
ЕКОЛОГІЯ, ІХТІОЛОГІЯ ТА АКВАКУЛЬТУРА

ECOLOGY, ICHTHYOLOGY AND AQUACULTURE

УДК 504.54:631.4:631.95:339.9(4ЄС)

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.149.2.32>

МІКРОПЛАСТИК В АГРОЛАНДШАФТАХ: ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ТА СИСТЕМНІ ПІДХОДИ ДО СТАЛОГО УПРАВЛІННЯ

Криштоп Є.А. – к.с.-г.н.,

доцент кафедри екології та біотехнологій в рослинництві,

Державний біотехнологічний університет

orcid.org/0000-0002-2868-3101

У статті досліджено мікропластикове забруднення агроландшафтів як одну з ключових загроз екологічній безпеці ґрунтів, продовольчій безпеці та стійкості агроєкосистем. Метою роботи є системний аналіз джерел надходження мікропластику, оцінка пов'язаних екологічних ризиків та обґрунтування управлінських підходів на основі моделі DPSIR і ESG-концепції. Застосовано аналітичний підхід DPSIR (рушійні сили – тиск – стан – вплив – відгук), що дозволив структуровано відобразити причинно-наслідкові зв'язки формування мікропластикового забруднення в агроєкосистемах.

Встановлено, що основними шляхами надходження мікропластику до орних ґрунтів є мульчувальні полімерні плівки, осади стічних вод, добрива з полімерним покриттям, зрошення забрудненими водами та атмосферне осадження. Систематизовано екологічні ризики у межах DPSIR-підходу, які охоплюють зміну фізико-хімічних властивостей ґрунту, порушення мікробіологічних процесів, токсичний вплив на ґрунтову біоту та формування потенційних загроз для здоров'я людини через харчові ланцюги.

Проаналізовано регуляторні інструменти Європейського Союзу, зокрема REACH, Європейський зелений курс, План дії щодо циркулярної економіки та обмеження навмисно доданого мікропластику (2023), у контексті впровадження ESG-підходів у сільському господарстві. Обґрунтовано необхідність гармонізації природоохоронного законодавства України з нормами ЄС, розвитку систем моніторингу мікропластикового забруднення ґрунтів та переходу до альтернативних матеріалів.

Наукова новизна полягає у систематизації джерел і ризиків мікропластику в агроландшафтах у межах DPSIR-моделі, з інтеграцією DPSIR та ESG у єдину аналітичну рамку, а також у формуванні структурованої системи управлінських рішень (технологічних, агроєкологічних і регуляторних). Результати дослідження підтверджують доцільність інтеграції моніторингу мікропластику в систему сталого управління агроландшафтами.

Ключові слова: мікропластик, агроландшафти, ґрунтове забруднення, сталий розвиток, ESG, екологічна політика ЄС, DPSIR, екологічні ризики, управління відходами, мульчувальні плівки.

Kryshchop Ye.A. Microplastics in agricultural landscapes: assessment of environmental risks and systemic approaches to sustainable management

This study examines microplastic contamination of agricultural landscapes as a critical threat to soil environmental safety, food security, and the sustainability of agroecosystems. The aim of



© Криштоп Є.А., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

the paper is to provide a systematic analysis of microplastic input pathways, assess associated environmental risks, and substantiate management approaches based on the DPSIR framework and ESG concept. The DPSIR analytical model (Driving forces – Pressure – State – Impact – Response) is applied to structure causal relationships underlying the formation and propagation of microplastic contamination in agroecosystems.

The results indicate that the primary pathways of microplastic accumulation in arable soils include agricultural mulch films, sewage sludge application, polymer-coated fertilisers, irrigation with contaminated water, and atmospheric deposition. Environmental risks are systematised within the DPSIR framework, encompassing alterations in soil physicochemical properties, disruption of microbial processes, toxic effects on soil biota, and potential human health risks through food chain transfer.

The study further analyses key European Union regulatory instruments, including the REACH Regulation, the European Green Deal, the Circular Economy Action Plan, and the 2023 restriction on intentionally added microplastics, in the context of ESG-based agricultural management. The necessity of harmonising Ukrainian environmental legislation with EU standards, developing monitoring systems for soil microplastic contamination, and promoting alternative materials in agriculture is substantiated.

The scientific novelty lies in the systematisation of microplastic sources and environmental risks in agricultural landscapes within the DPSIR framework, through the integration of DPSIR and ESG into a unified analytical framework, as well as in the development of a structured system of management solutions (technological, agroecological, and regulatory). The findings support the integration of microplastic monitoring into sustainable agricultural landscape management systems.

Key words: *microplastics, agricultural landscapes, soil contamination, sustainable development, ESG, EU environmental policy, DPSIR, environmental risks, waste management, plastic mulch.*

Постановка проблеми. Пластикові матеріали стали невід’ємною частиною сучасного агровиробництва: мульчувальні плівки, теплиці, упаковка, покриття для добрив – усі вони зрештою розпадаються на дрібні фрагменти, відомі як мікропластик. Виробництво пластмас у світі демонструє стабільну динаміку зростання, що суттєво випереджає середньорічні темпи зростання світового ВВП. За прогнозами, до 2050 року в навколишнє середовище може потрапити понад 12 000 млн т пластикових відходів [1, 2], з яких значна частка осяде в ґрунтового покриві агроєкосистем.

Мікропластик (МП) – синтетичні тверді пластикові частинки або полімерні матриці розміром від 1 мкм до 5 мм [3] – визнаний новим типом глобального забруднення довкілля, що активно досліджується у морських, прісноводних та наземних екосистемах [4].

Агроландшафти є ключовими акумуляторами мікропластику: за оцінками окремих досліджень, значна частка пластикових відходів на суші прямо чи опосередковано потрапляє в ґрунтове середовище [5]. На відміну від морських та прісноводних систем, забруднення ґрунтового середовища МП до останнього часу залишалося в тіні наукового дискурсу, попри очевидну пряму загрозу продовольчій безпеці та стійкості земельних ресурсів.

Проблема мікропластикового забруднення агроландшафтів тісно пов’язана з Цілями сталого розвитку ООН, передусім ЦСР 12 (відповідальне споживання), ЦСР 13 (дії у сфері клімату) та ЦСР 15 (захист екосистем суші). У контексті євроінтеграції України та гармонізації екологічного законодавства з нормами ЄС розробка науково обґрунтованих управлінських рішень набуває особливої актуальності [6].

У наших попередніх дослідженнях [7] розглянуто окремі аспекти впливу мікропластику, зокрема його здатність виступати носієм небезпечних хімічних

речовин. Також звернуто увагу на проблеми аналітичного визначення мікропластику, що може зумовлювати недооцінку рівня його поширення в агроєкосистемах. Це обґрунтовує необхідність переходу від фрагментарного вивчення проблеми до її системного аналізу, зокрема в контексті оцінки екологічних ризиків та розробки ефективних управлінських рішень для агроландшафтів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові дослідження мікропластикового забруднення агроєкосистем набувають усе більшої інтенсивності. Ng et al. [8] систематично проаналізували шляхи потрапляння МП до ґрунтів сільськогосподарських угідь і показали, що концентрація МП у ґрунтах, які зазнали тривалого внесення осадів стічних вод, може в десятки разів перевищувати фонові значення. Серед розмаїття полімерних забруднювачів агроґрунтів переважають поліетилен (PE), поліпропілен (PP), полістирен (PS) та полівінілхлорид (PVC) – матеріали, що широко застосовуються в агрохімічній упаковці та мульчувальних плівках [9].

Lambert et al. [5] показали, що МП здатний до адсорбції широкого спектра органічних та неорганічних забруднювачів, стаючи вектором їх перенесення до організмів ґрунтової біоти та рослин. Дослідження Vethaak & Legler [10] акцентують увагу на здатності МП порушувати ендокринний баланс живих організмів навіть за відносно невисоких концентрацій.

Schell et al. [11] на підставі метааналізу дійшли висновку, що сучасний рівень знань про екотоксикологічні ефекти МП у ґрунтових системах залишається фрагментарним: більшість досліджень зосереджені на окремих видах полімерів або специфічних лабораторних умовах, що ускладнює перенесення результатів на польові масштаби. Зазначена наукова прогалина виступає ключовим обґрунтуванням необхідності систематичних польових досліджень та уніфікації методологічних підходів до моніторингу МП в агроєкосистемах.

Попри зростання кількості публікацій, низка ключових аспектів залишається недостатньо дослідженою. Відсутність стандартизованих методик відбору та аналізу МП у ґрунтах ускладнює порівняння результатів, в Україні бракує системної бази даних щодо МП-забруднення, а інтеграція цієї проблематики в ESG-управління здебільшого залишається формальною через відсутність чітких індикаторів. Водночас, попри запровадження регулювання ЄС (2023), ефективні механізми контролю потоків вторинного МП в агросекторі досі відсутні.

Метою статті є системний аналіз екологічних ризиків мікропластикового забруднення агроландшафтів та обґрунтування управлінських інструментів на основі аналітичної моделі DPSIR і ESG-підходу у контексті діючих і перспективних політик ЄС.

Виклад основного матеріалу. 1. Джерела та шляхи надходження мікропластику в агроєкосистеми. Мікропластик потрапляє до ґрунтового середовища агроландшафтів кількома основними шляхами, які умовно поділяють на прямі (пов'язані безпосередньо з агровиробничими практиками) та непрямі (зумовлені процесами в суміжних середовищах).

Найбільш значущим прямим джерелом є мульчувальні плівки (переважно PE), фрагментація яких під дією ультрафіолетового випромінювання та механічних впливів призводить до накопичення значних кількостей МП у верхніх горизонтах ґрунту [2]. Внесення осадів стічних вод (ОСВ) як органічного добрива є другим за значущістю вектором: одна тонна ОСВ може містити від 1 000 до 24 000 частинок МП [8]. Добрива з полімерним покриттям (*controlled release fertilisers*) забезпечують контрольоване вивільнення поживних речовин, однак самі оболонки

залишаються в ґрунті [6, 8]. Зрошення водами, що містять МП, є поширеним шляхом у регіонах із активним поверхневим водовідведенням. Атмосферне осадження забезпечує додаткове надходження МП з повітряних мас, що набуває особливого значення поблизу промислових зон [12]. Основні джерела надходження мікропластику в агроландшафти та їх відносний рівень ризику узагальнено в таблиці 1.

Таблиця 1

Основні джерела мікропластику в агроландшафтах

Джерело	Тип полімеру	Шлях потрапляння	Відносний ризик
Мульчувальні плівки	PE, PP, PVC	Фрагментація in situ	Дуже високий
Осади стічних вод	PE, PP, PS, PET, PA	Внесення як добриво	Дуже високий
Покриття добрив	Полімерні еластомери	Розпад оболонки в ґрунті	Середній
Теплиці та агроволокно	PE, PP, PES	Фрагментація, вивітрювання	Високий
Зрошувальні води	Різнорманітні	Зрошення	Середній–Високий
Атмосферне осадження	Різнорманітні	Аеродепозиція	Низький–Середній

Джерело: складено автором на основі [8, 9, 12, 13]

2. Екологічні ризики мікропластикового забруднення: аналіз у рамках DPSIR. Аналітична модель DPSIR (*Driving forces – Pressure – State – Impact – Response*), запропонована Європейським агентством з довкілля [14], дозволяє структурувати причинно-наслідкові зв'язки між діяльністю людини та деградацією екосистем у контексті мікропластикового забруднення агроландшафтів. Рушійними силами (D) є зростаюче споживання пластику в агросекторі та неефективне управління відходами. Тиск (P) полягає у надходженні МП до ґрунтового середовища через описані вище вектори. Стан (S) характеризується кількісними показниками концентрації МП в орних горизонтах, зміною фізичних та біологічних властивостей ґрунту.

2.1 Ризики для ґрунтового середовища. Механічна присутність МП у ґрунті змінює його агрегатну структуру, порозність, здатність утримувати воду та аерацію, що безпосередньо впливає на продуктивність агроценозів [8]. Дослідження показують, що навіть відносно низькі концентрації мікропластику (у межах часток відсотка маси ґрунту) здатні суттєво змінювати водоутримувальну здатність і структурну стабільність ґрунту [15].

Особливо вразливим до МП є мікробний ценоз ґрунту. МП змінює видовий склад та функціональну активність мікроорганізмів, що зумовлює уповільнення деструкції органічної речовини, порушення азотного циклу та зниження ферментативної активності. Lambert et al. [5] встановили пригнічення активності ґрунтових ферментів (дегідрогенази, уреаз, фосфатаз) за концентрацій МП у діапазоні, що реально спостерігається в агроґрунтах. Крім того, поверхня МП-частинок є сприятливим субстратом для формування специфічних мікробних угруповань – так званого «пластисфери», яка може включати патогенні мікроорганізми та сприяти поширенню генів антибіотикорезистентності [11].

2.2 Ризики для біоти. Мікропластик виступає як вектор перенесення забруднювачів: його поверхня активно адсорбує стійкі органічні забруднювачі (СОЗ),

важкі метали, гербіциди та пестициди, підвищуючи їх біодоступність для ґрунтових організмів [5]. Дощові черв'яки, ногохвістки та нематоди демонструють пряму токсичну реакцію на МП: зниження виживаності, репродуктивні порушення, гістопатологічні зміни [8]. На рівні рослин задокументовано затримку проростання насіння, пригнічення росту коренів, зниження засвоєння поживних речовин та накопичення МП у тканинах коренів і, в окремих випадках, – у надземних органах, що принципово важливо з точки зору харчового ланцюга [8]. Дослідження Vethaak & Legler [10] підтверджують, що мікро- та нанопластикові частинки здатні порушувати ендокринну регуляцію як у ґрунтових безхребетних, так і у вищих рослин.

2.3 Ризики для здоров'я людини. Агроландшафти є елементом харчового ланцюга, тому МП у ґрунті неминуче опиняється в рослинній продукції та, в кінцевому підсумку, – у раціоні людини. Ризик посилюється роллю МП як вектора перенесення хімічних домішок: пластифікатори (фталати, бісфенол А), антиоксиданти, барвники та поверхнево-активні речовини здатні вивільнятися з полімерної матриці та засвоюватися організмом людини [10].

Мікропластик може виконувати функцію транспортного носія небезпечних для людини хімічних речовин, сприяючи їх перенесенню та потенційному проникненню в живі організми – цей висновок узгоджується з результатами сучасних екотоксикологічних досліджень [4, 10, 11]. Виявлення мікропластику у кров'яному руслі людини, легеневій тканині та плаценті у наукових дослідженнях останніх років свідчить про потенційну системну загрозу здоров'ю населення через харчові ланцюги та інші шляхи надходження [10]. Систематизацію екологічних ризиків мікропластику в межах DPSIR-підходу представлено в таблиці 2.

3. ESG-контекст управління мікропластиковим забрудненням. Концепція ESG (*Environmental, Social, Governance*) трансформує проблему мікропластику з суто екологічної у комплексну управлінську задачу, що охоплює три взаємопов'язані виміри.

В екологічному вимірі (E) МП є індикатором якості ґрунтового покриву та деградації агроєкосистем. Включення кількісних показників МП-забруднення до систем екологічної звітності підприємств агропромислового комплексу є обґрунтованим кроком у напрямку реальної оцінки екологічного сліду виробника.

Соціальний вимір (S) охоплює безпечність харчових продуктів, доступ населення до незабрудненого продовольства та ризики для здоров'я, зумовлені наявністю МП у харчовому ланцюзі.

Управлінський вимір (G) охоплює систему регуляторних норм, прозорість звітності, стандартизацію підходів до моніторингу та контроль виробничих практик, що генерують мікропластик.

У контексті ESG-підходів мікропластикове забруднення агроландшафтів виступає не лише як фізичний забруднювач, а як складний екотоксикологічний фактор, що інтегрує механічні, хімічні та біологічні ризики. Впровадження ESG-стандартів у стратегії управління агровиробництвом сприятиме підвищенню прозорості ланцюгів постачання, зниженню кількості пластикових відходів і ефективній інтеграції у загальноєвропейські регуляторні системи.

4. Регуляторна база ЄС: інструменти обмеження МП. Європейський Союз сформував комплексну систему регуляторних інструментів для обмеження мікропластикового забруднення.

Таблиця 2

Матриця екологічних ризиків мікропластику в агроландшафтах (DPSIR)

Компонент DPSIR	Елемент	Прояв у ґрунтах	Прояв у біоті/людині	Наслідки
Рухливі сили (D)	Інтенсифікація використання пластику, агротехнології	Зростання навантаження на ґрунти	Підвищення потенційного впливу на харчовий ланцюг	Формування джерел забруднення
Тиск (P)	Надходження МП	Забруднення орних горизонтів	Підвищення фонових концентрацій у харчовому ланцюзі	Деградація ґрунту
Стан (S)	Зміна властивостей ґрунту	Порушення структури, вологості, мікробіоти	Зниження продуктивності рослин	Зниження врожайності
Вплив (I)	Токсичний ефект	Пригнічення ферментативної активності, токсикоз	Накопичення МП у рослинній продукції та організмі людини	Загроза здоров'ю
Відгук (R)	Управлінські рішення	Регуляторні норми, моніторинг, альтернативні матеріали	ESG-стратегії, заборони ЄС, стимули	Зниження забруднення

Джерело: розроблено автором на основі [6, 8, 10, 14]

Регламент REACH (*Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals*) закладає юридичну основу для контролю хімічних ризиків, пов'язаних із компонентами пластику [16]. Зелений курс ЄС (*European Green Deal*) визначає амбітні цілі декарбонізації та переходу до циркулярної економіки, у рамках яких скорочення пластикових відходів є стратегічним пріоритетом [17]. Циркулярна економіка як ключовий принцип політики ЄС, зокрема в межах Плану дій щодо циркулярної економіки (*Circular Economy Action Plan*), передбачає мінімізацію первинного використання полімерів та перехід до замкнутих циклів поводження з матеріалами [18].

Особливо важливим є Регламент ЄС 2023/2055, що запровадив обмеження на навмисне додавання МП до виробів та суміщення його з іншими речовинами. Згідно з цим документом, тепер в ЄС заборонено продаж мікропластику та продуктів, до яких його спеціально було додано, а до 2030 р. ЄС зобов'язався скоротити на 30 % кількість відходів із вмістом МП. Стратегія «від ферми до виделки» (*Farm to Fork Strategy*) як частина Зеленого курсу безпосередньо адресує проблему безпечності харчового виробництва та якості ґрунтів, де питання МП набуває центрального місця [19].

Для України курс на євроінтеграцію вимагає системної гармонізації з наведеними вище нормами. Наразі в країні відсутні стандарти моніторингу МП у ґрунтах сільськогосподарського призначення, не встановлені граничні допустимі концентрації МП у ґрунтах та осадах стічних вод, а регулювання мульчувальних плівок залишається на рівні загальних норм поводження з відходами.

5. Управлінські рішення: технологічні, агроекологічні та регуляторні інструменти. Ефективне управління мікропластиком потребує інтеграції політик ЄС, технологічних рішень та змін агровиробничих практик. Запропонована структура управлінських рішень охоплює три взаємодоповнюючі блоки.

5.1 Технологічні рішення. Піроліз є одним із найбільш перспективних термохімічних методів переробки пластикових відходів, що дозволяє отримувати значні виходи рідкого палива та інших цінних продуктів, при цьому ефективно контролюючи склад утворених сполук і знижуючи екологічні ризики процесу [20].

Дослідники *Woods Hole Oceanographic Institution* розробили метрику сталості для екодизайну пластикових виробів, яка враховує швидкість їх деградації в довкіллі на стадії проєктування. Застосування такого підходу може забезпечити значні суспільні вигоди, що, за оцінками авторів, для окремих споживчих продуктів можуть досягати сотень мільйонів доларів [21].

Особливого значення набуває розробка біорозкладних альтернатив полімерним матеріалам: рослинний полімер на основі мікрководоростей продемонстрував повну біодеградацію в природних умовах із проходженням стадії мікропластику протягом кількох місяців [22]. Впровадження таких матеріалів у сільськогосподарську практику потребує розвитку ринкових стимулів і відповідної регуляторної підтримки.

5.2 Агроекологічні рішення. На рівні агровиробничих практик ключовими інструментами є: перехід від одноразових полімерних мульчувальних плівок до біорозкладних альтернатив або механічних методів захисту ґрунту; скорочення та регулювання застосування ОСВ як добрива з обов'язковим попереднім контролем вмісту МП; запровадження систем фільтрації зрошувальних вод у зонах підвищеного ризику МП-забруднення; регламентація утилізації агропластику з облаштуванням організованих пунктів збору та переробки.

5.3 Регуляторні та управлінські рішення. На державному рівні необхідним є: розроблення стандартів аналітичного визначення МП у ґрунтах і продукції рослинництва; встановлення граничних концентрацій у ґрунтах сільськогосподарського призначення; включення моніторингу МП до системи агроекологічного контролю; стимулювання переходу до ESG-звітності з показниками МП-забруднення. На корпоративному рівні агровиробники мають впроваджувати моніторинг, скорочувати споживання пластику та звітувати про рівні МП у межах ESG-розкриття.

Висновки. Агроландшафти є ключовими акумуляторами мікропластику в наземних екосистемах, де основними джерелами його надходження виступають агротехнологічні практики та пов'язані з ними матеріальні потоки. Систематизація ризиків у межах DPSIR-підходу дозволила встановити взаємопов'язані рівні впливу, що охоплюють деградацію ґрунтових властивостей, токсичні ефекти для біоти та формування ризиків для здоров'я людини через харчові ланцюги. Встановлено, що мікропластик може виступати носієм ксенобіотиків, посилюючи його екотоксикологічне значення. Аналіз регуляторної політики ЄС засвідчив наявність базових механізмів обмеження мікропластикового забруднення, однак виявив потребу їх адаптації до специфіки агросектору та розвитку систем моніторингу.

Для України гармонізація з європейськими підходами є критичною передумовою формування ефективної системи управління мікропластиком. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку стандартизованих методів оцінки, кількісну інтерпретацію екологічних та економічних ефектів, а також інтеграцію відповідних показників у системи сталого управління.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Plastics Europe. Plastics – the Facts 2022. An analysis of European plastics production, demand and waste data. Brussels: Plastics Europe, 2022. 64 p.
2. Geyer R., Jambeck J. R., Law K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*. 2017. Vol. 3, No. 7. e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
3. Boucher J., Friot D. Primary Microplastics in the Oceans: A Global Evaluation of Sources. Gland, Switzerland: IUCN, 2017. 43 p. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2017.01.en>
4. Auta H. S., Emenike C. U., Fauziah S. H. Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions. *Environment International*. 2017. Vol. 102. P. 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.02.013>
5. Lambert S., Sinclair C., Boxall A. Occurrence, degradation, and effect of polymer-based materials in the environment. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 2014. Vol. 227. P. 1–53. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01327-5_1
6. Laskar N., Kumar U. Plastics and microplastics: A threat to environment. *Environmental Technology & Innovation*. 2019. Vol. 14. P. 100352. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100352>
7. Криштоп Є. А. Мікропластикове забруднення як загроза стійкості екосистем: глобальні наслідки і сталі рішення. Актуальні питання біотехнології, екології та природокористування: матеріали конф. Харків: ДБТУ, 2024. С. 165–168. <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/56647>
8. Ng E. L., Lwanga E. H., Eldridge S. M., Johnston P., Hu H. W., Geissen V., Chen D. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems and its implications for the agri-food system. *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 627. P. 1377–1388. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>
9. Huang Y., Liu Q., Jia W., Yan C., Wang J. Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment. *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 260. P. 114096. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114096>
10. Vethaak A. D., Legler J. Microplastics and human health. *Science*. 2021. Vol. 371, No. 6530. P. 672–674. <https://doi.org/10.1126/science.abe5041>
11. Schell T., Rico A., Vighi M. Occurrence, fate and fluxes of plastics and microplastics in terrestrial and freshwater ecosystems. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. Springer, New York, 2020. P. 1–68.
12. Bläsing M., Amelung W. Plastics in soil: Analytical methods and possible sources. *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 612. P. 422–435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.099>
13. Zhang Y., Kang S., Allen S., Allen D., Gao T., Sillanpää M. Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives. *Earth-Science Reviews*. 2020. Vol. 203. P. 103118. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103118>
14. European Environment Agency. DPSIR Framework. Copenhagen: EEA, 2022. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/92-9167-059-6-sum>
15. de Souza Machado A. A., Lau C. W., Kloas W., Bergmann J., Bachelier J. B., Faltin E., Becker R., Görlich A. S., Rillig M. C. Microplastics can change soil properties and affect plant performance. *Environmental Science & Technology*. 2018. Vol. 52, No. 17. P. 9656–9665. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01339>
16. European Chemicals Agency (ECHA). Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH). Helsinki: ECHA, 2023. URL: <https://echa.europa.eu/regulations/reach>
17. European Commission. A European Green Deal: Striving to be the first climate-neutral continent. Brussels: EC, 2019. URL: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

18. European Commission. A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe. Brussels: EC, 2020. URL: <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/>

19. European Commission. Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. Brussels: EC, 2020. URL: https://ec.europa.eu/food/horizontal-topics/farm-fork-strategy_en

20. Rahman M. H., Bhoi P. R., Menezes P. L. Pyrolysis of waste plastics into fuels and chemicals: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 188. 113799. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113799>

21. James B. D., Ward C. P., Hahn M. E., Thorpe S. J., Reddy C. M. Minimizing the environmental impacts of plastic pollution through ecodesign of products with low environmental persistence. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 3. P. 1185–1194. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c05534>

22. Allemann M. N., Tessman M., Reindel J. et al. Demonstration of complete biodegradation of a biobased acrylate polymer via microplastic intermediates in seawater. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. 6036. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56207-9>

Дата першого надходження статті до видання: 02.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026