

## ГЛОБАЛЬНА ЕКОЛОГІЧНА ПРОБЛЕМА МІКРОПЛАСТИКА

Кірсанова В.В.

Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»  
вул. Фанагорійська, 9, 68601, м. Ізмаїл  
[kirsanova@dinuoma.com.ua](mailto:kirsanova@dinuoma.com.ua)

Забруднення пластиком та мікропластиком створили екологічні проблеми через його стійкість та шкідливий вплив на біосферу та на здоров'я людини. Розкладання пластмас у результаті життєдіяльності мікроорганізмів має велике значення для екологічного здоров'я біосфери. Можливість розкладання пластмас мікроорганізмами привернула увагу дослідників. При вивченні механізму біодеградації пластику та мікропластику виявлено особливості деструкції залежно від структури пластмас. Виявлено, що полімери з довгими ланцюгами ефективно біорозкладаються на невеликі фрагменти, які вимагають більшої ферментативної активності протягом більш тривалого періоду часу. Полімери, що складаються з коротких ланцюгів і характеризуються низькою молекулярною масою, розкладаються швидше, порівняно з полімерами з довгими ланцюгами. Мікроби використовують біорозкладні полімери як субстрат при голодуванні та недоступності поживних речовин. Мікробна біоплівка є способом біодеградації полімерів. Вона формується мікроорганізмами на поверхні пластику і називається пластисферою. При порівнянні швидкості біорозкладання, бактерій і грибів, виділених з одного і того ж звалища, показало, що гриби виявилися більш ефективними для розкладання поліетилену, ніж бактерії. Виявлено що деякі нитчасті гриби здатні використовувати ці матеріали як єдине джерело вуглецю та енергії. На біорозкладання пластику впливає поєднання сукупності біотичних та абіотичних факторів. Необхідні подальші дослідження та комплексна оцінка впливу мікроорганізмів на деградацію пластику. Обнаслідують результати досліджень біодеструкції біорозкладних пластиків. Вони можуть відкрити нові варіанти керування відходами в кінці терміну служби, які недоступні для нерозкладних пластиків, таких як анаеробне зброджування та компостування. Забруднення харчових продуктів поточними пластиками, що не розкладаються, обмежує можливості їх переробки, а біорозкладні пластики, забруднені продуктами харчування, можуть бути компостовані до молекулярного походження. Необхідні подальші дослідження та комплексна оцінка впливу на деградацію пластику для інформування про методи сталого управління відходами. Які дозволять прискорити та удосконалити процеси їх утилізації. *Ключові слова:* забруднення пластиком, біодеградація пластику, мікропластик, біорозкладні полімери, пластисфера, мікроорганізмами нитчасті гриби.

### Global environmental problem of microplastics. Kirsanova V.

Plastic and microplastic pollution have created environmental problems due to its persistence and harmful effects on the biosphere and human health. The decomposition of plastics as a result of the vital activity of microorganisms is of great importance for the ecological health of the biosphere. The possibility of decomposition of plastics by microorganisms has attracted the attention of researchers. When studying the mechanism of biodegradation of plastic and microplastic, the peculiarities of destruction depending on the structure of plastics were revealed. Long-chain polymers have been found to efficiently biodegrade into small fragments that require more enzymatic activity over a longer period of time. Polymers consisting of short chains and characterized by low molecular weight degrade faster than polymers with long chains. Microbes use biodegradable polymers as a substrate during starvation and inaccessibility of nutrients. Microbial biofilm is a method of biodegradation of polymers. It is formed by microorganisms on the surface of plastic and is called a plastisphere. When comparing the rate of biodegradation of bacteria and fungi isolated from the same landfill, it was shown that fungi were more effective in decomposing polyethylene than bacteria. It was found that some filamentous fungi are able to use these materials as the only source of carbon and energy. The biodegradation of plastic is influenced by a combination of biotic and abiotic factors. Further research and a comprehensive assessment of the impact of microorganisms on plastic degradation is necessary. The results of studies on the biodestruction of biodegradable plastics are encouraging. They can open up new end-of-life waste management options not available to non-degradable plastics, such as anaerobic digestion and composting. Contamination of food products with current non-biodegradable plastics limits their recycling options, and biodegradable plastics contaminated with food products can be composted to molecular origins. Further research and comprehensive impact assessment on plastic degradation is needed to inform sustainable waste management practices. Which will allow to speed up and improve the processes of their disposal. *Key words:* plastic pollution, biodegradation of plastic, microplastic, biodegradable polymers, plastisphere, microorganisms, filamentous fungi.

**Постановка проблеми.** Пластмаси, це полімерні матеріали, яких можна синтезувати у промислових масштабах під дією тепла та тиску. Мономери в реакціях полімеризації або поліконденсації з'єднуються і утворюють високомолекулярні сполуки.

Технологія виробництва пластмас було розроблено на початку минулого століття. Пластмаси характеризуються різноманітністю хімічної структури мономеру. Об'єднані у загальну групу, оскільки всі пластмаси характеризуються пластичністю, яка збільшується у разі підвищення температури.

З метою розширення технологічних властивостей пластмас, додають наповнювачі, пластифікатори, стабілізатори, барвники та інші добавки. Всі ці сполуки розширюють різноманітність хімічної структури пластмас та їх технологічні властивості (міцність, жорсткість, щільність, термостійкість, електропровідність). Різноманітність будови, хімічних та фізичних властивостей пластмас зумовили їхнє широке застосування. Незважаючи на те, що без цих матеріалів сучасне життя уявити складно, пластмаси характеризуються суттєвими недоліками.

У 80-ті роки. XX ст. було доведено, що при спалюванні пластикових відходів утворюються діоксини. Діоксини – це хімічні сполуки, які утворюються як побічні продукти високотемпературних хімічних реакцій, котрим характерна присутність молекул хлору, що з атомами вуглецю. Характерною особливістю діоксинів є їхня стійкість до хімічного та біологічного розкладання, а також їх здатність зберігатися та накопичуватися у навколишньому середовищі. Діоксини концентруються в біомасі і переноситися харчовими ланцюжками. Вони є суперінтоксикантами, універсальними клітинними отрутами, що знищує все живе. Поєднання високої токсичності, біокумулятивності та канцерогенності обумовлює серйозну небезпеку діоксинів для біосфери [1]. Зберігаючи стійкість до впливу агресивних факторів навколишнього середовища, при тривалому використанні або зберіганні відбувається ослаблення і розрив зв'язків між мономерами в полімерних молекулах пластику. На початку двадцять першого сторіччя виявлено здатність пластику деградувати. У всіх екосистемах планети без винятку виявлено частинки пластикових відходів різних розмірів.

**Актуальність дослідження** Деградація пластику виникає внаслідок зміни хімічної структури полімеру під впливом факторів довкілля. Деградацію класифікують як фотоокислювальну, термічну, спричинену озоном, механохімічну, каталітичну та біодеградацію [2; 3]. Процес деградації продовжується до розкладання молекул пластику на мономери. В результаті виявлено макрочастинки (великі шматки) та мікрочастинки. Найбільшу небезпеку для екосистем є мікрочастинки, які накопичуються, але продовжують розкладатися. Оскільки процес розкладу безперервний, у навколишньому середовищі накопичуються мікрочастинки різних розмірів.

Мікропласт (МП) класифікується як частинки в діапазоні від 1 мкм до 5 мм, нанопластик частки в діапазоні від 1 нм до 100 нм, а розміри від 100 нм до 1 мкм називаються субпластичними. Класифікація відповідає ухвалам Європейської комісії для сконструйованих наночастинок (ENP) [4].

У Світовому океані накопичено пластикові відходи, які утворили острови у сотні квадратних км. Пластмасове забруднення виявлено в найрізноманітніших морських екосистемах, у тому числі, вздовж берегових ліній віддалених островів, прибережну товщу води, глибоководні та субтропічні круговороти.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** Вплив на навколишнє середовище великих частинок пластику діаметром від сантиметрів до десятків метрів включає зміну довкілля, заплутування і вживання в їжу мегафауною, такий як ссавці [5], морські птахи [6], і великі види риб [7]. Часто хвилі океану викидають на берег трупи дельфінів, трупи китів та птахів, у яких убив пластик. Колонізація плаваючих уламків може також переносити особин дрібних видів, що

є однією з причин біоінвазії чужорідних видів [8; 9]. Забруднення мікропластиком в останні роки викликало особливе занепокоєння через його поширеність в океані та потенційне потрапляння в організм усіх морських мешканців. Виявлено поширення мікропластика у глобальному морському середовищі. Яка включає первинні джерела (використання мікрочастинок пластику в косметичних засобах, синтетичному одязі, та при утворенні виробничих відходів заводів з переробки пластмас. Вторинні джерела накопичуються в результаті деградації більших залишків пластику в результаті фізичних та хімічних впливів [10]. В результаті досліджень визначено, що берегові лінії містять значну кількість пластикового сміття, але кількість, розподіл та походження залишаються не до кінця дослідженими.

За даними деяких авторів [11]. Протягом перших 5 років після викиду в океан 77% наземного пластику викидається на берег, або зосереджений у прибережних водах. Викинутий на берег пластик характеризується різним походженням. [12] Накопичення та розсіювання пластику в навколишньому середовищі сприяють виникненню глобальної екологічної кризи [11]. З річковою водою пластикові відходи потрапляють із суші до Світового океану, річки також утримують пластик протягом тривалих періодів часу [13]. Досліджено динаміку перенесення пластикових відходів по річці. Вони показали, що більшість пластику переносилася на поверхню, але також виявили рух і накопичення в нижніх шарах води на ділянках з повільним перебігом. Одне з перших досліджень щодо визначення кількісної концентрації пластику в товщі води продемонструвало, що не можна нехтувати підводним пластиком. Іноді концентрації на глибині дорівнювали або перевищували концентрації, що спостерігаються на поверхні [14]. Було проведено комплексні дослідження, присвячені виявленню мікропластику в товщі води басейну річки Дунай від її початку до гирла, включаючи основні притоки. Мікропластик було виявлено у всіх зразках. Поліетилен є переважним полімером з максимальним вмістом 22,24 мкг/мг, 3,23 мкг/мг полістиролу, 1,03 мкг/мг стирол-бутадиєн-каучуку та 0,45 мкг/мг поліпропілену. Полімери, такі як поліефіри, поліакрилати, полілактид та натуральний каучук, не були виявлені. Води басейну річки Дунай, як і всі річки планети, містять мікропластик, що утворився внаслідок накопичення залишків пластикового сміття [15; 16].

Оцінка просторового розподілу сміття має значення визначення його екологічної значимості. Деякі дослідження показали, що мікропластик присутній у ґрунті, в атмосфері та може пересуватися на великих відстанях [17] Виявлено присутність мікропластику у пробах хмарної води. Хмарний мікропластик характеризується широким діапазоном розмірів від 8 до 1542 мкм, 60% їх менше 100 мкм. На концентрацію мікропластика впливає

вміст рідкої води у хмарах, райони джерел та висота траєкторії. Шорстка поверхня хмарного мікропластика, вказує на його фотохімічне старіння. Потрібні додаткові дослідження, щоб зрозуміти взаємодію мікропластику з хмарами [18]. Внаслідок численних досліджень виявлено більш високий рівень сміття в районі звалищ. Кореляція між густиною населення та кількістю сміття позитивна, проте на регіональному рівні кореляція негативна. Передбачається, що управління відходами ефективніше у великих населених пунктах [19; 20]. Виявлено новий вид мінералів, що містить пластик на всіх континентах Землі. Каміні з включенням пластикових полімерів були виявлені як уздовж берегової лінії, так і в глиб континентів. Вперше пластикові каміні, які складаються з розплавленого пластику, до якого прилипли піщинки, каміння, корали, черепашки та деревне сміття, були виявлені всередині розпаленого багаття. Пластикові каміння також може бути результатом руху хвиль. Внаслідок чого пластик прилипає до поверхні каміння. Хімічне зв'язування могло стати можливим завдяки сонячному опроміненню, що окислює пластик. Пластикові каміння являють собою безпосередню загрозу стійкості екосистем в океані та здоров'ю людини, оскільки можуть знизити мікробну різноманітність та виділяти мікропластик, який потрапляє до тіла людини та тварин [21; 22; 23].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття** Результати досліджень показали, що всі живі організми на планеті можуть ковтати або адсорбувати мікропластик [24; 25]. Мікрочастинки пластику виявлено в організмі медуз, мідій, ракоподібних, риб та інших морських мешканців [26]. Виявлено наявність мікропластику у біологічних зразках людського походження [27].

Мікропластик надає несприятливий вплив на живі організми. При дослідженні впливу мікропластику у поєднанні з антибіотиками, які також накопичені у навколишньому середовищі, виявлено суттєве ушкодження системи окисного захисту. Також спостерігалось зниження різноманітності видів мікроорганізмів [28].

Внаслідок впливу бісфенолів на організм людини, знижується концентрація та кількість сперматозоїдів. Необхідні додаткові дослідження для подальшого вивчення взаємозв'язку між впливом бісфенолів та зниженням чоловічої фертильності [29]. Бісфеноли активують внутрішньоклітинні метаболічні ферменти та насос відтоку в бактеріях, що збільшує їх стійкість до антибіотиків [30]. Згідно з результатами досліджень, рослинні екосистеми можуть природно відфільтрувати і накопичити мікропластик до його потрапляння у водне середовище. Накопичення частинок мікропластику впливають на властивості ґрунту та зростання рослин, представляючи загрозу для наземних екосистем [31; 32].

Прісноводні екосистеми містять велику кількість мікропластику. Скидання стічних вод вважається основним джерелом їх забруднення мікропластиком, але не єдиний [33; 34]. Пластик завдяки хімічній стійкості та невеликій вазі легко переміщається повітрям, сушею, прісною водою та океаном. Масове використання та неефективні системи керування пластиковими відходами призвели до забруднення мікропластиком, що стало серйозною загрозою для навколишнього середовища. Повсюдна присутність мікропластику у навколишньому середовищі збільшує ризик негативного впливу мікропластику на біосферу та здоров'я людини [35; 36]. Внаслідок широкого поширення пластику виникла гостра необхідність видалення пластикових відходів із навколишнього середовища, щоб подолати глобальну екологічну кризу пластикового забруднення. Доля пластмас на планеті залежатиме від ефективних технологій управління та утилізацією пластиковими відходами. Також можливе розкладання та нейтралізація мікропластику під впливом мікроорганізмів та ферментів.

**Новизна.** Узагальнено дослідження мікроорганізмів, що беруть участь у біодеградації пластику. Визначено існування значного потенціалу для використання різних штамів бактерій та нитчастих грибів для ефективної деградації пластику з метою розв'язання глобальної екологічної проблеми пластичного та мікропластикового забруднення планети.

**Загальнонаукове значення** Розкладання пластику внаслідок біодеградації має важливе значення для екологічного здоров'я. Це дослідження включає попереднє обговорення механізму біодеградації та переваг ферментів різних мікроорганізмів у деградації різних полімерів. Огляд підсумовує дослідження біологічної деградації пластику та мікропластику, пов'язані з механізмами та факторами впливу, а також їх ферментами у посиленні деградації синтетичних пластиків. Для подальшого підвищення ефективності деградації полімерів обговорювалися попередні обробки для підвищення ефективності біодеградації, які можуть призвести до значного зниження забруднення токсичним пластиком. Результати багатьох досліджень показують, що багато мікроорганізмів бере участь у біодеградації пластику, хоча їх механізми недостатньо вивчені. Існує значний потенціал для використання різних штамів бактерій та ниткових грибків для ефективної деградації пластику.

**Викладення основного матеріалу** Мікробна ферментативна деградація ґрунтується на здатності бактеріальних ферментів до деградації пластику [37]. Стійкі полімери не повністю розкладаються, що ускладнює асиміляцію цих пластмас у навколишньому середовищі [38]. Полімери з довгими ланцюгами ефективно біорозкладаються на невеликі фрагменти, проте для повного розкладання потрібні більшої ферментативної активності протягом більш

тривалого періоду часу. У процесі часткового біорозкладання фрагменти, що утворилися, асимілюються з мікроорганізмами. Асиміляція спостерігається і коли пластик фрагментується під впливом абіотичних факторів, таких як УФ-випромінювання, температура та фізичний стрес [39]. Біорозкладні пластики, які складаються з коротких ланцюгів і характеризуються низькою молекулярною масою, розкладаються швидше, порівняно з полімерами з довгими ланцюгами. Мікроби використовують біорозкладні полімери як субстрат при голодуванні та недоступності поживних речовин [40]. Одна з причин, через яку деградація пластику в даний час є темою екологічних досліджень, полягає в тому, що перетворення пластику на дрібні частинки може призвести до виділення токсичних хімічних сполук. Які можуть спричинити серйозні проблеми, такі як ендокринні порушення, метаболічні порушення та репродуктивна токсичність [41]. Пластмаси є високомолекулярними речовинами, які спочатку виявляють відносно невелику токсичність і не засвоюються організмом людини. Токсичними є добавки, яких додають під час переробки, або при синтезі. Мономери, з яких складаються і до яких розкладаються пластмаси, теж дуже токсичні [42]. На біорозкладання пластику впливає поєднання сукупності біотичних та абіотичних факторів. [43]. Утворення мікробної біоплівки є способом біодеградації полімеру. Вона спочатку формується мікроорганізмами лежить на поверхні пластику і називається пластисферою [44]. Біоплівки складаються з великої кількості мікроорганізмів, що беруть участь у деградації, що підвищує ефективність порівняно з одним видом мікроорганізмів. Чисті культури бактерій, виділені з більшості середовищ, показують, що бактерії мають різноманітність і функціональність. Види бактерій з рідів *Pseudomonas*, *Escherichia* і *Bacillus* мають величезний потенціал розкладання пластмас, особливо полімерів, що важко розкладаються, таких як поліетилен, полістирол. Крім того, було продемонстровано, що бактеріальні штами, такі як *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus megaterium*, *Rhodococcus ruber* та інші можуть руйнувати термопласти [45]. Ідентифіковані нитчасті гриби, *Z. maritimum*, здатні розкладати пластик, вони характеризуються потужною ферментативною системою. Грибкові дослідження біорозкладання макро- і мікропластика показали, що нитчасті гриби здатні використовувати ці матеріали як єдине джерело вуглецю та енергії [46]. З плаваючого пластикового сміття у субтропічному кругообігу у північній частині Тихого океану виділено гриб *Parangyodontium album*. Результати досліджень показують здатність *P. album* розкладати поліетилен у морському середовищі та мінералізувати її до  $\text{CO}_2$ . Початкова фотодеградація поліетилену має вирішальне значення метаболізму вуглецю, отриманого з поліетилену [47]. Морські гриби можуть розщеплювати складні

вуглецеві матеріали. На додаток до чотирьох видів, виявлених на даний момент, можлива ідентифікація інших видів, які також сприяють нейтралізації пластику та мікропластику. Потрібні подальші дослідження нових штамів із пластисферних екосистем. Мікробіологічна деградація пластмас являє собою процес розщеплення полімеру на більш короткі ланцюги або дрібніші молекули (наприклад, олігомери, димери та мономери). Полімери з малою молекулярною масою розкладаються на мономери, які можуть бути необхідні для росту мікробів. Мономери в клітинах мінералізуються в  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  (в аеробних умовах), і  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  і  $\text{CH}_4$  (в анаеробних умовах). Ознаки розкладання можуть бути визначені трьома технологічними критеріями: зміни структури пластику/мікропластику, фізична втрата маси пластику/МП та утворення метаболітів пластику/МП.

Ідентифіковано штами бактерій, які виявляють здатність деградації поліетилентерефталат. Вони відносяться до грамозитивного типу *Actinobacteria* [48] який включає рід *Thermobifida* та *Thermomonospora* [49]. Ідентифіковано бактерію *Ideonella sakaiensis* 201-F, яка використовує пластик як своє єдине джерело їжі. Виробництво двох ферментів із штаму здатне гідролізувати поліетилентерефталат, ефективно перетворюючи поліетилентерефталат на екологічно безпечні мономери [50]. До складу мікробіома кишечника борошняного хробака ідентифіковані дві таксономічні одиниці (OTU) (*Citrobacter* sp. та *Kosakonia* sp.) які мають потенціал хімічного розкладання пластиків з різною хімічною будовою. Необхідні подальші дослідження для використання кишкового мікробіома борошняних хробаків для біодеградації ФС [51].

При порівнянні швидкості біорозкладання, бактерій і грибів, виділених з одного і того ж звалища, показало, що гриби виявилися більш ефективними для розкладання поліетилену, ніж бактерії [52]. Використання грибкових та бактеріальних штамів окремо або у складі консорціуму ефективно розкладають пластик [53]. Дослідження та ідентифікація мікроорганізмів здатних біорозкладати пластик та мікропластик мають важливе значення для вдосконалення утилізації пластикових відходів та нейтралізації їх негативного впливу на навколишнє середовище. З цією метою необхідно удосконалювати процеси біодеградації пластику. Вплив на пластикових полімерів високою температурою, ультрафіолетовим опроміненням та каталіз мікробних ферментів можуть сприяти їхній ефективній біодеградації. Однак, враховуючи особливості подальшої деградації різних груп полімерів, необхідно досліджувати продукти розпаду деградації та їх вплив на довкілля.

Біорозкладанні пластики більш сприйнятливі до попередньої обробки, ніж традиційні пластики. Для них характерна відносно низька молекулярна маса, висока гнучкість і кілька функціональних груп у структурі молекул. Ці їх особливості зумовлюють

успішніший біорозклад. Останніми роками фотокаталіз як «зелений шлях» швидко розвивався [54]. Було виявлено, що хлорид заліза може каталізувати процес окисного розриву зв'язків пластику у присутності кисню та світлодіодної лампи з довжиною хвилі 400 нм [55]. Забруднення харчових продуктів пластиками, що не розкладаються, виключає або обмежує можливості їх переробки, а біорозкладні пластики, забруднені продуктами харчування, можуть бути компостовані до молекулярного походження [55]. Умови довкілля часто відрізняються від стандартних умов, за яких тестується розкладання пластику. Біорозкладання може бути менш ефективним. У порівнянні зі стандартами умов [56]. Часткове біорозкладання призводить до фрагментації біорозкладаного пластику на дрібніші частинки, які диспергують у ґрунтових та водних екосистемах, де умови можуть бути менш сприятливими для подальшого біорозкладання [57]. Їх часткова деградація збільшує виробництво нанопластиків, які піддаються ризику системного впливу на біосферу і здоров'я людини [58].

**Головні висновки.** Забруднення пластиком та МП є глобальною екологічною проблемою, що викликає серйозне занепокоєння людства, через його шкідливий вплив на біосферу та здоров'я людини. В результаті досліджень скупчень пластикових відходів у Світовому океані та на континентальних звалищах були ідентифіковані різні штами бактерій та нитчастих грибів, які здатні розкласти пластик та мікропластик. Виявлено, що полімери з довгими ланцюгами біорозкладаються на невеликі фрагменти, які вимагають більшої ферментативної активності протягом більш тривалого періоду часу. У процесі неповного біорозкладання фрагменти, що утворилися, асимілюються з мікроорганізмами. Біорозкладні пластики, які складаються з коротких ланцюгів і характеризуються низькою молекулярною масою, розкладаються швидше, порівняно з полімерами з довгими ланцюгами. Мікроби використовують біорозкладні полімери як субстрат при голодуванні та недоступності поживних речовин. На біорозкладання пластику впливає поєднання сукупності біотичних та абіотичних факторів.

Дослідження біорозкладання макро- і мікропластику під впливом грибків виявили, що нитчасті гриби здатні використовувати ці матеріали як єдине

джерело вуглецю та енергії. Результати отриманих досліджень мають важливе значення для нейтралізації забруднення планети пластиком та мікропластику.

Процес біодеградації біорозкладних пластик відбувається більш інтенсивно під впливом улітрофіоного опромінення та в термофільних умовах. Необхідно продовжити подальші дослідження для оптимізації ефективних ферментативних умов розкладання пластику та зосередитись на структурному аналізі відповідних ферментів та механізмах реакції для отримання бажаних результатів. Ідентифікація необхідного мікроорганізму для розкладання різних видів пластику має важливе значення. Опубліковано недостатня кількість поглиблених досліджень про біорозкладання, в яких можна розглядати процес розкладу залежно від домішок у пластмасах та ферментів у бактеріях. Недостатньо вивчено зазначені механізми, попередньої обробки для прискорення біорозкладання. Необхідно провести подальші дослідження для оптимізації ефективних ферментативних умов для розкладання пластику та зосередитись на структурному аналізі відповідних ферментів та механізмах реакції для отримання бажаних результатів. Дослідження з біодеградації пластику можуть допомогти зрозуміти процеси біосинтезу мікроорганізмів та їх потенціал для скорочення кількості пластику у навколишньому середовищі. Такі дослідження допоможуть розробити досконаліші ферменти для вирішення проблем, пов'язаних із пластиковими відходами.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Пластичні матеріали є синтетичними полімерами і тривалий час вважалося, що вони в біосфері не піддаються біодиструкції. Виявлення та ідентифікація мікроорганізмів, які розкладають пластик, мають значення для нашої планети. Ці відкриття дозволять удосконалити технологію упілізації пластикових відходів. Однак процес утворення МВР під час біорозкладання недостатньо вивчений, необхідні подальші дослідження їх потенційних екологічних наслідків. Також спостерігається нестача інформації про потенціал ферментів у розщепленні пластику ферментативним шляхом. Подальші дослідження дозволять розробити методи стійкого управління відходами, переглянути структуру стандартів тестування біорозкладності пластику та мікропластику.

### Література

1. R. E. Alcock and K. C. Jones Dioxins in the Environment: A Review of Trend Data, *Environmental Science & Technology*. 1996. V. 30. № 11, p. 3133–3143. doi: 10.1021/es960306z
2. Zhu, L., Zhao, S., Bittar, T. B., Stubbins, A., & Li, D. Photochemical dissolution of buoyant microplastics to dissolved organic carbon: rates and microbial impacts. *Journal of hazardous materials*, 2020, № 383, Article № 121065. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121065
3. Yoon, M. G., Jeon, H. J., & Kim, M. N. Biodegradation of polyethylene by a soil bacterium and AlkB cloned recombinant cell. *J Bioremed Biodegrad*, 2012, V. 3. № 4, p. 1–8. doi:10.4172/2155-6199.1000145
4. Commission Recommendation 2011/696/EU of 18 October 2011 on the definition of nanomaterial (OJ L 275, 20.10.2011, p. 38). <https://www.google.com/search?q=4>
5. Li, W. C., Tse, H. F., & Fok, L. Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects. *Science of the total environment*, 2016, V. 4 № 566, p. 333–349. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.084>

6. K. Ugwu, A. Herrera, M. Góme Microplastics in marine biota: a review *Mar. Pollut. Bull.*, 2021, № 169 Article № 112540. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112540
7. Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W., ... & Russell, A. E, Lost at sea: where is all the plastic? *Science*, 2004, V. 304. №.5672, p. 838–838. doi: 10.1126/science.1094559.
8. Carbery, M., O'Connor, W., & Palanisami, T. Trophic transfer of microplastics and mixed contaminants in the marine food web and implications for human health. *Environment international*, 2018, № 115, p. 400–409. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.03.007>
9. Under a Creative Commons. Degradation and lifetime prediction of plastics in subsea and offshore infrastructures *Science of The Total Environment* V. 904, № 15 2023, Article № 166719. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166719>
10. Anthony L. Andrady. Show more Microplastics in the marine environment *Marine Pollution Bulletin* 2011. V. 62, № 8, p. 1596–1605 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>
11. March, A., Roberts, K. P., & Fletcher, S. A new treaty process offers hope to end plastic pollution. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022. V. 3. (№.11), p. 726–727. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00361-1>
12. Morales-Caselles, C., Viejo, J., Martí, E., González-Fernández, D., Pragnell-Raasch, H., González-Gordillo, J. I., ... & Cózar, A. An inshore-offshore sorting system revealed from global classification of ocean 2021. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00720-8>
13. van Emmerik, T., Mellink, Y., Hauk, R., Waldschläger, K., & Schreyers, L. Rivers as plastic reservoirs. *Frontiers in Water*, 2022, № 3, p. 212. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.786936>
14. Haberstroh, C. J., Arias, M. E., Yin, Z., Sok, T., & Wang, M. C. Plastic transport in a complex confluence of the Mekong River in Cambodia. *Environmental Research Letters*, 2021. V. 16. № 9, Article № 095009. doi 10.1088/1748-9326/ac2198
15. Мария Киттнер et. al. Microplastics in the Danube River Basin: A First Comprehensive Screening with a Harmonized Analytical Approach *ACS ES&T Water* 2022, V. 2. № 7, p. 1174–1181. doi:10.1021/acsestwater.1c00439
16. Pojar, I., Stănică, A., Stock, F. et al. Sedimentary microplastic concentrations from the Romanian Danube River to the Black Sea. *Sci Rep* 2021, № 11, Article № 2000. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81724-4>
17. Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J. H., ... & Suh, S. (Degradation rates of plastics in the environment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020 V. 8, № 9, p. 3494–3511. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06635>.
18. Xinmiao Xu, Tao Li, Jiebo Zhen, et al. Characterization of Microplastics in Clouds over Eastern China *Environmental Science & Technology Letters American Chemical Society*. Jan 1, 2024. V. 11, № 1, p. 16–22. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.3c00729>
19. Tim H. M. van Emmerik, Daniel González-Fernández, Charlotte Laufkötter, Martin Blettler et al Focus on Plastics from Land to Aquatic Ecosystems, *Environ. Res. Lett.* 2023 V. 18. № 4. Article № 040401. doi 10.1088/1748 9326/ac086
20. Хенар Маргенат, Холли А. Нел, Суза Х. Стоундал, Стефан Краузе et al. Hydrologic controls on the accumulation of different sized microplastics in the streambed sediments downstream of a wastewater treatment plant (Catalonia, Spain). *Environmental Research Letters*, 2021. V. 16, № 11. Article № 115012. doi 10.1088/1748-9326/ac3179
21. Gabriel Enrique De-la-Torre, Carlos Ivan Pizarro-Ortega, Diana Carolina Dioses-Salinas, Md. Refat Jahan Rakib, et al. Plastic crusts: A new potential threat in the Anthropocene's rocky shores, *Science of The Total Environment*, 2019. № 687. p. 413–415. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.123>
22. Gabriel Enrique De-la-Torre e al. First record of plastiglomerates, pyroplastics, and plastic crusts in South America, *Science of The Total Environment* 2022, 833. № 10. Article № 155179. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155179>
23. Liuwei Wang, Deyi Hou, Plastistone: An emerging type of sedimentary rock, *Earth-Science Reviews* 2023, № 247. Article № 104620. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104620>
24. Silvia Franzellitti, Laura Canesi, Manon Auguste, Rajapaksha H.G.R. Wathsala, Elena Fabbri Microplastic exposure and effects in aquatic organisms: A physiological perspective *Environmental Toxicology and Pharmacology* 2019, V. 68, № 5, p. 37–51. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.03.009>
25. Agathe Bour, Ane Haarr, Steffen Keiter, Ketil Hylland Environmentally relevant microplastic exposure affects sediment-dwelling bivalves *Environmental Pollution*, 2018, V. 236, № 5, P. 652–660. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.006>
26. Alex Scott MICROPLASTICS All-consuming plastic Microplastics are showing up in our food and in our bodies. Is that a problem? *C&EN London C&EN*, 2019. V. 97. № 5, p. 28–33. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/cen-09705-cover>
27. Anqi Sun, Wen-Xiong Wang. Human Exposure to Microplastics and Its Associated Health Risks. *Environment & Health* 2023. V. 1. № 3, p. 139–149. <https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00053>
28. Weiliang Pan, Yi Zhou, Huimin Xie, Lin Liang, et al. Plant and microbial response in constructed wetland treating tetracycline antibiotic polluted water: Evaluating the effects of microplastic size and concentration *Chemosphere* 2024, № 353. Article № 141553. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141553>
29. Lei Lü, Yuan Liu, Yuhong Yang, Jinxing He, Lulu Luo, Shanbin Chen, and Hanzhu Xing Bisphenol A Exposure Interferes with Reproductive Hormones and Decreases Sperm Counts: A Systematic Review and Meta-Analysis of Epidemiological Studies *Toxics* 2024. V. 12. № 4. Article № 294. <https://doi.org/10.3390/toxics12040294>
30. Jingyu Qin, Xin Qi, Yuejiao Li, Zhuyun Tang, Xiaona Zhang, Shaoguo R et al., Bisphenols can promote antibiotic resistance by inducing metabolic adaptations and natural transformation *Journal of Hazardous Materials* 2024, V. 470. № 5. Article № 134149. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134149>
31. Yuzhou Huang, Xi Xiao, Caicai Xu, Yuvna Devi Perianen et al., Seagrass beds acting as a trap of microplastics – Emerging hotspot in the coastal region? *Environmental Pollution*, February 2020. V. 257. № 2 Article № 113450. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113450>
32. M. Eugenia Adaro, Ana C. Ronda Natural filters of marine microplastic pollution: implications for plants and submerged environments *Environmental Advances* 2024, V. 16. №.7. Article № 100535. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100535>
33. Hoi-Shing Lo, Xiaoyu Xu, Chun-Yuen Wong, Siu Gin Cheung Comparisons of microplastic pollution between mudflats and sandy beaches in Hong Kong *Environmental Pollution* 2018, V. 236. № 5, p. 208–217. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.031>

34. Xiaowei Li, Lubei Chen, Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China *Water Research* 2018, V. 142, № 10. p. 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.034>
35. Sarijan, S.; Azman, S.; Said, M. I. M.; Jamal, M. H. Microplastics in freshwater ecosystems: a recent review of occurrence, analysis, potential impacts, and research needs. *Environ. Sci. Pollut. R.* 2021, № 28, p. 1341–1356. doi:10.1007/s11356-020-11171-7
36. Prata, J.C.; da Costa, J.; Lopez, I.; Duarte, A.C.; Rocha-Santos, T. Environmental impacts of microplastics: a review of possible consequences for human health. *Sci. Total environment.* 2020, V. 702, № 10, Article № 134455. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134455
37. Bano, K., Kuddus, M., R Zaheer, M., Zia, Q., F Khan, M., Md Ashraf, G., ... & Aliev, G. Microbial enzymatic degradation of biodegradable plastics. *Current pharmaceutical biotechnology*, 2017, V. 18, № 5, p. 429–440. doi: <https://doi.org/10.2174/1389201018666170523165742>.
38. Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances*, 2017, V. 3, № 7, Article № 1700782. doi: 10.1126/sciadv.1700782.
39. Urbanek, A. K., Rymowicz, W., & Mirończuk, A. M. Degradation of plastics and plastic-degrading bacteria in cold marine habitats. *Applied microbiology and biotechnology*, 2018, V. 102, № 7, p. 7669–7678. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9195-y>
40. Narancic, T., & O'Connor, K. E. Plastic waste as a global challenge: are biodegradable plastics the answer to the plastic waste problem? *Microbiology*, 2019, V. 165, № 2, p. 129–137. <https://doi.org/10.1099/mic.0.000749>
41. Bin Zhou, Lixia Zhao, Yuebo Wang, Yang Sun, Xiaojing Li et al. Spatial distribution of phthalate esters and the associated response of enzyme activities and microbial community composition in typical plastic-shed vegetable soils in China. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2020, V. 195, № 6. Article № 110495. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110495>
42. Wright, S. L., & Kelly, F. J. Plastic and human health: a micro issue? *Environmental science & technology*, 2017, V. 51, № 12, p. 6634–6647. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00423>
43. Papadopoulou, A., Hecht, K., & Buller, R. Enzymatic PET degradation. *Chimia*, 2019, 73 (№ 9), p. 743–743. doi: <https://doi.org/10.2533/chimia.2019.743>
44. Anjana, K., et al. “Review on plastic wastes in marine environment—Biodegradation and biotechnological solutions”. *Marine Pollution Bulletin* 2020, V. 150, № 1. Article № 110733. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110733>
45. Amobonye, A.; Bhagwat, P.; Singh, S.; Pillai, S. Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes. *Sci. Total Environ.* 2021, V. 759, № 11 Article № 143536. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143536
46. Sánchez, C. Fungal potential for the degradation of petroleum-based polymers: An overview of macro- and microplastics biodegradation. *Biotechnology advances*, 2020, V. 40, № 6. Article № 107501. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.107501>.
47. A. Vaksmaa, H. Vielfaure, Biodegradation of polyethylene by the marine fungus *Parengyodontium album* *Science of The Total Environment* 2024, V. 934, № 6. Article № 172819. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172819>
48. Kawai, F., Kawabata, T., & Oda, M. Current knowledge on enzymatic PET degradation and its possible application to waste stream management and other fields. *Applied microbiology and biotechnology*, 2019, V. 103, № 4, p. 4253–4268. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-09717-y>
49. Hu, X., Thumarat, U., Zhang, X., Tang, M., & Kawai, F. Diversity of polyester-degrading bacteria in compost and molecular analysis of a thermoactive esterase from *Thermobifida alba* AHK119. *Applied microbiology and biotechnology*, 2010, V. 87, № 4, p. 771–779. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2555-x>
50. T., Shosuke Yoshida, Kazumi Hiraga, Toshihiko Takehana, Ikuo Taniguchi, et al., A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science*, 2016, V. 351, № 6278, p. 1196–1199. doi: 10.1126/science.aad6359
51. Brandon, A. M., Gao, S. H., Tian, R., Ning, D., Yang, S. S., Zhou, J., ... & Criddle, C. S. Biodegradation of polyethylene and plastic mixtures in mealworms (larvae of *Tenebrio molitor*) and effects on the gut microbiome. *Environmental science & technology*, 2018, V. 52, № 11, p. 6526–6533. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02301>
52. Muhonja, C. N., Makonde, H., Magoma, G., & Imbuga, M. Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. *PloS one*, 2018, V. 13, № 7, Article № e0198446. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198446>
53. Sridharan, R., Krishnaswamy, V. G., & Kumar, P. S. Analysis and microbial degradation of Low-Density Polyethylene (LDPE) in Winogradsky column. *Environmental Research*, 2021, V. 201, № 10, Article № 111646. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111646>.
54. Song, Y.K.; Hong, S.H.; Eo, S.; Shim, W.J. The fragmentation of nano- and microplastic particles from thermoplastics accelerated by simulated-sunlight-mediated photooxidation. *Environ. Pollut.* 2022, V. 311, № 10. Article № 119847. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119847>
55. Oh, S.; Stache, E.E. Chemical Upcycling of Commercial Polystyrene via Catalyst-Controlled Photooxidation. *J. Am. Chem. Soc.* 2022, V. 144, № 13. p. 5745–5749. <https://doi.org/10.1021/jacs.2c01411>
56. Helmberger, M. S., Tiemann, L. K., & Grieshop, M. J. Towards an ecology of soil microplastics. *Functional Ecology*, 2020, V. 34, № 3, p. 550–560. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13495>
57. Zhu, F., Zhu, C., Wang, C., & Gu, C. (2019). Occurrence and ecological impacts of microplastics in soil systems: A review. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2019, V. 102, № 6, Article № 741749. <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02623-z>
58. Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A., & Ahmed, S. Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances*, 2008, V. 26, № 3, p. 246–265. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005>