
ЕКОЛОГІЯ, ІХТІОЛОГІЯ ТА АКВАКУЛЬТУРА

ECOLOGY, ICHTHYOLOGY AND AQUACULTURE

УДК 504.054

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.146.2.29>

БІОДЕГРАДАЦІЯ ПОЛІЛАКТИДУ ТА КОМПЗИТИВ НА ЙОГО ОСНОВІ МІСЦЕВИМИ МІКРООРГАНІЗМАМИ

Самойленко Н.М. – к.т.н.,

професор кафедри хімічної техніки та промислової екології,

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

orcid.org/0000-0003-0306-8425

Гадаєва Ю.С. – аспірантка кафедри хімічної техніки та промислової екології,

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

orcid.org/0009-0007-8583-7502

Титаренко А.І. – аспірант кафедри хімічної техніки та промислової екології,

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

orcid.org/0009-0009-1609-4500

У статті узагальнено теоретичні та практичні аспекти використання мікроорганізмів для розкладання поширених біорозкладних пластиків, таких як полілактид та його композити, у напрямку стійкого управління відходами та застосування принципів циркулярної економіки. Мета дослідження полягає в аналізі та оцінці теоретичних і практичних підходів щодо застосування мікроорганізмів, найбільш адаптованих до процесу розкладання полілактиду (PLA) та його композиту з поліадипат/бутилентерефталатом (PLA/PBAT). Проаналізовано основні закономірності абіотичної та біотичної деградації полілактиду і його композиту, а також розглянуто та систематизовано результати наукових досліджень щодо визначення родів та конкретних бактерій і грибів, здатних до активного процесу розкладання даних полімерів. Зазначено основні особливості процесів деструкції PLA та PLA/PBAT за участю різних представників мікроорганізмів в лабораторних умовах експерименту.

Встановлено зв'язок між природним середовищем існування найбільш активних до розкладання полілактиду бактерій роду *Actinomycetales*, *Amicolatopsis*, *Bacillus* та грибів роду *Penicillium*, а також вказані особливості їх взаємодії з цим біополімером. Відзначено вплив зміни клімату в Україні на мікробіоту. Зроблено висновок щодо перспективності використання досліджених мікроорганізмів для компостування, що є ефективним біотехнологічним підходом до переробки біополімерів та зниження їхнього негативного впливу на довкілля.

Зазначено, що для ефективного переробки відходів біодеструктивних полімерів, в Україні необхідно розвивати інфраструктуру сталого управління відходами, яка передбачає роздільний збір відходів біопластиків; розвиток системи промислового та приватного компостування біовідходів і біопластмас; а також розробку та запровадження інноваційних технологій у компостуванні; розширення проведення наукових досліджень щодо

визначення потенціалу відомих та нових штамів мікроорганізмів, здатних до ефективною деградації біорозкладних полімерів та ін.

Ключові слова: стале управління відходами, циркулярна економіка, зміна клімату, біорозкладні полімери, мікроорганізми, полілактид, компостування.

Samoilenko N.M., Gadieva Yu.S., Titarenko A.I. Biodegradation of polylactide waste and composites based on it by local microorganisms

The article summarizes the theoretical and practical aspects of using microorganisms to decompose common biodegradable plastics, such as polylactide and its composites, in the direction of sustainable waste management and the application of circular economy principles. This study aims to analyze and evaluate theoretical and practical approaches to utilizing microorganisms most adapted to the decomposition process of polylactide (PLA) and its composite with polyadipate/butylene terephthalate (PLA/PBAT). The main patterns of abiotic and biotic degradation of polylactide and its composites are analyzed, and the results of scientific research on the identification of genera and specific bacteria and fungi capable of actively decomposing these polymers are reviewed and systematized. The main features of the processes of destruction of PLA and PLA/PBAT with the participation of various microorganisms in laboratory conditions are indicated.

A connection has been established between the natural habitats of the most active bacteria of the genus Actinomycetales, including Amycolatopsis and Bacillus, and fungi of the genus Penicillium in the decomposition of polylactide, as well as the characteristics of their interaction with this biopolymer. The impact of climate change on the microbiota in Ukraine has been noted. A conclusion has been drawn regarding the prospects of utilizing the studied microorganisms for composting, which is an effective biotechnological approach to processing biopolymers and mitigating their negative environmental impact.

It is noted that for the effective processing of biodegradable polymer waste, Ukraine needs to develop a sustainable waste management infrastructure that provides for the separate collection of bioplastic waste; the development of a system for industrial and private composting of biowaste and bioplastics; as well as the development and implementation of innovative technologies in composting; the expansion of scientific research to determine the potential of known and new strains of microorganisms capable of effectively degrading biodegradable polymers, etc.

Key words: sustainable waste management, circular economy, climate change, biodegradable polymers, microorganisms, polylactide, composting.

Актуальність теми дослідження. Досягнення Цілей сталого розвитку та стратегій циркулярної економіки пов'язується зі сталим управлінням відходами та попередженням зміни клімату. У цьому зв'язку постає важливою науковою та практичною задачею скорочення забруднення довкілля виробництвом синтетичних пластмас та їх відходами шляхом поширеного використання біорозкладних матеріалів. Водночас великі обсяги біорозкладних пластикових відходів потребують зменшення ризиків забруднення довкілля та змушують підвищити потенціал їх перероблення.

Розкладання відходів біопластику може здійснюватися в різних умовах, які включають спеціально створені – у промислових компостних установках та метантенках, а також передбачає його розклад на полігонах, у природних ґрунтових умовах і навіть у морських екосистемах. Біорозпад здійснюється в результаті дії мікроорганізмів, що існують у природі, та залежить від анаеробних чи аеробних чинників середовища їх існування. Тому актуальним є поглиблення досліджень щодо процесу стадії біодеградації полімерного матеріалу у його взаємозв'язку з конкретними типами мікроорганізмів, за різних умов і середовища їх існування, що у тому числі може зазнавати перетворень під дією зміни клімату. Особливо важливим постає питання вивчення локальних штамів бактерій і грибів, характерних для екосистем України, які потенційно здатні розкласти біополімери як у компостованих, так і польових умовах.

Постановка проблеми. На сьогодні в Україні недостатньо досліджень, присвячених вивченню локальних мікроорганізмів-деструкторів і створенню компостних систем, адаптованих до регіональних кліматичних умов та потреб розкладання біополімерів. Більшість наявних робіт зосереджується на лабораторних експериментах із компостування або вермикомпостування, без виділення, ідентифікації та характеристики конкретних штамів мікроорганізмів, здатних до ефективного розкладання поширених в країні біопластиків.

У теперішній час серед біополімерів, які розкладаються, найбільші обсяги виробництва припадають на полілактид, що майже у 7–8 разів перевищує цей показник для інших досить популярних біорозкладних матеріалів і робить його найперспективнішим матеріалом, наприклад, у пакованні [1]. Також за іншими даними на даний біополімер припадало 33% усіх біопластиків, вироблених у 2021 р. [2]. З урахуванням цього, може бути вагомим аналіз та вирішення нагальних проблем розвитку біотехнологічних рішень щодо деградації відходів полілактиду. Водночас для саморозкладних полімерів необхідно, щоб додаткові компоненти також піддавалися біорозкладу або були інертними і не впливали негативно на компостування чи ставали джерелом забруднення довкілля. Вважається, що на сьогодні ще недостатньо наукових доказів стосовно реальної біорозкладності та стійкості пластиків, особливо коли вони мають структуру композитів та/або сумішей [3].

Метою дослідження є узагальнення теоретичних і практичних засад щодо застосування мікроорганізмів у процесах розкладання поширених біополімерів типу полілактиду та його композиту PLA/PBAT, а також у встановленні перспектив використання найбільш адаптованих до кліматичних умов України мікроорганізмів-деструкторів задля ефективного управління відходами біополімерів в Україні та реалізації принципів і стратегій циркулярної економіки.

Методика досліджень. Дослідження ґрунтується на методах порівняльного аналізу, систематизації та узагальнення літературних і експериментальних даних щодо потенційної ролі локальних штамів бактерій і грибів у деградації біополімерів, поширених на ринку пакувальних матеріалів, у медицині, сільському господарстві. Даний методологічний підхід дозволяє виявити певні перешкоди та потенціал для впровадження ефективних екологічних рішень у національну практику управління біорозкладними пластиками.

Результати досліджень. Полілактид – один із найбільш розповсюджених біополімерів, що задовольняє більшість вимог до пакувальних термопластиків для загального використання, а його фізико-механічні властивості та технологічна оброблюваність у розплаві подібні до властивостей традиційних пакувальних смол [4]. У загальному випадку біодеградація полімерів, у т.ч. PLA, під впливом мікроорганізмів супроводжується змінами у фізико-хімічних властивостях матеріалу, а ферментативна активність цих організмів спричиняє розщеплення макромолекул. Біологічний розклад, зазвичай, може зменшувати ступінь кристалічності, але не всі мікроорганізми здатні до цього [5].

Розкладання біопластику типу полілактиду досліджувалося в працях українських та зарубіжних науковців. Першими бактеріями, для яких було доведено здатність руйнувати PLA, стали представники типу актинобактерій (*Amycolatopsis sp.*). Дані результати започаткували систематичне дослідження механізмів ферментативної деструкції полілактиду й визначили актинобактерії як перспективну групу мікроорганізмів для біотехнологічного розкладання біополімерів [6]. Крім того, вони стали основою для досліджень, у т.ч. українських вчених, спрямованих

на виділення та вивчення локальних штамів *Actinobacteria* з ґрунтів і компостів, адаптованих до умов помірного клімату. Такі штами продемонстрували потенціал щодо деградації не лише чистого PLA, але й композитів PHB/PLA, що підтверджено результатами роботи Скорохода В.Й. та ін. [7].

Біодеградація полімолочної кислоти відбувається у дві основні стадії: фрагментація і мінералізація. Фрагментація досягається шляхом біотичного чи абіотичного гідролізу. Біотичний гідроліз включає мікроорганізми і / або ферменти, тоді як абіотичний гідроліз – вплив факторів довкілля, таких як температура, волога або ультрафіолетове випромінювання. Друга стадія – мінералізація, досягається мікробами, що утворюють CO₂, воду і метан в залежності від присутності та/або відсутності кисню в середовищі [2]. Як зазначається [8], розщеплення PLA здійснюється деполімеразними ферментами, головними серед яких є протеази, ліпази, кутинази та естерази, які секретуються різними мікроорганізмами і каталізують розрив естерних зв'язків полімеру.

Дослідження, проведені різними вченими, показують здатність розкласти ПЛА не тільки *Актинобактеріями* різних родів, але й *Trichoderma roseum*, *Penicillium chrysogenum*, *Bacillaceae* та багатьма іншими [6,7], а PHB/PLA – ко-культурами *Pseudomonas mendocina*, *Actinomucor elegans* та ін. Водночас розрізнені публікації щодо біодеградації мікроорганізмами полілактиду та його композиту не створюють цілісної уяви стосовно теоретичного та практичного підґрунтя задля дослідження та практичного використання самих активних із них, а також характеру поширення у різних природних середовищах та особливостей взаємодії з біопластиком.

Розпад PLA проходить у аеробних та анаеробних умовах, але швидкість його розкладання залишається відносно низькою, що пояснюється жорстким ланцюгом молекул та наявністю метильних груп на бокових ланцюгах [9]. У природі це зумовлено ще й обмеженим поширенням у довкіллі мікроорганізмів, здатних ефективно деградувати даний матеріал, на відміну від інших біорозкладних полімерів [10]. Швидкість деградації залежить від домішок мономерів, що не прореагували, температури і рН. Також до чинників довкілля, на деградацію даного пластику може впливати змішування PLA з іншими матеріалами

Найбільша швидкість деградації PLA – у компості, а далі у ґрунті, у стічних водах, прискорених смітниках і водних середовищах. У природному ґрунтовій середовищі PLA менше піддається біодеградації, ніж інші аліфатичні полієфіри, оскільки мікроорганізми, які розкладають PLA, не широко поширені в ґрунтах і присутні в дуже низькому процентному співвідношенні у порівнянні з мікроорганізмами, здатними впливати на інші біорозкладані пластмаси [11]. Бактеріальна активність у ґрунті може стимулювати розкладання PLA, а додавання ферментів або поживних речовин – прискорити його розкладання у ґрунті [9]. Механізм біодеградації PLA у ґрунті та компості здебільшого ферментативний, а у водних середовищах і стічних водах відповідно домінують процеси гідролізу та утворення біоплівки [10]. На звалищах PLA розкладається на низькомолекулярний полімер, який може або розкладатися мікробами, або фрагментуватися на мікропластик, що далі поширюється у довкіллі.

Автори досліджень [12 та ін.] вказують на здатність розкласти PLA бактеріями актиноміцетами, що належать до роду *Amycolatopsis*, *Lentzea*, *Kibdelosporangium* і *Streptoalloteichus* (*Pseudonocardiaceae*); *Thermomonospora*, *Actinomadura* (*Thermomonosporaceae*); *Laceyella* і *Thermoactinomyces* (*Thermoactinomycetaceae*); *Micromonospora* (*Micromonosporaceae*); *Thermopolyspora* (*Streptosporangiaceae*). Крім того, деякі бактерії з інших груп (род

ів *Pseudomonas* та *Stenotrophomonas*) були ідентифіковані як такі, що розкладають PLA [13]. Також щодо цього відомо про активність декількох представників штаму Bacillaceae, включаючи *Brevibacillus* sp. [14], *Bacillus smithii* [15], *Geobacillus* sp. [16] та *Bacillus licheniformis* [17].

Дослідження українських вчених підтверджують здатність локальних штамів *Bacillus* до деградації PLA в умовах аерації та без неї [7]. Серед протестованих бактерій відмінні результати відзначалися для *Bacillus subtilis* (з аерацією та без неї). Деградація PLA плісневими грибами в цілому є низькою, за виключенням зразків, культивованих з *Penicillium chrysogenum* в умовах аерації. Зразки PLA, які піддавалися впливу *Pseudoarthrobacter* sp. IMV B-7981 і *Streptomyces griseus*, не руйнували полімер, а сприяли формуванню більш термостійкої структури PLA. Також результати даного дослідження [7] показали, що всі цвілеві гриби *Penicillium chrysogenum*, *Trichoderma roseum*, *Aspergillus* sp. та *Rhizopus* sp. руйнували плівки PLA в статичних умовах без аерації. Додаткова аерація під час культивування цвілі істотно не збільшила швидкість розкладання за винятком культивування *Penicillium chrysogenum*.

Отже, оптимальні умови для біодеградації PLA цвілевими грибами – лабораторні без аерації, тоді як *Penicillium chrysogenum* виявляє максимальну активність за наявності подачі повітря.

Результати даних досліджень щодо *Trichoderma roseum* підтверджуються авторами роботи [5], які стверджують, що кристалічність PLA зростає під впливом *Trichoderma roseum*, а крім того, ще і *Aspergillus niger*. Це може вказувати на деградацію переважно аморфної частини полімеру, однак, не призводить до значного руйнування ділянок полімеру.

Таким чином, загальні результати аналізу приведених теоретичних та експериментальних досліджень показують, що найбільшу активність у деструкції полілактиду мають такі мікроорганізми як *Actinomycetales*, *Amycolatopsis*, *Bacillus*, *Penicillium*.

Біодеградація композиту PLA/PBAT є складнішим процесом, оскільки потребує участі специфічних мікроорганізмів або мікробних консорціумів, здатних до ферментативного розщеплення обох полімерних компонентів. Спільна дія бактерій та грибів створює синергічний ефект між бактеріальними естеразами та грибковими ліпазами. Так, ко-культура *Pseudomonas mendocina* і *Actinomucor elegans* забезпечує суттєве прискорення деградації плівок PLA/PBAT, що пов'язується з високою активністю протеаз та ліпаз, які каталізують розрив естерних зв'язків у полімерній матриці [18]. Показано позитивну характеристику термофільних бактерій у процесі біодеструкції PLA/PBAT [19]. Ко-культура *Pseudomonas G1* і *Kocuria G2*, виділена з фаз компостування, ефективно розщеплює PLA/PBAT-ST20 за температури 55–60 °C. Мінералізація полімеру підтверджується вираженими морфологічними змінами плівок, підвищенням активності ферментів та накопичення проміжних метаболітів.

Перспективним напрямом є біоаугментація компостних систем із використанням визначених бактеріальних консорціумів. Зокрема, консорціум із чотирьох видів – *Nocardioides zeae* EA12, *Stenotrophomonas pavanii* EA33, *Gordonia desulfuricans* EA63, *Chitinophaga jiangningensis* EA02 значно прискорює розкладання високомолекулярного PLA під час традиційного компостування, активуючи комплекс гідролітичних ферментів та покращуючи кінетику мінералізації дослідження [20].

Отже, представлені результати свідчать, що найвищу ефективність біодеградації сумішей PLA/PBAT забезпечують саме ко-культури мезофільних, так

і термофільних мікроорганізмів завдяки їхній метаболічній взаємодії та сумарній ферментативній активності. Це підтверджує перспективність підходу до створення мікробних консорціумів, адаптованих до умов компостування, зокрема для подальшої розробки українських біотехнологічних систем переробки біополімерів у помірному кліматі.

Зведені дані щодо досліджених бактерій та грибів, здатних до розкладання біополімерів типу PLA та PLA/PBAT, представлені у таблиці 1.

Таблиця 1
Мікроорганізми, здатні до деструкції біополімерів PLA та PLA/PBAT

Тип полімеру	Рід (вид) бактерій та грибів	Джерело інформації
PLA	Актинобактерії родів <i>Actinomadura</i> , <i>Amycolatopsis</i> , <i>Kibdelosporangium</i> , <i>Micromonospora</i> , <i>Nonomuraea</i> , <i>Pseudonocardia</i> , <i>Saccharothrix</i> , <i>Streptoalloteichus</i> , <i>Streptomyces</i> , <i>Thermomonospora</i> та <i>Thermopolyspora</i>	[6,7, 21]
	Актиноміценти роду <i>Lentzea</i> , <i>Kibdelosporangium</i> ; <i>Streptoalloteichus</i> (<i>Pseudonocardiaceae</i>), <i>Thermomonospora</i> ; <i>Actinomadura</i> (<i>Thermomonosporaceae</i>); <i>Laceyella</i> ; <i>Thermoactinomyces</i> (<i>Thermoactinomycetaceae</i>); <i>Micromonospora</i> (<i>Micromonosporaceae</i>); <i>Thermopolyspora</i> (<i>Streptosporangiaceae</i>)	[12, 21]
	Актиноміценти родин <i>Micromonosporaceae</i> , <i>Streptomycetacea</i> , <i>Streptosporangiaceae</i> , <i>Thermomonosporaceae</i>	[21]
	<i>Trichoderma roseum</i> (незначне зниження стабільності матеріалу)	[5,7]
	<i>Penicillium chrysogenum</i>	[7]
	Рід <i>Pseudomonas</i> , <i>Stenotrophomonas</i>	[13]
	Vacillaceae: <i>Brevibacillus</i> sp., <i>Bacillus smithii</i> , <i>Geobacillus</i> sp., <i>Bacillus licheniformis</i>	[14-17]
PLA/ PBAT	<i>Actinobacteria</i>	[7]
	Ко-культура <i>Pseudomonas mendocina</i> , <i>Actinomucor elegans</i>	[18]
	<i>Pseudomonas G1</i> , <i>Kocuria G2</i>	[19]
	<i>Nocardioides zeae</i> EA12, <i>Stenotrophomonas pavanii</i> EA33, <i>Gordonia desulfuricans</i> EA63, <i>Chitinophaga jiangningensis</i> EA02	[20]

Природне середовище існування мікроорганізмів та особливості процесу деструкції PLA надані у таблиці 2.

Територія України характеризується, в основному, помірно-континентальним кліматом, що створив умови для мікроорганізмів, адаптованих до сезонних змін температури та вологості. Водночас деяка частина прибережних районів Чорного та Азовського морів мають субтропічний клімат середземноморського типу,

в якому живуть мікроорганізми, пристосовані до теплого і вологого середовища. Мікробна спільнота по-різному реагує на кліматичні зміни щодо підвищення температури, переміни в кількості опадів, підвищення рівня вуглекислого газу та у відповідь на це змінює свою різноманітність, фізіологічні характеристики, активність, біомасу, чисельність, ферментативний ефект [22, 23].

Таблиця 2

Природне середовище існування найбільш характерних для деструкції PLA мікроорганізмів

Бактерії та гриби	Природне середовище поширення	Особливості взаємодії з біопластиком
<i>Actinomycetales</i> (<i>Actinobacteria</i>)	Грунт (особливо рід <i>Micromonospora</i>), водне середовище, може бути повітря	Розкладання біопластику у лабораторних та польових умовах бактеріями <i>Amycolatopsis</i> і <i>Actinomadura</i>
<i>Amycolatopsis</i>	Грунт та водне середовище	Деякі представники виду здатні розкласти PLA без компостних умов
<i>Bacillus</i>	Грунт, прісні та солоні водойми	Деструкція PLA бактеріями <i>Bacillus subtilis</i> незалежно від аерації (лабораторні умови)
<i>Penicillium</i>	Грунт, повітря	Підвищене розкладання PLA під дією <i>Penicillium chrysogenum</i> в умовах аерації (лабораторні умови)

Більшість бактерій та грибів відносяться до мезофільних, які мають оптимальну температуру росту, що коливається від 25 °С до 40 °С. Водночас існує оптимальна температура, яка становить, наприклад, для *Actinobacteri* 20–30 °С, а для більшості видів роду *Amycolatopsis* – близько 28-30°С. У цьому зв'язку можливе порушення сталості мікроорганізмів до температурних змін, які виникають чи можуть виникнути при глобальному потеплінні та вплинути на деградацію біополімерів мікробним співтовариством. Також кліматичне підвищення температури викликає зменшення відносної вологості на певних територіях України та підвищення на інших, що може стати чинником модифікації мікробного консорціуму.

Моделювання змін клімату показує, що центр і північ України зазнають найбільших темпів потепління, а у прибережних регіонах цей процес буде повільнішим. Також є імовірність значного зменшення літніх опадів на півдні та південному сході України і збільшення зимових опадів на півночі України [24]. Таким чином, дані прогнози щодо зміни клімату вказують на виникнення умов для опосередкованих змін у процесах деградації мікроорганізмами біорозкладних полімерів.

Для ефективної переробки в Україні відходів полілактиду та інших біополімерів, здатних до саморозкладання, доцільно:

1) розвивати інфраструктуру сталого управління відходами, що включає роздільний збір синтетичних пластмас та біорозкладного пластику, а також передбачає інші ефективні процедури логістичного управління;

2) розширення потоків біопластику для компостування (compostable plastics), у тому числі включає PLA та його композити, а також розвиток системи промислового і приватного компостування;

3) запровадження у компостування інноваційних, у т.ч. цифрових технологій (датчиків IoT для моніторингу температури, вологості, аерації та ін.);

4) проведення розширених наукових досліджень щодо подальшого визначення потенціалу мікроорганізмів з числа бактерій та грибів, здатних до продуктивної деградації полімерів.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Узагальнено сучасні підходи до дослідження біодеградації полілактиду та його композиту PLA/PBAT, які спрямовані на розклад найбільш активними мікроорганізмами відходів, утворених з даних матеріалів. Встановлено, що процес мікробіологічної деструкції цих полімерів визначається активністю ферментів, синтез яких найбільш характерний для представників родів *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Amycolatopsis*, *Penicillium* та інших.

Отримані результати підтверджують перспективність використання локальних мікроорганізмів-деструкторів, які можуть бути адаптовані до кліматичних умов України, створення ефективних біотехнологічних систем переробки відходів розкладних біопластиків, зменшення обсягів їх накопичення та продукування компосту як добрива у сільському господарстві. Даний підхід узгоджується з глобальними завданнями щодо економіки замкненого циклу, які передбачають розвиток напрямку виробництва біорозкладного пластику, придатного для компостування.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальну ідентифікацію активних штамів мікроорганізмів та визначення їх здатності до ефективної деградації біополімерів. Особливу увагу варто приділити розробленню адаптованих мікробних консорціумів для промислового та побутового компостування, а також деградації PLA/PBAT у реальних умовах компостування та полігонного зберігання. Реалізація даних досліджень сприятиме створенню науково обґрунтованих основ для впровадження ефективних біотехнологій управління відходами біополімерів в Україні та впровадження принципів і стратегій циркулярної економіки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Самойленко Н. М., Гадаєва Ю. С. Актуальні аспекти розробки та використання біополімерних матеріалів для одноразового пакування. *Екологічні науки*. 2025. № 2(59). С. 330–336. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.2-59.49>.

2. Ali W., Ali H., Gillani S., Zinck P., et al. Polylactic acid synthesis, biodegradability, conversion to microplastics and toxicity: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2023. Vol. 21. P. 1761–1786. https://www.researchgate.net/publication/367413391_Polylactic_acid_synthesis_biodegradability_conversion_to_microplastics_and_toxicity_a_review.2.

3. Rafael Resende Assis Silva, Clara Suprani Marques, Tarsila Rodrigues Arruda, Samiris Cocco Teixeira, Taíla Veloso de Oliveira. Biodegradation of Polymers: Stages, Measurement, Standards, and Prospects. *Macromol*, 2023. 3(2). 371-399 <https://www.mdpi.com/2673-6209/3/2/23>

4. Sinclair R. The case for polylactic acid as a commodity packaging plastic. *International Journal of Polymer Materials*. 2006. Vol. 55, No. 8. DOI: <https://doi.org/10.1080/10601329608010880>.

5. Іванух О. О., Семеюк І. М., Перетятко Т. В., та ін. Дослідження біодеградації полігидроксibuтирату, полілактиду і їх сумішей під дією мікроорганізмів методом рентгенівського дифракційного аналізу. *Chemistry, Technology and*

Application of Substances. 2025. T. 8, № 1. С. 184–190. DOI: <https://doi.org/10.23939/ctas2025.01.184>.

6. Pranamuda H., Tokiwa Y., Tanaka H. Polylactide degradation by an *Amycolatopsis* sp. *Applied and Environmental Microbiology*. 1997. Vol. 63, No. 4. P. 1637–1640. DOI: <https://doi.org/10.1128/aem.63.4.1637-1640.1997>.

7. Skorokhoda V., Semeniuk I., Peretiatio T., Kochubei V., Ivanukh O., Melnyk Y., Stetsyshyn Y. Biodegradation of Polyhydroxybutyrate, Polylactide, and Their Blends by Microorganisms, Including Antarctic Species: Insights from Weight Loss, XRD, and Thermal Studies. *Polymers*. 2025. Vol. 17, No. 5. P. 675. <https://www.mdpi.com/2073-4360/17/5/675>.

8. Shalem A., et al. Enzymatic degradation of polylactic acid (PLA). *Frontiers in Microbiology*. 2024. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-024-13212-4>.

9. Hussain M., et al. A review on PLA-based biodegradable materials for biomedical applications. *Giant*. 2024. P. 100261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.giant.2024.100261>.

10. Hajilou N., et al. A Comparative Review on Biodegradation of Poly(Lactic Acid) in Soil, Compost, Water, and Wastewater Environments: Incorporating Mathematical Modeling Perspectives. *AppliedChem*. 2025. Vol. 5, No. 1. P. 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/appliedchem5010001>.

11. Tiparporn Bupachat, Narongrit Sombatsompop, Benjaphorn Prapagdee. Isolation and role of polylactic acid-degrading bacteria on degrading enzymes productions and PLA biodegradability at mesophilic conditions. *Polymer Degradation and Stability*. Vol. 152, June 2018, Pages 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.03.023>

12. Jarerat A., Pranamuda H., Tokiwa Y. Poly(L-lactide)-degrading activity in various actinomycetes. *Macromolecular Bioscience*. 2002. Vol. 2, No. 8. P. 420–428. DOI: <https://doi.org/10.1002/mabi.200290001>.

13. Bupachat T., Sombatsompop N., Prapagdee B. Isolation and role of polylactic acid-degrading bacteria on degrading enzymes productions and PLA biodegradability at mesophilic conditions. *Polymer Degradation and Stability*. 2018. Vol. 152. P. 75–85. <https://www.researchgate.net/publication/324205322>.

14. Tomita K., Kuroki Y., Nagai K. Isolation of thermophiles degrading poly(L-lactic acid). *J. Biosci. Bioeng.* 1999. Vol. 87, No. 6. P. 752–755. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(99\)80148-0](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(99)80148-0).

15. Sakai K., et al. Isolation of a thermophilic poly-L-lactide degrading bacterium from compost and its enzymatic characterization. *J. Biosci. Bioeng.* 2001. Vol. 92, No. 3. P. 298–300. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16233100>.

16. Tomita K., et al. Degradation of poly(L-lactic acid) by a newly isolated thermophile. *Polym. Degrad. Stab.* 2004. Vol. 84, No. 3. P. 433–438. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141391004000163>.

17. Kim M. N., et al. Poly(L-lactide)-degrading activity of a newly isolated bacterium. *J. Appl. Polym. Sci.* 2008. Vol. 109, No. 1. P. 234–239. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.26658>.

18. Zhao M., Wang, L., Lu D., Zhang C., Zhang H., Chen S., & Yan Q. Biodegradation of PLA/PBAT films by a bacterial–fungal co-culture. *Frontiers in Microbiology*. 2020. 11. 560. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00560> <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33264878>

19. Yizhan Qiu, Pan Wang, Luxi Zhang, Chunmei Li, Jiaxin Lu, Lianhai Ren. Enhancing biodegradation efficiency of PLA/PBAT-ST20 bioplastic using thermophilic bacteria co-culture system: New insight from structural characterization, enzyme activity, and metabolic pathways. *J Hazard Mater*. 2024. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.135426

20. Mistry A. N., Kachenchart B., Pinyakong O., et al. Bioaugmentation with a defined bacterial consortium: A key to degrade high molecular weight polylactic acid during traditional composting. *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 364. Article 128237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128237>.

21. Butbunchu N., Pathom-Aree W. Actinobacteria as promising candidate for polylactic acid type bioplastic degradation. *Frontiers in Microbiology*. 2019. 10. 2834. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02834>

22. Bhupinder Dhir (2026). Chapter 32 – Impact of climate change on soil microbes. *Climate Change and Soil Interactions. Drivers and Pathways for Sustainability*. 2026. Pages 711-727. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-40292-0.00015-7>

23. Guta Amante¹, Mulisa Wedajo. Impacts of Climate change on soil microbial diversity, distribution and abundance. *International Journal on Food, Agriculture, and Natural Resources*. 2024. Vol. 05, Issue 02. Page 158-168. DOI: <https://doi.org/10.46676/ij-fanres.v5i2.342>

24. Wilson L., New S., Daron J., Golding N. Climate Change Impacts for Ukraine. Met Office. 2021. https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/2_Vplyv-zminy-klimatu-v-Ukrayini.pdf

Дата першого надходження рукопису до видання: 12.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 22.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025
