

ДОСЛІДЖЕННЯ БІОРОЗКЛАДАННЯ ОДНОРАЗОВОГО ПАКУВАННЯ

Гадаєва Ю.С., Самойленко Н.М.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків

yuliia.hadaieva@mit.khpi.edu.ua, nataliia.samoilenko@khpi.edu.ua

В роботі досліджується розкладність поліетиленових пакетів з маркуванням «біорозкладаний» різних виробників, що використовуються у торговельних мережах. Для дослідження використовувались пакети на основі поліефірів і полісахаридних наповнювачів, таких як PBAT і PLA, що мали логотип «compost HOME», який вказує на придатність для розкладання у компостних ямах. Аналіз проводився за характеристиками втрати маси та фізичної цілісності пакетів, які пройшли розкладання, що слугувало загальною оцінкою їх здатності до розкладання. Термін дослідження становив 3 місяці.

Проведені в умовах теплиць та присадибних територій дослідження показали, що біорозкладні пакети мають досить високий рівень біодеградації у різному ґрунті та відмінних умовах проведення тестування. Втрати маси пакетів на протязі 3 місяців випробувань в умовах теплиць відповідали 23% для складу PBAT+ PLA та 32% для складу PBAT + PLA, кукурудзяний крохмаль в умовах теплиць, і відповідно 35% і 55% – на присадибних територіях. Встановлено, що процес деградації пакетів не впливає на квіткові рослини для ґрунту, багатого на поживні речовини, а також трав'яного покриву чорнозему місць озеленення. Поліетиленовий пакет низького тиску високої щільності (HDPE) зі вторинного матеріалу, що використовувався для порівняння результатів дослідження, як і очікувалось, не зазнав помітних змін та ознак біологічного руйнування.

Результати досліджень дозволяють оцінити швидкість та ефективність деградації біорозкладних полімерних матеріалів в умовах знаходження у ґрунті присадибних ділянок, спрогнозувати наслідки надходження у нього мікропластику, що утворюється при біодеградації пакетів, та визначити можливість розкладання пакетів у ґрунті місць озеленення, що є доцільним при неможливості влаштувати у домогосподарствах компостної ями. Також показано, що внесення у багатого на поживні речовини ґрунту незначної кількості біорозкладного полімеру не впливає на ріст кімнатних рослин в умовах теплиць. *Ключові слова:* біорозкладні полімери, виробники пакетів, біодеградація, мікропластик, теплиці, присадибні ділянки, рослинність

Research on biodegradation of disposable packaging. Hadaieva Yu., Samoilenko N.

The paper investigates the biodegradability of plastic bags labelled «biodegradable» by different manufacturers used in trade networks. The bags used for the experiment were those based on polyesters and polysaccharide fillers, such as PBAT and PLA, which had the «compost HOME» logo, indicating their suitability for decomposition in compost pits. The analysis was based on the weight loss and physical integrity of the decomposed bags, which provided an overall assessment of their decomposability. The duration of the experiment was 3 months.

Research carried out in greenhouses and households has shown that biodegradable bags have a fairly high level of biodegradation in different soil and different testing conditions. The weight loss of the bags during 3 months of testing in a greenhouse corresponded to 23% for the PBAT+ PLA composition and 32% for the PBAT+ PLA composition, corn starch in a greenhouse, and 35% and 55%, respectively, in households. It was found that the degradation process of the bags does not affect flower plants for nutrient-rich soil and grass cover of black soil in landscaping areas. The low-pressure, high-density polyethylene (HDPE) bag made of recycled material used to compare the results of the experiment, as expected, did not show any noticeable changes or indications of biological degradation.

The results of the research allows to evaluate the rate and efficiency of degradation of biodegradable polymeric materials in the soil of household plots, predict the consequences of microplastics generated during the biodegradation of the bags, and determine the possibility of decomposition of the bags in the soil of landscaping areas, which is advisable if households cannot arrange a compost pit. It has also been shown that the introduction of a small amount of biodegradable polymer into nutrient-rich soil does not affect the growth of indoor plants in a greenhouse. *Key words:* biodegradable polymers, bag manufacturers, biodegradation, microplastic, greenhouses, household plots, vegetation.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. З кожним роком обсяги відходів пакування невпинно збільшуються, здійснюючи негативний вплив на довкілля та поглинаючи велику кількість ресурсів. Рівень перероблення не встигає за зростанням і, наприклад, в Європі щорічні обсяги відходів досягли 84 млн т [1].

Поліетиленові пакети, що не піддаються біологічному розкладанню, наразі є одним з найбільш поширених видів одноразового пластику, який здійснює значний негативний вплив на довкілля і потребує виведення з обігу.

Одним із рішень даної проблеми є заміна нерозкладаних матеріалів на біорозкладні, тому вже у теперішній час на біопластик припадає близько

1% від загального обсягу виробництва пластмас у світі.

Використання біорозкладних матеріалів особливо актуально для одноразових виробів, таких як упаковка. На сьогодні біопластики найбільше застосовуються у сфері харчування у якості тари та упаковки продуктів харчування та починають набувати значного розповсюдження у торгівельній мережі.

Ефективність біодеградації даних полімерів залежить від багатьох чинників, включаючи кліматичні умови, властивості ґрунту, тип біополімеру та певним чином пов'язується з виробником продукції. Тому важливою науково-практичною задачею є вивчення розкладання біопластикових пакетів в умовах, що впливають на процес біодеструкції та розширення способів її використання.

Актуальність. Біорозкладні пластмаси можуть мати властивості, подібні до властивостей традиційних пластмас, а також додаткові переваги завдяки мінімальному впливу на довкілля. Біодеградабельні полімери можуть розкладатись до вуглекислого газу, води, метану та інших низькомолекулярних сполук. За наявності достатньої вологості, кисню і відповідної кількості мікроорганізмів такий процес має спроможність завершитись дуже швидко (за 20–45 днів) [2]. Даний факт може сприяти використанню однієї і тієї ж площі ґрунту для періодичної переробки біодеградабельного матеріалу.

Характерним чинником біодеградації пластичних мас є хімічний склад молекулярного ланцюга, який різниться у матеріалах виробників біорозкладних пакетів. Водночас деструкція полімеру включає процеси поглинання тепла і світла, дифузії компонентів середовища, обростання мікроорганізмами, ферменти яких сприяють розірванню хімічних зв'язків у макромолекулах [3]. Тому доцільними є дослідження деструкції пакетів різних виробників, що враховують знаходження біопластиків в різних умовах, які створює навколишнє середовище. Крім того, слід брати до уваги, що у воєнний період на території України можуть мати місце складні ситуації щодо обмеження вивезення сміття, тимчасового складування та ін. Зважаючи на це, становить інтерес утилізація біорозкладної упаковки у ґрунті домогосподарств як певний спосіб переробки пакетів при неможливості провести їх біодеградацію у компостних ямах.

Зв'язок авторського доробку із важливими та практичними завданнями. Незважаючи на прийняття Закону України «Про обмеження обігу пластикових пакетів на території України» у 2021 році [4], проблема переробки пластикових відходів залишається актуальною. В якості альтернативи традиційним полімерам виробники пакетів пакування почали активно використовувати біорозкладні полімери. На ринку з'являється все більше товарів, що відносяться до біорозкладного маркування, що свідчить про зростаючий попит на екологічні вироби

у сфері одноразового пакування. Водночас виникає проблема переробки біорозкладних пакетів, які в Україні через відсутність налагодженої системи сортування сміття не можуть бути використані для централізованого компостування. Зважаючи на це, нагальним є пошук доступних шляхів переробки пакетів, які можуть бути здійснені самими власниками використаної тари. У даному напрямку важливим аспектом є визначення термінів біодеградації пакетів, які залежать від багатьох чинників і потребують дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання біорозкладання полімерів вже давно знаходиться в центрі уваги дослідників. Здатність до біологічного розкладання досліджувалась за допомогою різних тестів на біорозпад трьох полімерних пакетів. Дослідники [5] оцінювали здатність біорозкладного пластику (BDP), виготовленого з крохмалю, полімолочної кислоти (PLA) і полібутиленадипатутерефталату (PBAT), в різних ґрунтах у системі microcosm протягом 360 днів. Було проаналізовано тимчасову динаміку асоційованих бактеріальних спільнот у відмінних ґрунтових нішах. Втрати маси у різних ґрунтах через 360 днів досягала від $42,0 \pm 1,2\%$ до $48,0 \pm 2,2\%$. Розкладання BDP у різних ґрунтах відбувалося за однією схемою. На першому етапі (0-30-й день) у BDP спостерігалася значна втрата ваги (35,8-41,9%), що збіглося з різким збільшенням вмісту розчиненого в ґрунті органічного вуглецю (в 1,53–2,25 рази порівняно з контрольною ґрунтом) і формуванням виразних бактеріальних спільнот в поверхневому пластиковому ґрунті.

Також дослідники [6] протягом 6 місяців в лабораторних умовах проводили тест на загопування в ґрунті біодеградабельної плівки і відстежували втрату її ваги, хімічні зміни і мікробіологічну активність ґрунту. Втрати ваги була найшвидшою для полігідроксibuтиратної плівки, за нею слідували картопляний термопластичний крохмаль-співполієфір і зернове борошно-співполієфір. Встановлено, що для розпаду термопластичного складного ефіру кукурудзяного крохмалю і полімолочної кислоти потрібно 5–6 місяців.

Інші автори [7] досліджували біодеградацію мультислойної плівки з лінійного поліетилену низької щільності (LLDPE) товщиною 20 мкм, що містить 2,5% комерційного проокислювача. За результатами було виявлено, що після ультрафіолетового опромінення відбувається фізична деградація плівки до дрібних мікрочастинок та без участі мікроорганізмів.

Слід зазначити, що на ринку України спостерігається зростання кількості виробників біопакування, які пропонують різноманітні матеріали з властивостями біорозкладання. Виробники акцентують увагу на придатності їхніх біопакетів для домашнього компостування [8, 9].

Наукові спостереження виявили, що деградація поліетиленових пакетів у ґрунті відбувається

повільно через їх стійкість до мікробного розкладання та впливу абіотичних факторів. Крім того, ґрунти та полігони твердих побутових відходів зазвичай не забезпечують оптимальних умов, таких як температура, мінеральна середа, вологість, рівень кисню і рН [10], необхідних для ефективної деструкції поліетилену та пластмас. Водночас, науковцями доведено, що матеріали на основі поліетилену можуть ставати біорозкладними при додаванні великої кількості біорозкладних наповнювачів [11]. Деякі біорозкладні пластмаси будуть фрагментуватися і повільно накопичуватися у навколишньому середовищі у вигляді мікропластику [12]. Саме на утворенні мікропластику – частинках полімеру розміром менше 5 мм в останній час дослідники і акцентують увагу. Мікропластик був виявлений у всіх матрицях навколишнього середовища: водному середовищі, розсіяний по всій товщі води, наземному середовищі, з проникненням в ґрунт, і в повітрі. У кожній з цих матриць мікропластик слугує транспортом для небезпечних забруднюючих сполук, таких як важкі метали, поліциклічні ароматичні вуглеводні та хлорорганічні пестициди. Крім того, мікропластик виявлено в організмі тварин і людей [13].

Наявність пластикових фрагментів у ґрунті має двояку характеристику. Пластикові фрагменти мають сильний негативний вплив на вміст води в ґрунті в умовах низької водності. Збільшення ж концентрації пластику позитивно впливало на ріст рослин, що може бути пов'язано зі збільшенням кількості і розміру ґрунтових пор, що сприяє втраті води, а також полегшує ріст коренів [14]. Ці ефекти залежать від виду рослин і типу пластику, а отже, можуть призвести до змін у складі рослинних угруповань [15]. Мікропластик впливає на мобільність інших забруднювачів у ґрунті, що потенційно може мати значні наслідки для функціональності ґрунтової екосистеми [16].

Аналіз утворення мікропластику при деградації біорозкладних пластмас є важливим питанням досліджень щодо поводження біорозкладного пакування у довкіллі та його впливу на ріст рослин.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття та новизна. На біорозкладання полімерних пакетів впливає багато чинників, які залежать від складу полімера, умов знаходження відходу у зовнішньому середовищі (тип ґрунту, вологість, кліматичні фактори, біота). У свою чергу утворені при розкладанні пакету часточки мікропластику можуть впливати на характеристики ґрунту та стан рослинності. Дослідження щодо цього напрямку, в основному, стосуються розгляду різних типів ґрунтів і мало направлені на поводження з відходами споживачів.

У теперішній час в Україні, в умовах військового стану може виникати проблема централізованого збирання відходів, тому, крім загальних проблем переробки твердих побутових відходів, досить акту-

альним є управління відходами упаковки на побутовому рівні. Можливість їх переробки на присадибних ділянках спрощує операції збирання, перевезення та обробки відходів, тому дослідження щодо даного питання є досить актуальними.

Дослідження біорозкладання одноразового пакування відзначається науковою новизною, оскільки у теперішній час випробування деградації біорозкладних пакетів різних виробників в умовах, придатних для переробки у побуті та присадибних ділянках у теперішній час комплексно не досліджувались.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Для дослідження було обрано пакети, які використовуються у торгівельній мережі супермаркетів м. Харків та області, а саме: біорозкладні пакети різних виробників з маркуванням «біорозкладаний» та поліетиленовий пакет, виготовлений з вторинної сировини. Біорозкладні пакети мали маркування:

Зразок № 1 – Виробник – ТОВ «БК ПЛАСТИК ПАК» compostHOME; склад: PBAT (полібутиратадипаттерефталат) – 75%, PLA (полімолочна кислота з кукурудзяного крохмалю) – 25%.

Зразок № 2 – Виробник – PROMATERISSA. TUVAUSTRIA OK compost HOME S0952; склад: PBAT (полібутират адипат терефталат), PLA (кислота полімолочна), кукурудзяний крохмаль.

Зразок № 3 – поліетиленовий пакет низького тиску високої щільності (HDPE) зі вторинного матеріалу; склад: поліетилен низького тиску високої щільності, поліетилен вторинний, концентрат для поліолефінів, крейдяна домішка, фарба для друку на поліетилені.

Для дослідження з кожного пакету вирізали прямокутні зразки розміром 250×250 мм. Маса пакетів визначалась на вагах з точністю зважування до 0,01, ґрунтовим середовищем для випробування був чорнозем з внесеним субстратом універсальним, з біогумусом. Склад ґрунту: високоякісний верховий, низинний і перехідний торф, біогумус, кварцовий пісок, агроперліт, рН 5,5–6,5. Ґрунт містить мікроелементи: N (загальний) 100–200 мг/л, P₂O₅ 140–260 мг/л, K₂O 120–200 мг/л. Під час дослідження вологість ґрунту підтримувалась на рівні 30–40%.

Також для дослідження використовувався чорнозем з рН 5,5–7,5.

Дослідження проводились в тепличних умовах з рослинністю і без неї, а також на присадибній території.

Пакети візуально аналізувались на зміну цілісності та втрату маси, що в комплексі надає необхідну інформацію про реальну здатність до біологічного розкладання матеріалів. Дослідження щодо матеріалів пакетів відмінного складу від різних виробників дозволяє оцінити їхню поведінку при деградації у довкіллі та визначити вплив на навколишнє середовище.

Викладення основного матеріалу. Протестовано два зразки поліетиленових пакетів із позначкою

«біорозкладаний» від різних виробників, які реалізуються у торгових мережах. Пакети мали полімерні матриці: PBAT+PLA, PBAT+PLA+кукурудзяний крохмаль.

Випробування у тепличних умовах. Дані випробування проводились у ґрунтовому середовищі чорнозему, в який був внесений субстрат універсальний з біогумусом. У ємність з ґрунтовим середовищем додавали зразки з кожного виду біорозкладних пакетів та висаджувались каланхое, що потребує вологого ґрунту, а також паперонію.

Для контролю у ємність з аналогічним ґрунтовим середовищем також були висаджені такі ж рослини. Випробування тривало 3 місяці (квітень-червень) із середньодобовою температурою 18 °С. Умови дослідження можна вважати контрольованими. Після витримки з ґрунту зразки обережно виймали, очищали від його залишків, промивали проточною водою та висушували на повітрі до постійної маси. Візуально спостерігалось розпадання зразків пакетів на частинки та їх потемніння, поверхня була покрита сіткою міцелію, а з ґрунту у тому числі вилучались часточки пластику розміром біля 5 мм.

У період дослідження не спостерігалось зменшення здатності рослин до розвитку у горщиках, що містили біорозкладний полімер, у порівнянні з контрольним. Певним чином цьому сприяла багата поживними речовинами торф'яна частина суміші, що забезпечувала покращення умов розвитку кореневої та надземної частин рослини. Можливо припустити, що шматки полімеру підвищували вологопроникність, вологомісткість і повітряність.

Дослідження у ґрунті присадибної території. Зразки пакетів поміщались у чорнозем разом з невеликою кількістю кухонних відходів. Експериментальне місце не виключало попадання на нього біоти, добрива не вносились. Випробування



Рис. 1. Рослини на місці території експерименту

тривало 3 місяці (квітень-червень), середньодобова температура складала 18 °С. Як і у попередньому випадку, спостерігалось розпадання зразків на частинки, потемніння, покриття поверхні сіткою міцелію та наявність у ґрунті залишків мікропластику. На ділянці у ґрунті, де розміщувались зразки пакетів, було помічено дощових черв'яків та личинок комах. Рослини у місці проведення експерименту не зазнали змін у порівнянні з іншими ділянками (рис. 1). Обидва зразки біопластикової плівки показали помітний ступінь біодеградації в ґрунтових умовах: втрата маси становила 34,9–55,3%. Після викопування ґрунт просіювався, з нього вилучалась невелика кількість мікропластикових частинок (рис. 3).

Після вилучення зразків спостерігалась відмінність у ступені зниження маси залежно від умов експерименту, рис. 3.

Дослідження зазначених зразків біодеградабельних пакетів продовжено до повного їх розкладу.

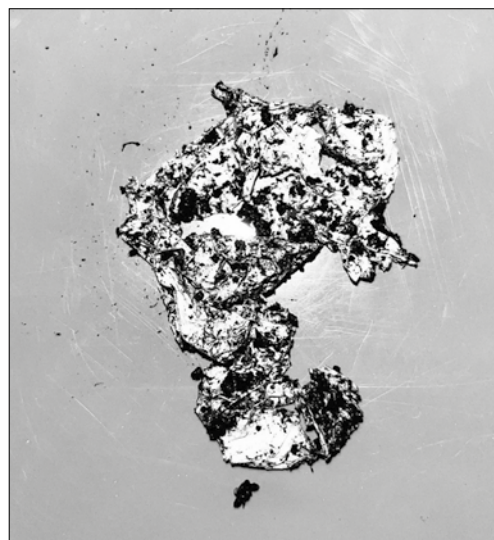


Рис. 2. Залишок відходу після біорозкладання

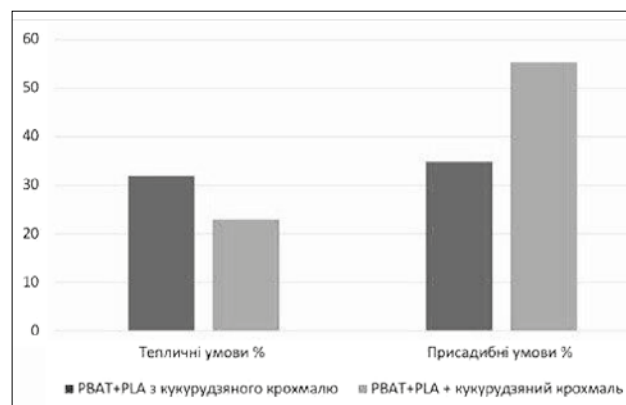


Рис. 3. Порівняння зміни маси зразків біопластикових пакетів в умовах теплиці та присадибних ділянок, %

Головні висновки. Дослідження показали, що пакети на основі поліефірів і полісахаридних наповнювачів, таких як PBAT і PLA, демонструють високий рівень біорозкладання в різних умовах. Визначено, що основні компоненти композитних сумішей PBAT+PLA та PBAT+PLA+кукурудзяний крохмаль вказують на значну здатність до гідролітичного розкладу, що призводить до утворення мономерів, які можуть бути метаболізовані мікроорганізмами. Втрата маси для обох видів пакетів різних виробників на протязі 3 місяців випробувань складала 23 та 32% в умовах теплиць та 35 і 55% на присадибній території. Можливо припустити, що збільшення ступеню розкладання матеріалу пакетів, на присадибній ділянці у порівнянні з тепличними умовами сприяло додавання у ґрунт кухонних відходів та наявності у місці експерименту додаткової біоти. Як і передбачалось, поліетиленовий пакет із вторинного матері-

алу (HDPE) після тестування не зазнав помітних змін. Процес деградації пакетів не впливає на ріст квіткових рослин на ґрунті, багатого на поживні речовини, а також трав'яного покриву чорнозему.

Біорозкладання зразків пакетів, що використовувались для даних досліджень продовжено до повного їх розкладу.

Перспективи використання результатів дослідження. Біорозкладання пакетів різних виробників, що використовуються у торгівельній мережі, не впливало на ріст квіткових рослин у багатому на поживні речовини ґрунті. Також даний ефект не спостерігався для трав'янистих рослин у дослідженнях, які проводились в умовах присадибних ділянок, що в цілому дозволяє рекомендувати проводити процеси переробки відходів біорозкладних пакетів у домогосподарствах, у тому числі на території, що відводиться для озеленення.

Література

1. Packaging waste statistics – Statistics Explained. *Language selection European Commission*: website. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Packaging_waste_statistics#Waste_generation_by_packaging_material5 (дата звернення: 23.06.2024).
2. Pooja N., Anjanappa R., Venkatesh P. et al. An insight on sources and biodegradation of bioplastics: a review. *3 biotech*. 2023. Vol. 13, no. 7. P. 1–18. DOI: 10.1007/s13205-023-03638-4.
3. Таланюк В. В. Основні характеристики та промислове застосування біополімерів на основі поліглідроксибутирату (огляд). *Екологічні науки*. 2020. № 1(28). С. 83–89. DOI: 10.32846/2306-9716/2020.eco.1-28.12.
4. Про обмеження обігу пластикових пакетів на території України : Закон України від 01.06.2021 р. № 1489-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1489-20#Text> (дата звернення: 23.06.2024).
5. Meng K., Yu H., Shi X. et al. Degradation of commercial biodegradable plastics and temporal dynamics of associated bacterial communities in soils: A microcosm study. *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 865. P. 1–11. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.161207.
6. Barragán D. H., Pelacho A. M., Martín-Closas L. Degradation of agricultural biodegradable plastics in the soil under laboratory conditions. *Soil Research*. 2016. Vol. 54, no. 2. P. 216. DOI: 10.1071/sr15034.
7. Chatterjee A., Khobragade P. S., Mishra S. Physicomechanical properties of wollastonite (CaSiO₃)/styrene butadiene rubber (SBR) nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2015. Vol. 132, no. 47. P. 42811. DOI:10.1002/app.42811.
8. Виготовлення пакетів з логотипом: біорозкладні пакети. МПАК: веб-сайт. URL: <https://www.mpak.ua/ru/produksiya/izgotovlenie-paketov-s-logotipom/biorazlagaemye-pakety/> (дата звернення: 23.06.2024).
9. Виробництво біорозкладних пакетів. DNPA: веб-сайт. URL: <https://dnpa.com.ua/ru/production/biorozkladni-pakety> (дата звернення: 23.06.2024).
10. Burelo M., Martínez-Ruvalcaba A., Carranza A. et al. Recent developments in bio-based polyethylene: Degradation studies, waste management and recycling. *Heliyon*. 2023. Vol. 9, no. 11. P. e21374. DOI:10.1016/j.heliyon.2023.e21374.
11. Shamsuri A. A., Md. Jamil S. N. A., Abdan K. A Brief Review on the Influence of Ionic Liquids on the Mechanical, Thermal, and Chemical Properties of Biodegradable Polymer Composites. *Polymers*. 2021. Vol. 13, no. 16. P. 2597. DOI: 10.3390/polym13162597.
12. Nikpay M., Toorchi Roodsari S., Ghorbannezhad P. et al. Crafting a Scientific Framework to Mitigate Microplastic Impact on Ecosystems. *Microplastics*. 2024. Vol. 3, no. 1. P. 165–183. DOI:10.3390/microplastics3010010.
13. Aranda F. L., Rivas B. L., Mendoza A. et al. MICROPLASTICS: FORMATION, DISPOSITION, AND ASSOCIATED DANGERS. AN OVERVIEW. *Journal of the Chilean Chemical Society*. 2023. Vol. 68, no. 1. P. 5755–5761. DOI: 10.4067/s0717-97072023000105755.
14. Krehl A., Schaefer M., Rillig M. C., Keller L. Effects of plastic fragments on plant performance are mediated by soil properties and drought. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12, no. 1. P. 1–12. DOI:10.1038/s41598-022-22270-5.
15. Rillig M. C., Ziersch L., Hempel S. Microplastic effects on plants. *New phytologist*. 2019. Vol. 223, no. 3. P. 1066–1070. DOI: 10.1111/nph.15794.
16. Yu J., Wang W., Gao S., Huang H., Yang Z. Micro plastics in soil ecosystem – A review of sources, fate, and ecological impact. *Plant, Soil and Environment*. 2022. Vol. 68, No. 1. P. 1–17. DOI:10.17221/242/2021-pse.