.

Як зазначено вище, два контейнери містили тільки ґрунт (контроль). В одному із них ми не перешкоджали спонтанному проростанню рослин із наявного банку насіння (він отримав номер «К+Р»), а в іншому всі паростки систематично видаляли (він отримав номер «К»).

Усі 15 контейнерів витримували в однакових умовах (температура, відносна вологість повітря, освітленість), які систематично контролювали. Періодично, коли ґрунт у контейнерах висихав, його поливали однаковою кількістю води. При появі стихійної рослинності у всіх контейнерах, крім одного, всі рослини видаляли. З початку жовтня в приміщенні, де знаходяться контейнери, увімкнули автономне опалення. Температура в приміщенні була стабільною і трималася на рівні 20 °С.

В ході експерименту, спочатку на 36-тий день (тобто приблизно через місяць після закладення експерименту), потім на 85-тий (приблизно через 3 місяці після закладення експерименту) і, нарешті, на 141-ий (майже через 6 місяців після закладення експерименту) у всіх контейнерах верхній шар ґрунту акуратно знімали. Ґрунт безпосередньо у зоні контакту з закладеними фрагментами відбирали для лабораторного аналізу, а самі фрагменти уважно вивчали на предмет розкладання. У даній роботі ми зосередили увагу власне на процесі біодеструкції.

Під час вивчення деструкції фрагментів звичайного одноразового поліетиленового пакета і пакета з маркуванням «біорозкладний» у серпні й жовтні 2024 р. ми діставали зразки з контейнерів. З кожного із них обережно знімали залишки ґрунту. Зразок виклали на аркуш білого паперу і фотографували за допомогою цифрової камери. Після цього

досліджувані фрагменти знову повертали до відповідних контейнерів і засипали ґрунтом, а отримані фотознімки опрацьовували за допомогою комп'ютерних програм. Натомість під час вивчення деструкції фрагментів біопакетів у кінці листопада, коли деякі зразки піддалися деструкції значно сильніше, ніж інші, така маніпуляція могла спричинити порушення їх цілісності, тому всі зразки залишили у контейнерах і фотографували безпосередньо на поверхні ґрунту.

Площу ділянок, які піддалися деструкції, визначали з використанням програмного забезпечення *ImagJ*. Ця програма працює з високою точністю, проте вона є досить чутливою до розмаїття кольорів на знімках, що вимагає певної попередньої обробки зображень. Крім того, в міру збільшення рівня деструкції фрагментів пакетів, робота в цій програмі ставала все більше кропіткою і вимагала посиленої уваги.

В нашому дослідженні для налаштування яскравості фотознімків на підготовчому етапі роботи використано графічний редактор *Microsoft Office 2010*. Для мінімізації розмаїття кольорів на знімках використано програму *CorelDRAW v.16*, що дозволяла не тільки оцифрувати деякі області, які піддалися деструкції, а, що найголовніше, провести реконструкцію контурів фрагментів пакетів. Без цих двох маніпуляцій робота у програмі *ImagJ v.6* не завжди була ефективною. Найскладніше в обох

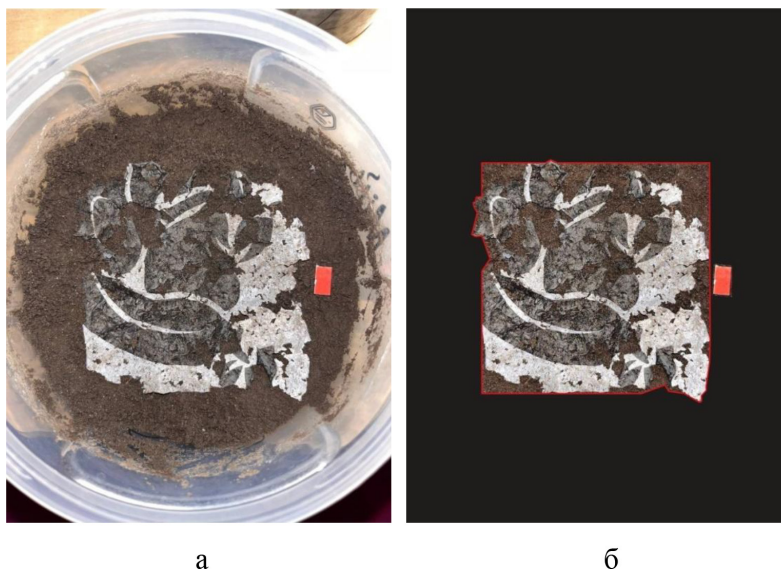


Рис. 1. Зовнішній вигляд фрагмента біорозкладного полімерного пакета (зразок № 3) майже через шість місяців після закладення експерименту та результати реконструкції його форми у програмі *CorelDRAW v.16*: а – вихідне зображення, б – після обробки

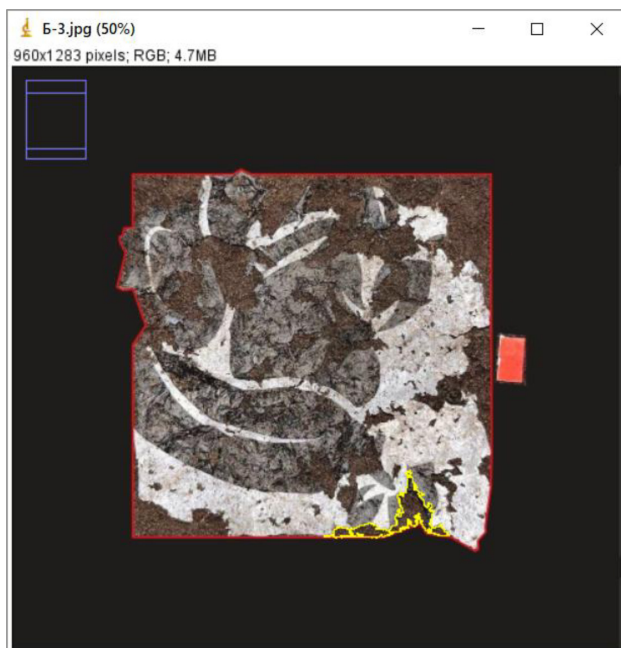


Рис. 2. Робота з фрагментом біорозкладного полімерного пакета (зразок № 3) майже через шість місяців після закладення експерименту: вимірювання площі ділянки, яка піддалася деструкції у ґрунтовому середовищі, за допомогою програми *ImagJ v.6* (довжина смужки праворуч становить 1 см)

програмах було працювати з фрагментом біоупаковки, на якому був нанесений виробником малюнок чорного кольору (зразок № 3), особливо у кінці експерименту, коли ми вимушені були лишити його на поверхні ґрунту (рис. 1, 2).

Статистичний аналіз зібраних даних передбачав розрахунок базових статистик, тестування вихідних даних на нормальність розподілу, порівняння вибірок, визначення взаємозв'язку між вибірками, а також розробку математичної моделі та прогнозування.

Перевірку достовірності середнього арифметичного здійснювали з використанням критерію Стьюдента. Тест на нормальність передбачав розрахунок відношення розмаху мінливості до середнього квадратичного відхилення. Для порівняння вибірок застосовували непараметричний критерій Манна-Уїтні (U). Ми вдавалися до методів непараметричної статистики, оскільки під час визначення рівнів деструкції фрагментів звичайних одноразових поліетиленових пакетів виявилось, що будь-яка мінливість досліджуваної ознаки відсутня.

Для визначення взаємозв'язку між досліджуваними ознаками – середній рівень деструкції фрагментів біорозкладного пакета та день від

початку експерименту, з урахуванням об'єму вибірок ($n_1 = n_2 = 4$), розраховували z -показник Фішера (Mac Berthouex & Brown, 2002). Для розробки математичної моделі проведено повний регресійний аналіз за методикою, що наведена в методичних рекомендаціях (Бараннік, 2007).

За час проведення експерименту звичайні пакети зовсім не піддалися деструкції і зберегли 100 % від своєї вихідної площі (рис. 3). Паперові пакети розклалися майже за місяць, як ми і очікували на початку експеримента (рис. 4). Біорозкладні пакети через місяць після закладення експерименту тільки почали розкладатися ($97,6 \pm 0,7$ % від вихідної площі). Середнє арифметичне є достовірним із високим рівнем надійності: $t = 146,1$, що значно перевищує $t_{st} = 8,6$, $k = 4$, $P < 0,001$. Деякі базові статистики для вибірки, що ми розглядаємо, становили: мінімум – 96,1 %, максимум – 99,3 %, розмах варіації – 3,2 %, середнє квадратичне відхилення і коефіцієнт варіації співпадають, обидва становлять $1,5 \pm 0,5$ % (міра варіювання ознаки низька). Найбільшій деструкції піддався зразок № 2, найменшій – № 5.

Майже через три місяці фрагменти біорозкладного пакета зберегли $89,6 \pm 2,8$ % від вихідної площі, але повній деструкції, як очікувалось на початку експеримента, вони за цей час не піддалися. Середнє арифметичне є достовірним: $t = 32,5$, що так само значно перевищує



Рис. 3. Зразок звичайного пакета № 1 на час закінчення експерименту (кінець листопада 2024 р.)



Рис. 4. Фрагменти зразка № 2 паперового пакета у контейнері (спостерігаються лише поодинокі фрагменти)

$t_{st} = 8,6, k = 4, P < 0,001$. Деякі базові статистики для вибірки, що ми розглядаємо, становили: мінімум – 79,4 %, максимум – 94,6 %, розмах

варіації – 15,2 %, середнє квадратичне відхилення – $6,2 \pm 1,9$ % (не високе), коефіцієнт варіації – $6,9 \pm 2,4$ % (міра варіювання ознаки низька). Найбільшій деструкції піддався зразок № 3, найменшій – № 4.

Нарешті майже за шість місяців експерименту (тобто термін, вдвічі більший, ніж заявляють виробники) біорозкладні пакети зберегли $82,5 \pm 5,1$ % від вихідної площі. Середнє арифметичне є достовірним: $t = 16,2$, що вдвічі перевищує $t_{st} = 8,6, k = 4, P < 0,001$. Деякі базові статистики для вибірки, що ми розглядаємо, становили: мінімум – 62,8 %, максимум – 91,4 %, розмах варіації – 28,6 %, середнє квадратичне відхилення – $11,4 \pm 3,6$ % (не високе), коефіцієнт варіації – $13,8 \pm 5,0$ % (міра варіювання ознаки середня). Найбільшій деструкції піддався зразок № 3 (рис. 5), найменшій – № 5 (рис. 6).

Статистично різниця між рівнем деструкції біорозкладних пакетів та звичайних

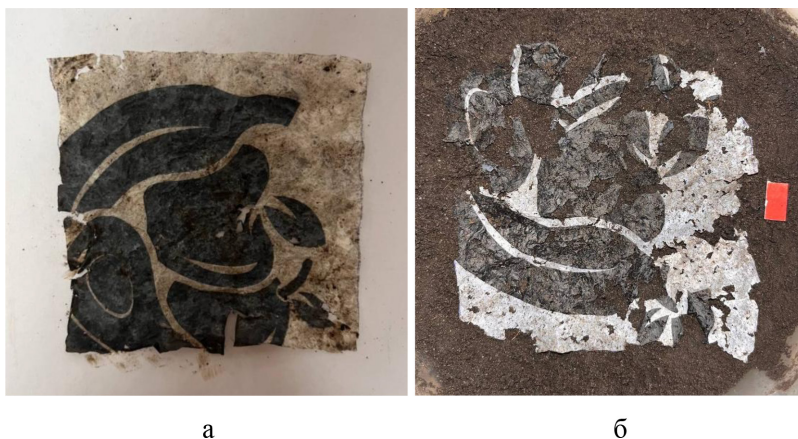


Рис. 5. Зразок біорозкладного пакета № 3:

а – через місяць після закладення експерименту; б – майже через шість місяців після закладення експерименту (з усіх зразків найбільше піддався деструкції)

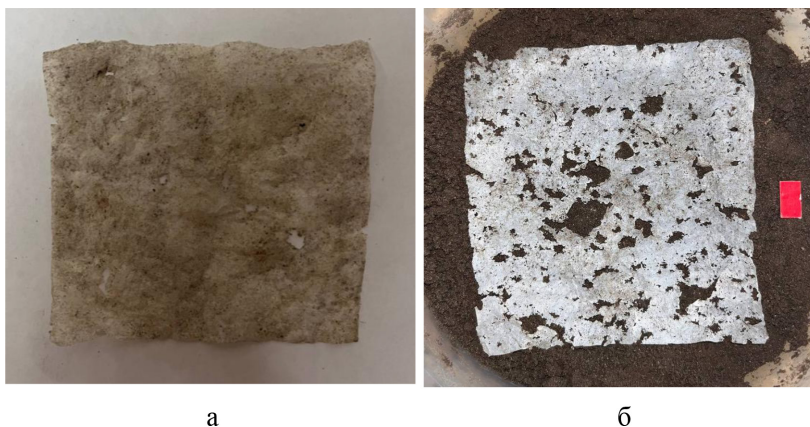


Рис. 6. Зразок біорозкладного пакета № 5:

а – через місяць після закладення експерименту; б – майже через шість місяців після закладення експерименту (з усіх зразків найменше піддався деструкції)

одноразових поліетиленових пакетів є достовірною. Попарне порівняння 2 вибірок через місяць після закладення експерименту з використанням методів непараметричної статистики дозволили відхилити «нульову» гіпотезу з високим рівнем надійності: критерій Манна-Уїтні $U_\phi = 0 < U_{st} = 1$; $n_1 = 5$, $n_2 = 5$, $P < 0,01$. Аналогічні результати ми отримали на 85-й і 141-й день від початку експерименту.

Наступним кроком, за допомогою програмних засобів *MS Excel 2010* ми побудували точковий графік розсіювання результатів вимірювання, на якому по осі ординат було відображено середній рівень деструкції фрагментів біоупаковки, а по осі абсцис – день від початку експерименту, коли проводили вимірювання. Розподіл точок на графіковій настановив нас на припущення про наявність тісного взаємозв'язку між досліджуваними ознаками.

За допомогою кореляційного аналізу на рівні значущості $P < 0,01$ ми виявили тісний від'ємний взаємозв'язок між середньою величиною рівня деструкції фрагментів біоупаковки і тривалістю експерименту. Вибірковий коефіцієнт кореляції Пірсона (без поправки): $-0,99$, з поправкою $-1,00$, z -показник Фішера $-5,11$. Результати перевірки z -показника Фішера на достовірність: $t_z = 5,11$, що перевищує стандартну величину $t_{st} = 4,30$, $k = 2$, $P < 0,05$. Перевірка вихідних даних на нормальність, яка передувала кореляційному аналізу, дала позитивний результат

(для даних, які відображають середній рівень деструкції, – «середня надійність» тесту, для даних, які відображають день від початку експерименту, – «висока надійність» тесту). Це дозволило нам використати методи параметричної статистики під час аналізу зібраних експериментальних даних.

Ми припустили, що процес деструкції біоупаковки у ґрунтовому середовищі можна описати за допомогою рівняння лінійної регресії. На основі повного регресійного аналізу ця гіпотеза була стверджена. Результати повного регресійного аналізу, що відображає динаміку розкладання біорозкладних пакетів, представлено на рис. 7. Розсіювання залишків регресії вказувало про їх незалежність одне від одного. Всі розрахунки та побудову графіка здійснено засобами *MS Excel 2010*.

Процес деструкції біоупаковки (y) описано лінійною регресією:

$$y = -0,1301x + 100,9904, \quad (1)$$

де x – день від початку розкладання біоупаковки у ґрунті.

Коефіцієнт детермінації регресійного рівняння $R^2 = 0,9861$. Порівняння з розподілом Фішера показує, що регресія має місце: $F_\phi = 141,88$ (при $F_{st} = 98,50$, $P < 0,01$).

Прогноз показує, що для повної деструкції біорозкладних пакетів знадобиться щонайменше 2 роки (за умови стабільності

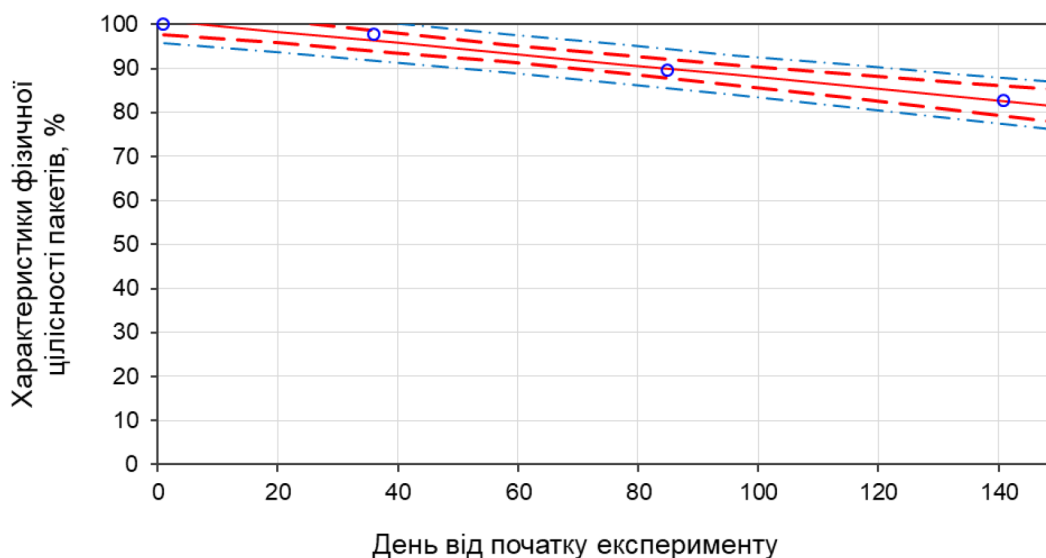


Рис. 7. Результати повного регресійного аналізу:
 лінія регресії (суцільна) і довірча область лінійної регресії як функція s_{yx}
 і критичні значення t -розподілу (пунктирні лінії: $P = 0,05$, тобто 95 %-й рівень довіри;
 штрихпунктирні лінії: $P = 0,01$, тобто 99 %-й рівень довіри)

зовнішніх умов). Так, за рік (365 днів) рівень їхньої деструкції міг би досягнути 54 %, за півтора роки (548 днів) – 30 %, за два роки (730 днів) – 6 %.

У природних умовах, з чітко вираженими холодним і теплим сезонами, а також в умовах дефіциту вологи влітку цей процес триватиме ще довше.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Біорозкладні пакети починають розкладатися швидше, ніж звичайні, що підтверджено статистично, і ця різниця проявляється щонайменш вже після місяця від початку експерименту в умовах вегетаційного сезону в зоні помірного клімату. Майже за три місяці експерименту рівень деструкції зразків біоупаковки досягнув 10 %, але повній деструкції, як очікувалось, вони за цей час не піддалися.

За майже шість місяців експерименту (тобто термін, вдвічі більший, ніж традиційно заявляють виробники) біоупаковка досягнула 18 % деструкції. Процес деструкції біоупаковки описано лінійною регресією. Моделювання показує, що для повного руйнування фрагментів біорозкладних пакетів знадобиться щонайменше 2 роки (за умови стабільності зовнішніх умов).

Треба також зауважити, що режим внесення води до контейнерів під час проведеного нами експерименту можна було синхронізувати з актуальними погодно-кліматичними умовами, тобто поливати контейнери тільки в ті дні, коли відбувалися опади. Це забезпечило б максимальну наближеність нашого експерименту до реальних умов ґрунтового середовища, в яких відбувається деструкція полімерів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Бараннік В. О. Методичні вказівки до виконання курсової роботи «Розробка лінійної регресійної моделі впливу скиду стічних вод підприємства на якість річкової води в контрольному створі» з дисципліни «Моделювання і прогнозування стану довкілля». Харків : Харківська національна академія міського господарства, 2007. 20 с.
2. Гадасва Ю. С., Самойленко Н. М. Дослідження біорозкладання одноразового пакування. *Екологічні науки*. 2024. № 3(54). С. 139–143.
3. Івах Н. А., Рибалка І. О., Мельнікова О. Г., Вергелес Ю. І., Леневиц О. І. Біорозкладані матеріали для пакетів як альтернатива звичайним пластиковим пакетам. *Science in the modern world: innovations and challenges: III міжнар. науково-практ. конф.*, м. Торонто, 21 лист. 2024 р. 2024. С. 270–275.
4. Atiwesh G., Mikhael A., Parrish C.C., Banoub J., Le T-A.T. (2021). Environmental impact of bioplastic use: A review. *Heliyon*. 2021. Vol. 7. № 9. e07918.
5. Barnes D. K. A., Galgani F., Thompson R. C., Barlaz M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of The Royal Society B. Biological Sciences*. 2008. Vol. 364, P. 1985–1998.
6. Bergami E., Rota E., Caruso T., Birarda G., Vaccari L., Corsi I. Plastics everywhere: first evidence of polystyrene fragments inside the common Antarctic collembolan *Cryptopygus antarcticus*. *Biology Letters*. 2020. Vol. 16. № 6. 0093.
7. Bilo F., Pandini S., Sartore L., Depero L.E., Garguilo G., Bonassi A., Federici S., Bontempi E. A sustainable bioplastic obtained from rice straw. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 200. P. 357–368.
8. Gilbert M. Chapter 1 – Plastics Materials: Introduction and Historical Development. *Brydson's Plastic Materials*. 8th ed. / Gilbert M., ed. 2017. P. 1–18.
9. Lackner M. Bioplastics. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. 2015.
10. Mac Berthouex P., Brown L.C. Statistics for Environmental Engineers. 2nd ed. Boca Raton, 2002. 456 p.
11. Nielsen T. D., Hasselbalch J., Holmberg K., Stripple J. Politics and the plastic crisis: A review throughout the plastic life cycle. *WIREs Energy and Environment*. 2019. Vol. 9. № 1. e360.
12. Pilapitiya P. G. C. N. T., Ratnayake A. S. The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials*. 2024. Vol. 11. 100220.
13. Porta R. Anthropocene, the plastic age and future perspectives. *FEBS OpenBio*. 2021. Vol. 11. № 4. P. 948–953.
14. Sarasa J., Gracia J.M., Javierre C. Study of the biodisintegration of a bioplastic material waste. *Bioresource Technology*. 2009. Vol. 100. № 15. P. 3764–3768.
15. Thakur S., Chaudhary J., Sharma B., Verma A., Tamulevicius S., Thakur V. K. Sustainability of bioplastics: Opportunities and challenges. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2018. Vol. 13. P. 68–75.
16. Thompson R. C., Moore C. J., vom Saal F. S., Swan S. H. Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. *Philosophical Transactions of The Royal Society B. Biological Sciences*. 2009. Vol. 364. P. 2153–2166.
17. Thushari G. G. N., Senevirathna J. D. M. Plastic pollution in the marine environment. *Heliyon*. 2020. Vol. 6. № 8. e04709.

18. Yan H., Cordier M., Uehara T. Future Projections of Global *Plastic Pollution: Scenario Analyses and Policy Implications. Sustainability*. 2024. Vol. 16. № 2. 643.

REFERENCES:

1. Barannik, V. O. (2007). Metodichni vказivky do vykonannya kursovoyi roboty “Rozrobka liniynoyi regresiynoyi modeli vplyvu skydu stichnykh vod pidpriemstva na yakist’ richkovoyi vody v kontrol’nomu stvori” z dystsypliny “Modeliuvannya I prognozuvannya stanu dovkillia [Guidelines for the course work “Development of a linear regression model of the impact of enterprise wastewater discharge on river water quality in the control sampling point” on the learning discipline “Environmental Modeling and Forecasting”]. Kharkiv, National Academy of Municipal Economy, 20 p. [in Ukrainian].
2. Hadaieva, Yu., & Samoilenko, N. (2024). Doslidzhennia biorozkladannia odnorazovoho pakuvannia [Research on biodegradation of disposable packaging]. *Ekologichni Nauky. – Environmental Sciences*, 3(54), 139–143. [in Ukrainian].
3. Ivakh, N. A., Rybalka, I. O., Melnikova, O. G., Vergeles, Yu. I., & Lenevych, O. I. (2004). Biorozkladani materialy dlia paketiv yak al’ternatyva zvychaynym plastykovym paketam [Biodegradable packaging materials as an alternative to conventional plastic ones]. *Science in the modern world: innovations and challenges: III International Scientific Conference*, Toronto, 21 November 2024, 270–275. [in Ukrainian].
4. Atiwesh, G., Mikhael, A., Parrish, C.C., Banoub, J., & Le, T-A.T. (2021). Environmental impact of bioplastic use: A review. *Heliyon*, 7(9), e07918.
5. Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2008). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of The Royal Society B. Biological Sciences*, 364, 1985–1998.
6. Bergami, E., Rota, E., Caruso, T., Birarda, G., Vaccari, L., & Corsi, I. (2020). Plastics everywhere: first evidence of polystyrene fragments inside the common Antarctic collembolan *Cryptopygus antarcticus*. *Biology Letters*, 16(6), 0093.
7. Bilo, F., Pandini, S., Sartore, L., Depero, L.E., Garguilo, G., Bonassi, A., Federici, S., & Bontempi, E. (2018). A sustainable bioplastic obtained from rice straw. *Journal of Cleaner Production*, 200, 357–368.
8. Gilbert, M. (2017). Chapter 1 – Plastics Materials: Introduction and Historical Development. In: Gilbert, M., ed. *Brydson’s Plastic Materials*, 8th ed., 1–18.
9. Lackner, M. (2015). Bioplastics. In: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, John Wiley & Sons.
10. Mac Berthouex P., & Brown L.C. (2002). *Statistics for Environmental Engineers*. 2nd ed. Boca Raton, Lewis Publishers, A CBC Press Group. 456 p.
11. Nielsen, T. D., Hasselbalch, J., Holmberg, K., & Stripple, J. (2019). Politics and the plastic crisis: A review throughout the plastic life cycle. *WIREs Energy and Environment*, 9(1), e360.
12. Pilapitiya, P. G. C. N. T., & Ratnayake, A. S. (2024). The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials*, 11, 100220.
13. Porta, R. (2021). Anthropocene, the plastic age and future perspectives. *FEBS OpenBio*, 11(4), 948–953.
14. Sarasa, J., Gracia, J.M., & Javierre, C. (2009). Study of the biodegradation of a bioplastic material waste. *Bioresource Technology*, 100(15), 3764–3768.
15. Thakur, S., Chaudhary, J., Sharma, B., Verma, A., Tamulevicius, S., & Thakur, V.K. (2018). Sustainability of bioplastics: Opportunities and challenges. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 13, 68–75.
16. Thompson, R. C., Moore, C. J., vom Saal, F. S., & Swan, S. H. (2009). Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. *Philosophical Transactions of The Royal Society B. Biological Sciences*, 364, 2153–2166.
17. Thushari, G. G. N., & Senevirathna, J. D. M. (2020). Plastic pollution in the marine environment. *Heliyon*, 6(8), e04709.
18. Yan, H., Cordier, M., & Uehara, T. (2024). Future Projections of Global *Plastic Pollution: Scenario Analyses and Policy Implications. Sustainability*, 16(2), 643.