

ДОПОВІДЬ

МІКРОПЛАСТИК
І НАНОПЛАСТИК

НАНОПЛАСТИК У БІОСФЕРІ

ВІД МОЛЕКУЛЯРНОГО ВПЛИВУ
ДО ПЛАНЕТАРНОЇ КРИЗИ



ДОПОВІДЬ

НАНОПЛАСТИК У БІОСФЕРІ

ВІД МОЛЕКУЛЯРНОГО ВПЛИВУ
ДО ПЛАНЕТАРНОЇ КРИЗИ

АВТОРИ



Міжнародний громадський рух «АЛЛАТРА»

ІНСТИТУЦІЙНИЙ ОГЛЯД Академічна співпраця



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
BOLIVIANA

Болівійський Католицький Університет «Сан-Пабло» (UCB)
Факультет екологічної інженерії та наукових досліджень



DICYT
Departamento de Investigación,
Ciencia y Tecnología - UAJMS.

Автономний Університет імені Хуана Місаеля Сарачо (UAJMS)
Департамент досліджень, науки і технологій

НАУКОВИЙ ПАРТНЕР



**CREATIVE
SOCIETY**

Міжнародний проєкт «Благотворче суспільство»

ЗМІСТ

Анотація	5
Наслідки пластикового забруднення: мікро- й нанопластик (МНП) як новий фактор планетарної кризи	7
Кількісні оцінки та тенденції глобального виробництва пластикових відходів.....	7
Великий тихоокеанський сміттєвий континент.....	12
Процеси формування мікро- та наночастинок пластику.....	12
Поширення МНП у навколишньому середовищі.....	18
Екологічні та кліматичні наслідки забруднення мікро- та нанопластиком	23
Як МНП руйнує екосистеми на молекулярному рівні.....	23
Вплив МНП на клімат	46
Вплив мікро- та нанопластику на здоров'я людини	71
МНП як новий фактор ризику розвитку епідемій ХХІ століття.....	71
Молекулярні механізми токсичності МНП.	
Пошкодження ДНК, мітохондрій та клітинних мембран.....	72
Участь МНП у механізмах передчасного старіння та онкогенезу.....	84
Дестабілізація гормональної системи під впливом МНП.....	87
Електростатичний заряд нанопластику як ключовий фактор його підвищеної токсичності для організму людини.....	93
Системний вплив МНП на органи та функціональні системи людини.....	100
Механізми ураження дихальної системи при вдиханні МНП.....	101
Нейротоксична дія МНП. Ураження центральної та периферичної нервової системи.....	102
Участь МНП у патогенезі серцево-судинних захворювань.....	114
Порушення функцій шлунково-кишкового тракту, зумовлене МНП.....	116
Вплив МНП на імунну систему.....	117
Онкогенна дія МНП. Механізми мутацій та розвитку метастазів.....	120
Вплив МНП на обмін кальцію та структуру кісток.....	121
Репродуктивні розлади, асоційовані з впливом МНП.	
Безпліддя та еректильна дисфункція.....	122
Проникнення МНП через плацентарний бар'єр і його вплив на організм, що розвивається.....	126
Наслідки впливу МНП і його зв'язок із вродженими аномаліями.....	130
Висновки та перспективи. Чи можливо знизити вплив МНП на здоров'я людини?.....	133
Аналіз сучасних підходів до мінімізації пластикового забруднення	134
Технології видалення великого пластику з водних екосистем.....	134
Поточні методи очищення від мікро- та нанопластику.....	139
Підходи наукової спільноти «АЛЛАТРА» до боротьби з епідемією мікро- та нанопластику	142
Технології атмосферних генераторів води (АГВ) для очищення океану від МНП.....	142
Інноваційний науковий підхід до зниження токсичності мікро- та нанопластику.....	148
Фактор Х. Вплив мікро- та нанопластику на динаміку циклу природних катаклізмів	151
Висновки. Нанопластик — виклик, який не можна ігнорувати	171
Джерела	173

АНОТАЦІЯ

«Якби Земля вела щоденник, про останнє століття вона б написала чорним чорнилом: “Епоха пластику”».

Від мікроскопічних частинок, що проникають у клітини живих організмів, до гігантських смітєвих островів в океані — пластик став невід’ємною частиною геологічного літопису. Але якою ціною?

Щорічно у світі виробляється понад 400 мільйонів тонн пластикових відходів, з яких близько 11 мільйонів тонн потрапляють у Світовий океан. В океані вже накопичено понад 200 мільйонів тонн пластику. Аналіз зразків поверхневих вод виявив, що маса пластику перевищує масу зоопланктону в 6 разів. За прогнозами, до 2050 року маса пластику в океані перевищить масу риби.

Пластик розкладається протягом сотень або навіть тисяч років, але під впливом хвиль, солоної води та ультрафіолетових променів він розпадається на дрібні частинки — мікро- й нанопластик. Вони переносяться на тисячі кілометрів морським повітрям і опадами, перетинаючи країни, континенти й океани, накопичуються в лісах і присутні в їжі та воді. Мікропластик проник навіть у найвіддаленіші куточки планети, такі як Маріанська западина і вершина Евересту.

У цій доповіді представлено глибоку аналітичну оцінку впливу пластикового забруднення на навколишнє середовище, здоров’я людини та стійкість життєво важливих систем суспільства. Доповідь досліджує вплив мікро- й нанопластику, що має статичний заряд і містить токсичні хімічні сполуки, на екосистеми. Особливий акцент зроблено на його ролі в закисленні океану, дестабілізації харчових ланцюгів і загрозі біорізноманіттю. Висувається гіпотеза про вплив мікро- й нанопластику на зміну властивостей води, внаслідок чого відбувається прискорене нагрівання океану і посилюються природні катаклізми.

Однією з найактуальніших і найтривожніших проблем, що розглядаються в доповіді, є вплив мікро- й нанопластику (МНП) на здоров’я людини. Пластикові частинки, через свої малі розміри, здатні долати біологічні бар’єри, спричиняючи окислювальний стрес, ушкодження ДНК, запальні реакції та порушення клітинних функцій. Особлива увага приділяється потенційній кореляції між впливом МНП та збільшенням поширеності нейродегенеративних і нейропсихічних захворювань. У доповіді показано, що вплив МНП на організм, що розвивається, в пренатальний і постнатальний періоди призводить до порушень когнітивних функцій та психічного здоров’я, що становить серйозну проблему для майбутнього людства.

Зростання кількості захворювань, викликаних впливом мікро- й нанопластику, вже сьогодні помітно погіршує якість життя населення, особливо в регіонах із високим рівнем пластикового забруднення.

У доповіді окреслено регіони, які вже зараз належать до зон підвищеної небезпеки, а також ті, які поки що залишаються відносно безпечними. Погіршення ситуації в поєднанні з відсутністю ефективних методів захисту від цього впливу може змусити людей залишати забруднені території в пошуках безпечніших умов для життя. Це створить передумови для неконтрольованої масової міграції, що, своєю чергою, може посилити соціальну напруженість, підвищити навантаження на міські інфраструктури та дестабілізувати економіку.

Отже, екологічна проблема пластикового забруднення поступово переросте в макроекономічну та геополітичну.

Доповідь акцентує увагу на необхідності вирішення проблеми мікропластику, пропонуючи новий погляд на його поширення, вплив і наслідки цього. Унікальність роботи полягає в міждисциплінарному підході, що об'єднує дані про фізичні, хімічні та біологічні аспекти пластикового забруднення. Це робить доповідь актуальною для дослідників і вчених широкого кола дисциплін, зацікавлених у розробці стійких рішень для безпечного майбутнього людства і планети.

НАСЛІДКИ ПЛАСТИКОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ: МІКРО- Й НАНОПЛАСТИК (МНП) ЯК НОВИЙ ЧИННИК ПЛАНЕТАРНОЇ КРИЗИ

Пластик став невід'ємною частиною сучасного життя. Пакування, посуд, одяг, взуття, предмети гігієни, медичні вироби, транспорт і засоби зв'язку — більшість предметів, що оточують людину, виготовлені із пластику. Однак він існує не лише у вигляді великих об'єктів, а й також у формі мікроскопічних частинок, що виділяються з цих виробів, — мікро- та нанопластику. Мікропластик — це частинки пластику розміром менше ніж 5 мм, які можуть бути помітні неозброєним оком. Нанопластик, навпаки, має розміри менше 1 мкм (однієї мільйонної метра), через що більшість таких частинок неможливо побачити навіть під стандартним мікроскопом.

Пластикові матеріали представлені безліччю типів, але всі вони засновані на полімерах — природних або синтетичних сполуках, що складаються з крупних молекул, пов'язаних між собою. Завдяки унікальним хімічним властивостям полімери відрізняються високою довговічністю і стійкістю до впливу.

Отже, пластик, завдяки своїй міцності, універсальності та низькій собівартості, став основним матеріалом для масового виробництва, включно з одноразовими предметами¹. Але неправильне поводження з пластиковими відходами зробило пластик найзначнішим за обсягом забруднювачем довкілля у світі.

Кількісні оцінки та тенденції глобального виробництва пластикових відходів

З 1950-х років у світі було вироблено близько 9,2 млрд тонн пластику. З них наразі використовується 2,9 млрд тонн, включно з 2,7 млрд тонн первинного пластику і близько 0,2 млрд тонн переробленого матеріалу. 5,3 млрд тонн опинилося на звалищах, а 1 млрд тонн було спалено. Також відомо, що 1,75–2,5 млрд тонн вважаються «неправильно керованими», що означає, що вони можуть неконтрольовано потрапляти в навколишнє середовище (рис. 1).

¹Karlsruhe Institute of Technology. Blind spots in the monitoring of plastic waste
https://www.kit.edu/kit/english/pi_2022_097_blind-spots-in-the-monitoring-of-plastic-waste.php (Дата доступу: 01.05.2025)

На сьогодні у пластикові вироби було додано близько 640 млн тонн додаткових хімікатів². За даними UNEP³, щорічно у світі виробляється понад 400 млн тонн пластикових відходів.

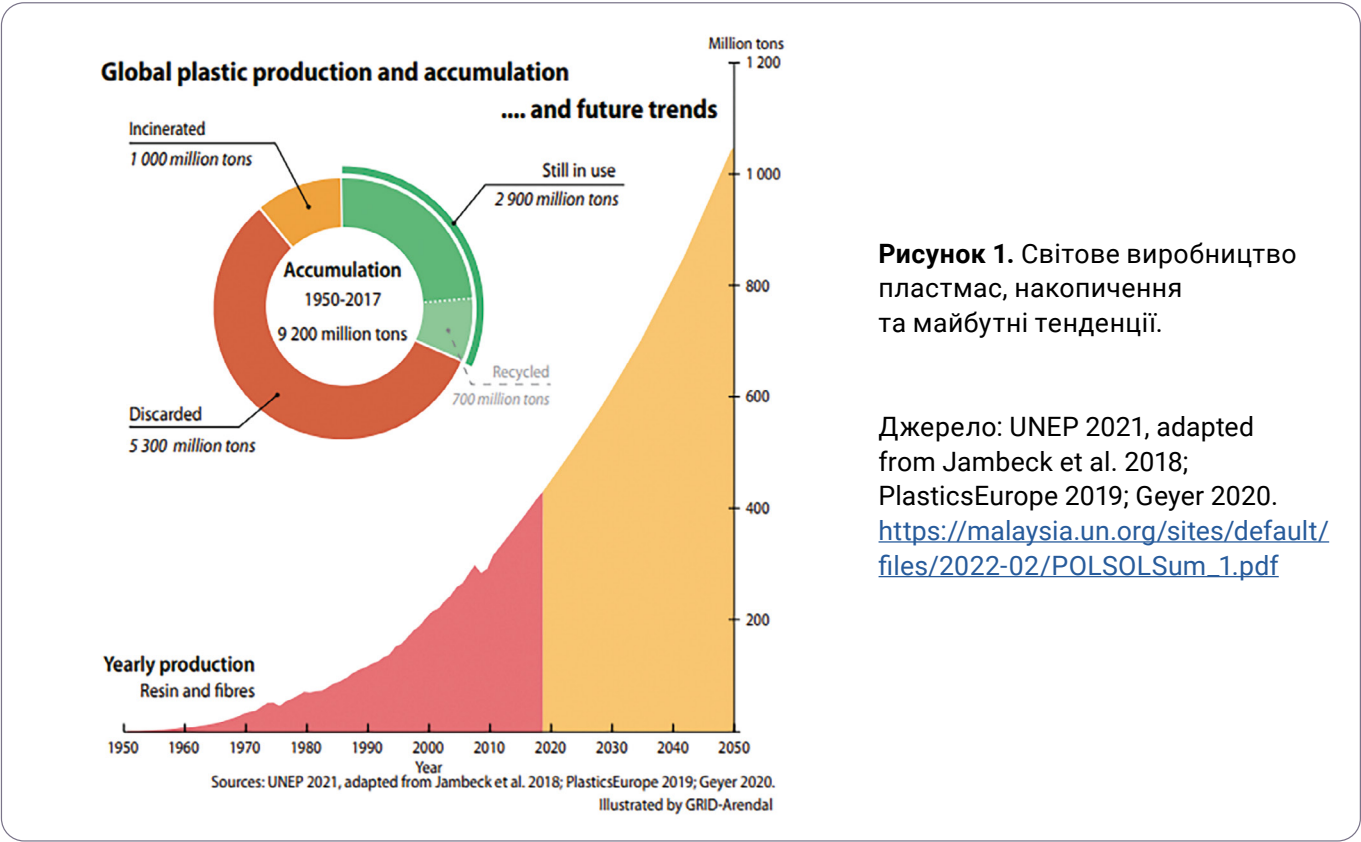


Рисунок 1. Світове виробництво пластмас, накопичення та майбутні тенденції.

Джерело: UNEP 2021, adapted from Jambeck et al. 2018; PlasticsEurope 2019; Geyer 2020.
https://malaysia.un.org/sites/default/files/2022-02/POLSOLSum_1.pdf

Лише 9 % пластикових відходів переробляється, 19 % — спалюється, а все інше залишається в навколишньому середовищі, включно зі звалищами та океанами⁴ (рис. 2).

Частка методів утилізації	В усьому світі, 2023 р.
Переробка	9%
Спалювання	19%
Неправильна утилізація	22%
Захоронення	49%

Рисунок 2. Щорічні пластикові відходи за методом утилізації, 2000–2023 рр.
Джерело даних: Our World in Data <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate>

Щороку у Світовий океан надходить близько 11 млн тонн пластику⁵. Це еквівалентно більш ніж одному сміттєвозу з пластиком, що скидається в океан щохвилини.

²Schmidt, C. et al. A multidisciplinary perspective on the role of plastic pollution in the triple planetary crisis. Environment International 193, 109059 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109059>

³Програма ООН з навколишнього середовища. Перемогти пластикове забруднення (Beat plastic pollution) <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (Дата доступу: 01.05.2025)

United Nations Environment Programme (UNEP) Beat plastic pollution <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (Дата доступу: 01.05.2025)

⁴How Much of the World’s Plastic Waste Actually Gets Recycled? <https://www.visualcapitalist.com/how-much-plastic-gets-recycled/> (Дата доступу: 01.05.2025)

⁵Jenna R. Jambeck et al., Plastic waste inputs from land into the ocean. Science 347, 768-771 (2015). <https://doi.org/10.1126/science.1260352>

Наразі в океанах уже накопичено понад 200 млн тонн великих пластикових відходів і 35 540 тонн мікропластику⁶. Річний обсяг пластикових відходів, які викидаються в навколишнє середовище з наземних джерел, оцінюють по-різному, залежно від застосовуваних методів аналізу. За звичайного сценарію і відсутності необхідних заходів кількість пластикових відходів, які потрапляють у водні екосистеми, може майже потроїтися: приблизно з 9–14 млн тонн на рік у 2016 році до 23–37 млн тонн на рік до 2040 року.

Згідно з іншим методом аналізу, кількість відходів може збільшитися більш ніж удвічі: приблизно з 19–23 млн тонн на рік у 2016 році до 53 млн тонн на рік до 2030 року⁷.

Згідно з дослідженнями, за збереження наявних тенденцій, до 2050 року пластику в океані буде близько 12 000 млн тонн⁸, що за вагою можна буде порівняти з усією масою риби в океані (близько 10 000 млн тонн⁹).

Залежно від виду пластик розкладається від 100 до 1000 років (рис. 3). В океані пластик розкладається значно повільніше, а в темних і холодних умовах морських глибин швидкість його деградації знижується ще більше¹⁰.



Рисунок 3. Приблизні терміни розкладання деяких видів пластикового сміття, що викинули в море

⁶Eriksen, M. et al. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. PLoS ONE 9, e111913 (2014). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>

⁷United Nations Environment Programme (2021). From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution> (Дата доступу: 01.05.2025)

⁸Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. Sci. Adv. 3, e1700782 (2017). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

⁹Irigoin, X. et al. Large mesopelagic fishes biomass and trophic efficiency in the open ocean. Nat Commun 5, 3271 (2014). <https://doi.org/10.1038/ncomms4271>

¹⁰Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. Phil. Trans. R. Soc. B 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

За винятком матеріалів, які були спалені, всі звичайні пластики, які коли-небудь потрапляли в навколишнє середовище, досі залишаються нерозкладеними у вигляді або цілих виробів, або фрагментів¹¹. Це сміття практично нікуди не зникає, а продовжує накопичуватися. Подібну ситуацію можна порівняти зі сміттєвим контейнером, у який постійно додають відходи, але ніколи не вивозять. Питання про те, що станеться з таким контейнером через місяць, ілюструє масштаб проблеми глобального накопичення пластикового сміття.

Великий тихоокеанський сміттєвий континент

Пластикове сміття, яке міститься в товщі води та на її поверхні, захоплюється океанічними течіями, переноситься в центральні регіони океану і формує великі скупчення, звані «островами».

«Великий тихоокеанський сміттєвий континент» являє собою найбільшу концентрацію пластику на планеті, що демонструє стійке зростання (рис. 4). Сміттєвий континент охоплює велику територію між Північною Америкою і Японією. Спостереження показують, що 2018 року її площа становила приблизно 1,6 млн квадратних кілометрів¹², хоча ця величина піддається варіаціям.

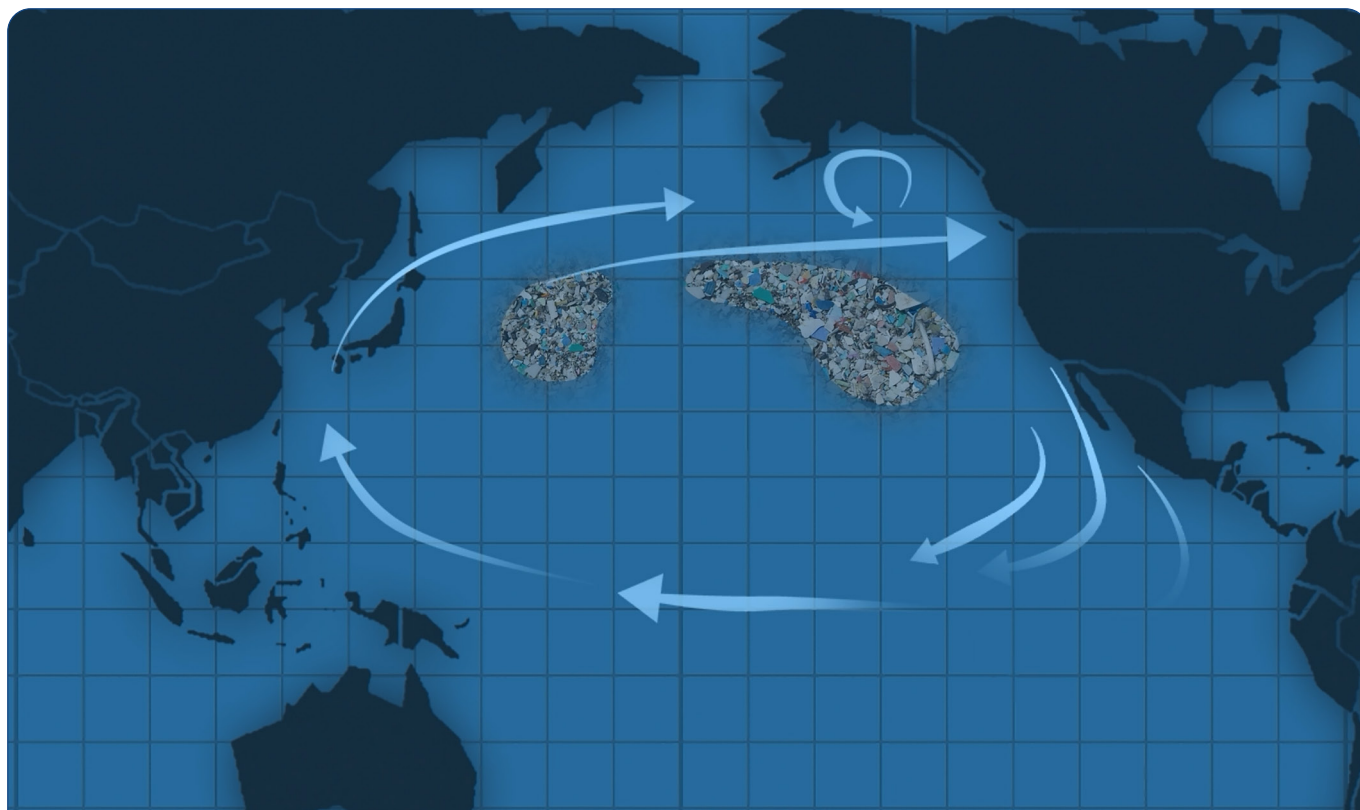


Рисунок 4. Схематичний процес утворення сміттевої плями в Тихому океані

¹¹Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. Phil. Trans. R. Soc. B 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

¹²Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. Sci Rep 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>

Дослідження показують, що до 80 %¹³ вмісту сміттєвих плям складають саме пластикові відходи¹⁴. У сміттєвій плямі міститься щонайменше 80 000 тонн сміття¹⁵. Однак це лише видима частина проблеми. До 94 % пластику, що потрапляє в океан, опиняється на морському дні¹⁶. Саме там може ховатися і накопичуватися значна кількість сміття.

Точний об'єм Великої тихоокеанської сміттевої плями залишається невідомим, оскільки Північно-Тихоокеанський субтропічний вир має надто великі розміри для всебічного наукового дослідження за поточного рівня технологічних можливостей.

Динаміка накопичення пластику в океані

Інструментальні вимірювання демонструють експоненціальне збільшення об'ємів Великої сміттевої плями. У період з 2015 до 2022 року середня маса пластикових відходів у цьому районі зросла в 5 разів¹⁷. Особливу стурбованість викликає той факт, що кількість дрібних фрагментів пластику за той самий період збільшилася в 10 разів, що свідчить про інтенсивний процес фрагментації великих пластикових об'єктів.

Велика сміттева пляма фактично формує сьомий «континент» нашої планети. Однак важливо зазначити, що це явище не є унікальним. Наразі наукове співтовариство ідентифікувало 5 великих скупчень сміття у Світовому океані¹⁸: два в Атлантичному океані, два в Тихому океані й одне в Індійському океані¹⁹ (рис. 5).

¹³Derraik, J. G. B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin* 44, 842–852 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5)

¹⁴Morishige, C., Donohue, M. J., Flint, E., Swenson, C. & Woolaway, C. Factors affecting marine debris deposition at French Frigate Shoals, Northwestern Hawaiian Islands Marine National Monument, 1990–2006. *Marine Pollution Bulletin* 54, 1162–1169 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.04.014>

¹⁵Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci Rep* 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>

¹⁶Eunomia. Plastics in the Marine Environment. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment>

¹⁷Lebreton, L. et al. Seven years into the North Pacific garbage patch: legacy plastic fragments rising disproportionately faster than larger floating objects. *Environ. Res. Lett.* 19, 124054 (2024). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad78ed>

¹⁸Van Sebille, E., England, M. H. & Froyland, G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environ. Res. Lett.* 7, 044040 (2012). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044040>

¹⁹Garbage Patches. Marine Debris Program. NOAA <https://marinedebris.noaa.gov/discover-marine-debris/garbage-patches> (Дата доступу: 01.05.2025)

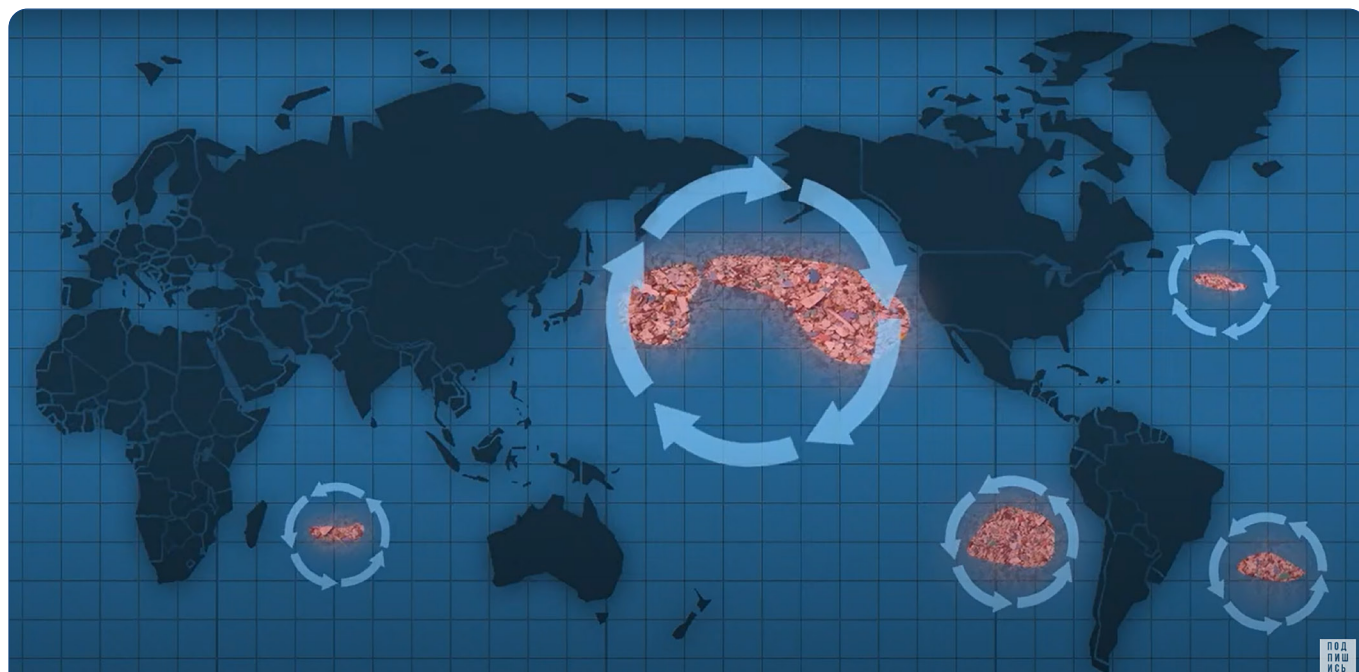


Рисунок 5. Схематичне зображення п'яти великих скупчень сміття у Світовому океані: два в Атлантичному океані, два в Тихому океані й одне в Індійському океані. В океанах циркулюють мільйони тонн пластику та інших відходів антропогенного походження. Сміттєві плями зростають у катастрофічній прогресії.

Процеси формування мікро- та наночастинок пластику

Пластикове сміття дуже стійке до біорозкладання, але під впливом хвиль, солоної води і сонячного випромінювання воно розпадається на дрібні частинки — мікро- й нанопластик²⁰, які можуть бути невидимі неозброєним оком. Ці частинки зберігають свою полімерну структуру²¹, а процес розпаду триває аж до нанорівня (рис. 6, 7). Зрештою, пластикові відходи стають постійним компонентом екосистеми планети.

Крім того, мікро- й нанопластик містить небезпечні хімічні речовини, які додаються в процесі виробництва пластику.



«Пластик містить близько 16 000 хімічних речовин. Відомо, що понад 4200 з них стійкі в навколишньому середовищі, накопичуються в живих організмах, переносяться на великі відстані або становлять потенційну небезпеку», — каже професорка Анніка Янке, хімікня-екологиня Центру Гельмгольца з дослідження навколишнього середовища²².

²⁰Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

²¹Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. Phil. Trans. R. Soc. B 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

²²Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ. Environmental Impacts of Plastics: Moving beyond the perspective on waste. https://www.ufz.de/index.php?en=36336&webc_pm=44/2024 (Дата доступу: 01.05.2025)

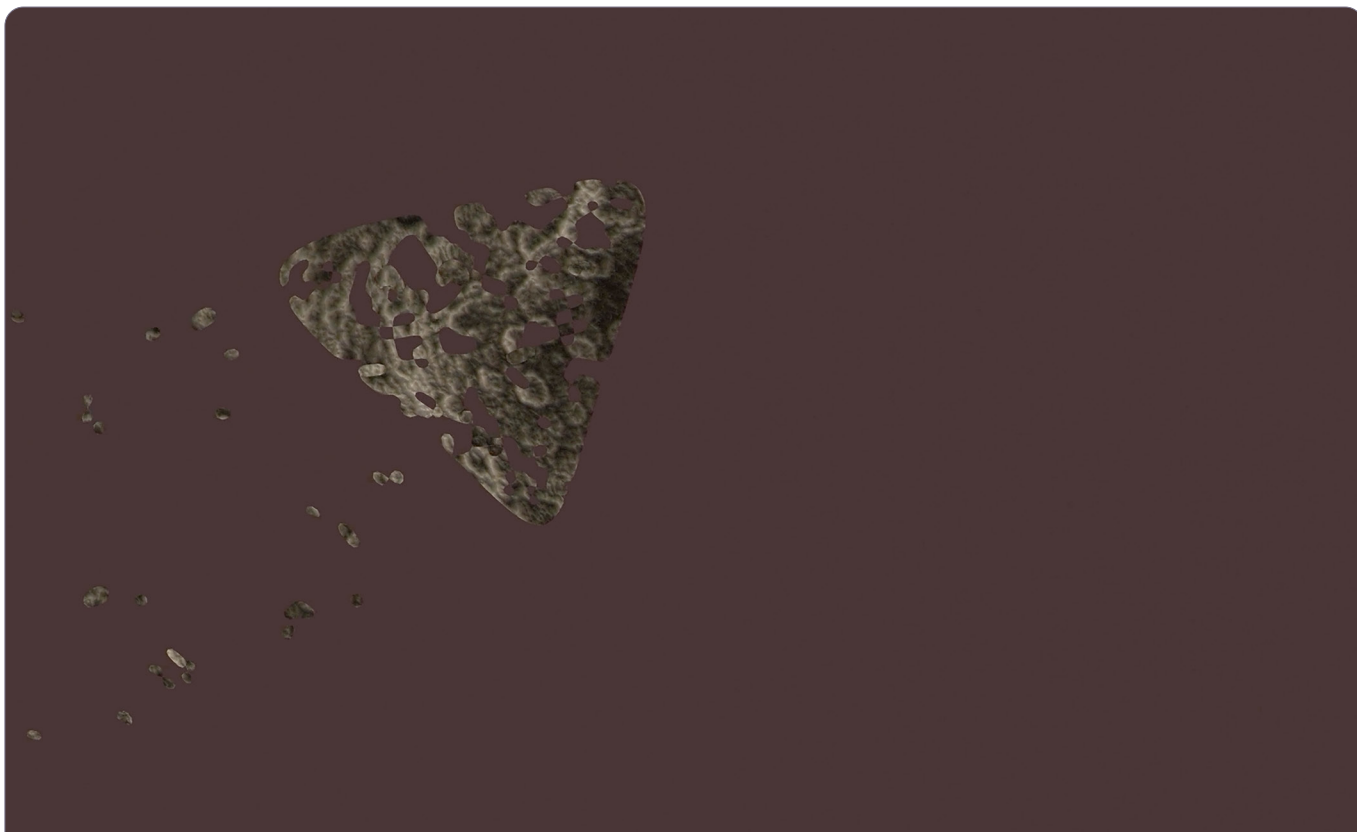
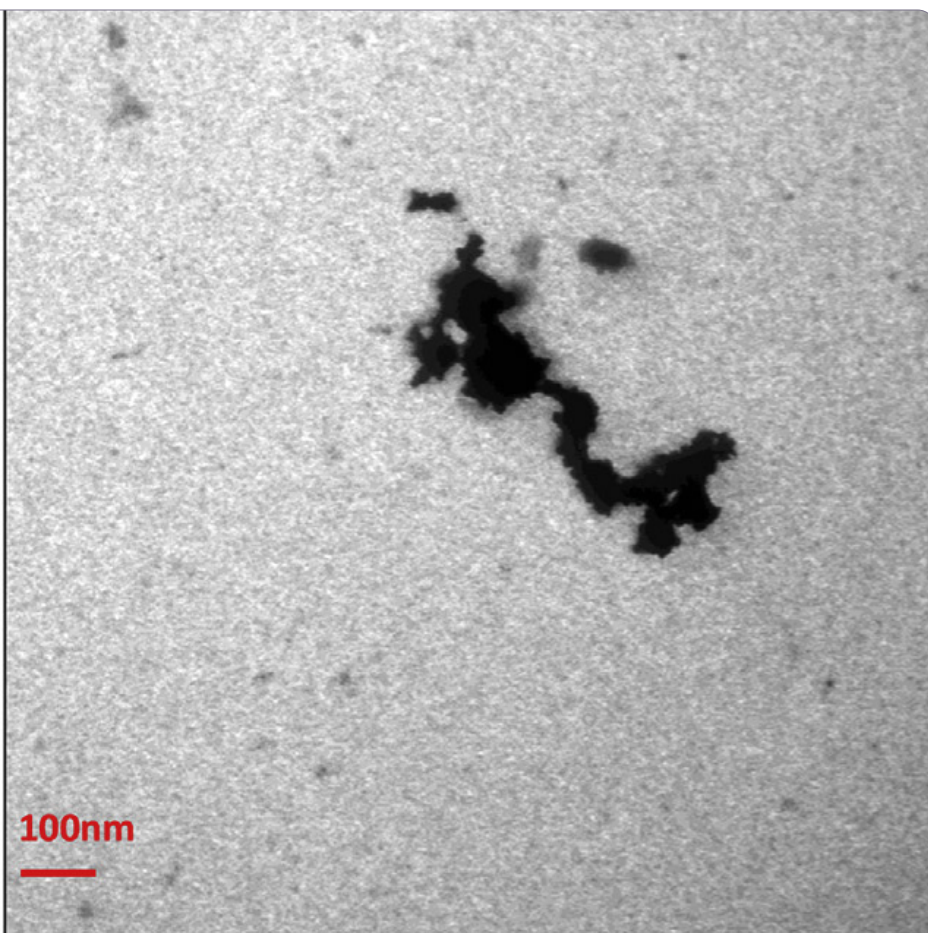


Рисунок 6. Схематичне зображення процесу фрагментації частинок пластику до нанорівня зі збереженням полімерної структури

Рисунок 7. Просвічувальна електронна мікроскопія нанопластиків поліетилену, які перебувають у навколишньому середовищі, отриманих шляхом деградування під дією УФ-випромінювання зістарених частинок мікропластику, зібраних у північній частині Атлантичного океану.

Джерело: Gigault, J. et al.
Current opinion: What is a nanoplastic? Environmental Pollution 235, 1030-1034
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024>



Поширення МНП в океані

Найбільша концентрація пластику спостерігається в зонах сміттевих плям. Ці океанічні звалища діють як своєрідні фабрики, де відбувається безперервне утворення мікро- й нанопластику. Подібно до того, як вірус поширюється організмом через кров, мікропластик переноситься океанічними течіями по всьому Світовому океану, що підкреслює глобальний масштаб цієї проблеми.

Незважаючи на технічні складнощі виявлення мікропластику, які ускладнюють точне визначення його кількості в океанах, теоретичні розрахунки дають змогу оцінити масштаби цієї проблеми.

Практично у всіх пробах океанічної води виявлено мікропластик, а в деяких регіонах його концентрація в десятки разів вища за середній рівень.

Океанічні кругообіги сприяють глобальному поширенню мікропластику, включно навіть з віддаленими регіонами, такими як Арктика. Дослідження льодових кернів показали, що рівень забруднення мікропластиком у Північному Льодовитому океані в 100 разів вищий, ніж у водах Атлантики, на північ від Шотландії, або у водах Північно-Тихоокеанського субтропічного виру²³. Це свідчить про масштаб проблеми та її транскордонний характер.

Більшість глобальних досліджень, присвячених забрудненню морського середовища пластиком, зосереджені на поверхневому шарі океану. Згідно з оцінками, у 2019 році в поверхневому шарі океану перебувало від 82 до 358 трлн пластикових частинок²⁴.

Однак з'являється дедалі більше доказів того, що в глибоководних зонах і донних відкладеннях кількість частинок мікропластику сягає незліченних трильйонів²⁵.

Легкий пластик плаває на поверхні, тоді як щільніший або колонізований біотою опускається на морське дно²⁶. Підрахунки показують, що близько 50 % пластику з міських відходів мають щільність вищу, ніж морська вода, що сприяє його швидкому зануренню. На дні він поширюється глибоководними течіями, накопичуючись у жолобах і западинах. Мікропластик було виявлено навіть у найглибшій точці океану – на дні Маріанської западини²⁷ (рис. 8, 9).

²³Obbard, R. W. et al. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future* 2, 315–320 (2014).
<https://doi.org/10.1002/2014EF000240>

²⁴Eriksen, M. et al. A growing plastic smog, now estimated to be over 170 trillion plastic particles afloat in the world's oceans—Urgent solutions required. *PLoS ONE* 18, e0281596 (2023). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596>

²⁵Eunomia. Plastics in the Marine Environment. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment> (Дата доступу: 01.05.2025)

²⁶Lusher, A. (2015). Microplastics in the Marine Environment: Distribution, Interactions and Effects. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (eds) *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_10

²⁷Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Lett.* 9, 1–5 (2018).
<https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

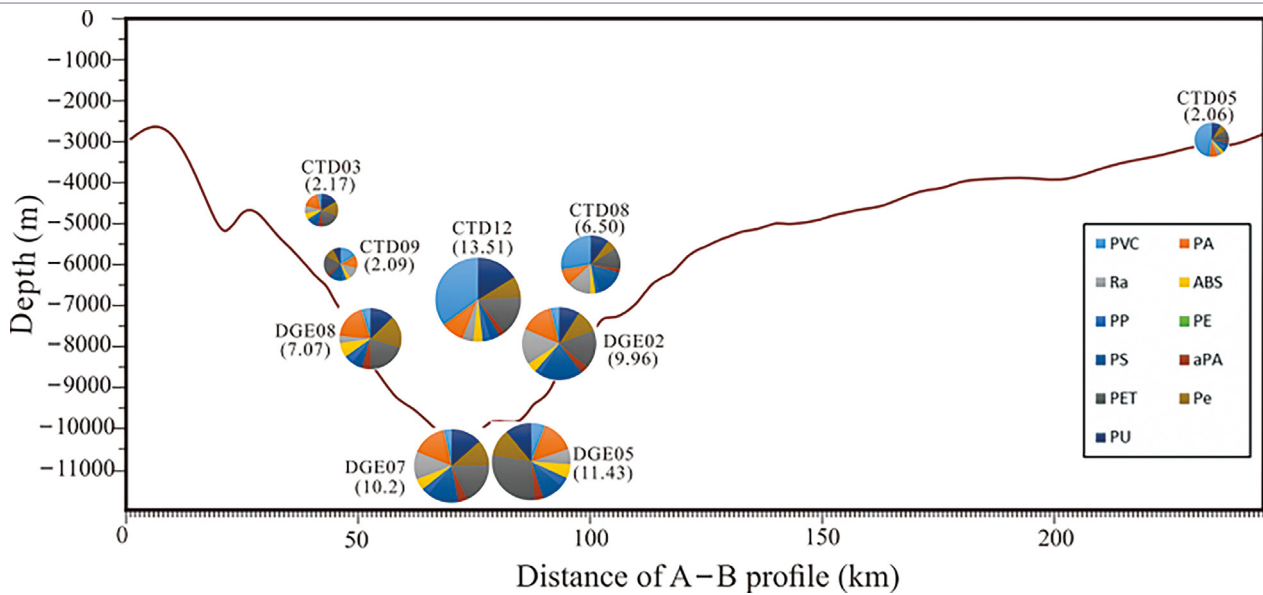


Рисунок 8. Профіль поширеності та складу мікропластику в зразках води з Маріанської западини. Кругові діаграми представляють склади мікропластику, а числа в дужках – поширеність мікропластику в одиницях штук на літр. ПВХ (полівінілхлорид), ПА (поліамід), Ра (віскоза), АБС (акрилонітрилбутадієнстирол), ПП (поліпропілен), ПЕ (поліетилен), ПС (полістирол), АПА (ароматичний поліамід), ПЕТ (поліетилентерефталат), ПЕ (поліестер), ПУ (поліуретан). Вісь Х відповідає поперечній лінії від точки А (12 пн. ш., 142,5 сх. д.) до точки В (9,8 пн. ш., 141,43 сх. д.). Джерело: Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

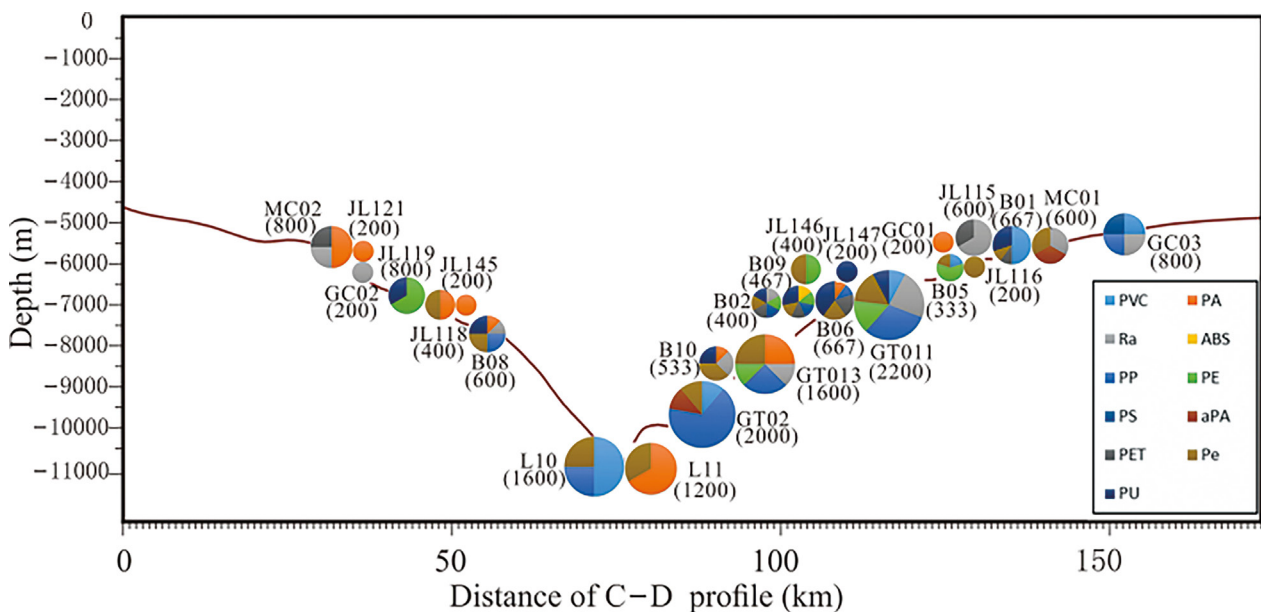


Рисунок 9. Профіль поширеності та складу мікропластику в зразках відкладень з Маріанської западини. Кругові діаграми представляють склади мікропластику, а числа в дужках – поширеність мікропластику в одиницях штук на літр. ПВХ (полівінілхлорид), ПА (поліамід), Ра (віскоза), АБС (акрилонітрилбутадієнстирол), ПП (поліпропілен), ПЕ (поліетилен), ПС (полістирол), АПА (ароматичний поліамід), ПЕТ (поліетилентерефталат), ПЕ (поліестер), ПУ (поліуретан). Вісь Х відповідає поперечній лінії від точки С (12 пн. ш., 141,9 сх. д.) до точки D (10,5 пн. ш., 141,3 сх. д.). Джерело: Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

Фактично основним місцем накопичення мікропластику є не поверхня океану, а глибоке морське дно. Поступово все океанічне дно покривається шаром пластику. Однак дані про забруднення океану мікропластиком, ймовірно, занижені, і реальна ситуація може бути значно гіршою. Як зазначає Мелані Бергманн, біологиня з Інституту полярних і морських досліджень ім. Альфреда Вегенера (Німеччина): *«Не у всіх є доступ до складних і високовартісних приладів для відбору проб»*. За її оцінками, до 90 % морських мікропластикових частинок можуть залишатися непоміченими під час використання стандартних методів відбору проб, оскільки їхні розміри занадто малі для виявлення²⁸ (рис. 10).

Крім поверхневого та придонного шарів забруднення (рис. 11), концентрація мікро- й нанопластику значно зростає в області термоклин²⁹ (рис. 12) — шару води, де спостерігається різка зміна температури.

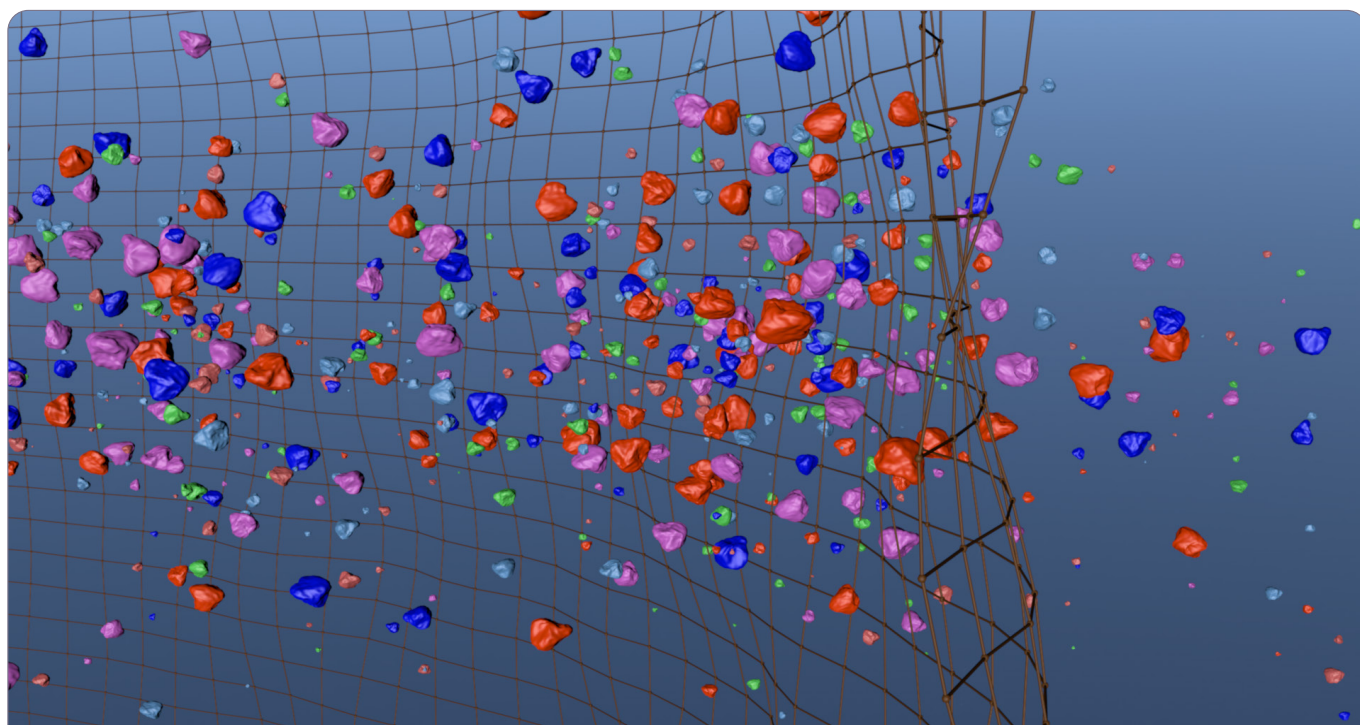


Рисунок 10. Схематичне зображення недосконалих аналітичних методів уловлювання мікро- й нанопластику

²⁸Microplastics pose risk to ocean plankton, climate, other key Earth systems. Mongabay.

<https://news.mongabay.com/2023/10/microplastics-pose-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems> (Дата доступу: 01.05.2025)

²⁹Tikhonova, D. A., Karetnikov, S. G., Ivanova, E. V. & Shalunova, E. P. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga. Water Resour 51, 146–153 (2024). <https://doi.org/10.1134/S009780782370063X>

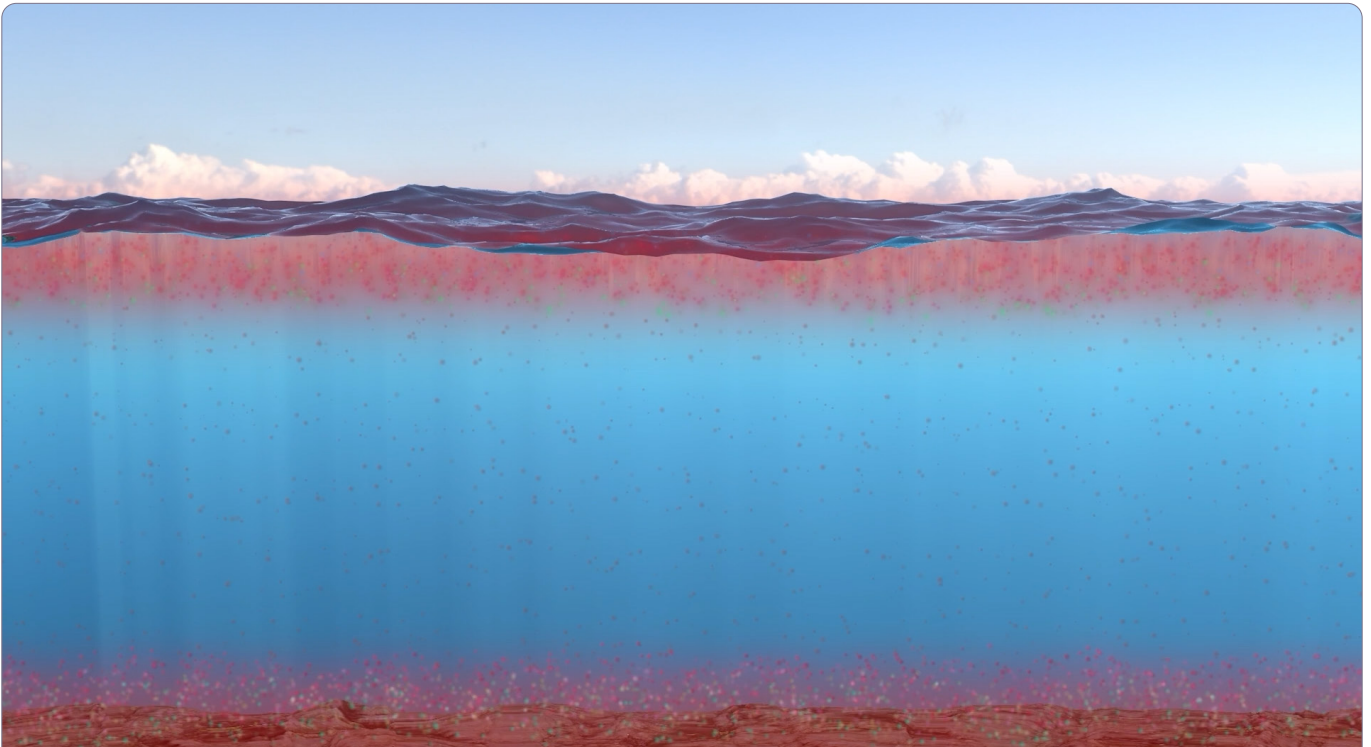


Рисунок 11. Схематичне зображення поверхневого та придонного шарів забруднення мікро- й нанопластиком

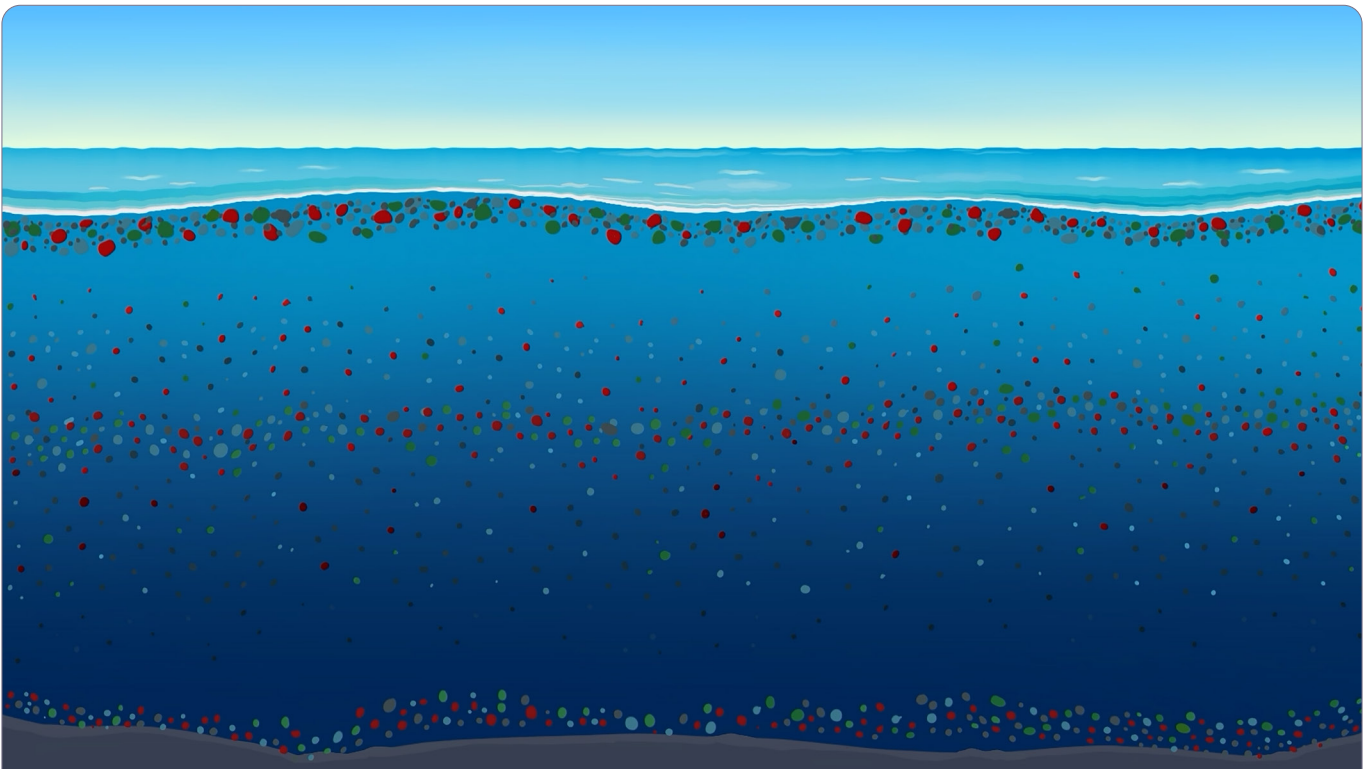


Рисунок 12. Схематичне зображення розташування мікро- й нанопластичу в поверхневому, придонному шарах і зоні термоклин

Високий градієнт щільності в цьому шарі сприяє тому, що частинки мікро- й нанопластику затримуються в цих зонах і залишаються там на тривалий час. Океан можна уявити як листовий пиріг, де кожен шар має унікальну температуру і щільність, а мікропластик накопичується на межах між цими шарами.

Крім того, мікропластик розповсюджується в океані за допомогою живих організмів, які поглинають його, перетравлюють і виділяють³⁰.

Поширення МНП у навколишньому середовищі

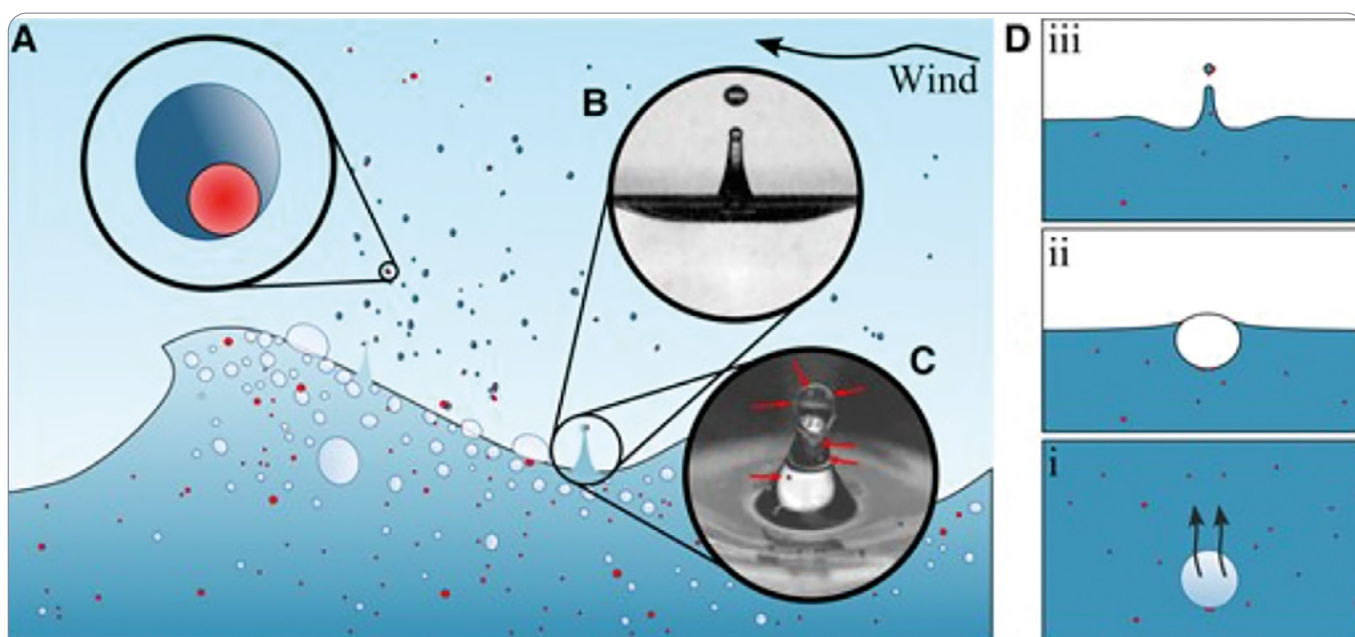


Рисунок 13. Рисунок відповідних процесів викидання мікропластику з океану.

A) Мікропластик (червоний / темніший колір) в океані переноситься в атмосферу краплями морської води.

B) Бульбашки, що лопаються, створюють невеликі краплі або аерозолі, такі як струменеві краплі.

C) Мікропластик, присутній у рідині, може переноситися в струменеві краплі, що утворюються. Стрілки вказують на мікропластикові частинки розміром 100 μm . Утворені краплі можуть підхоплюватися вітром і переносити мікропластиковий матеріал в атмосферу. Рідина зрештою випаровується, залишаючи мікропластикові частинки. D) Відповідні фізичні процеси, пов'язані з викиданням мікропластику під час лопання бульбашок, починаються із захоплення частинок у процесі підйому бульбашки. Di). Після досягнення поверхні Dii) бульбашка зрештою приймає свою рівноважну форму, яка після лопання фокусує капілярні хвилі біля своєї основи, утворюючи струменеві краплі Diii), що переносять мікропластиковий матеріал.

Джерело: Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. PNAS Nexus 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

³⁰Dawson, A. L. et al. Turning microplastics into nanoplastics through digestive fragmentation by Antarctic krill. Nat Commun 9, 1001 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03465-9>

Коли вода випаровується³¹, мікропластик піднімається в атмосферу з поверхні океану³². Також поєднання морських бризок, вітру та хвиль утворює у воді бульбашки повітря, що містять мікропластик. Коли бульбашки лопаються, частинки потрапляють в атмосферу (рис. 13). Щороку з морським бризом тільки на узбережжя переноситься близько 136 тисяч тонн мікропластику³³. А до 25 млн метричних тонн мікро- й нанопластику на рік переносяться на тисячі кілометрів морським повітрям, бризками, снігом і туманом, перетинаючи країни, континенти й океани.

66

«Повітря – набагато динамічніше середовище, ніж вода. У результаті мікро- й нанопластик може набагато швидше проникати в ті регіони нашої планети, які є найвіддаленішими й досі значною мірою незайманими», – каже докторка Мелані Бергманн, біологиня з Інституту Альфреда Вегенера в Німеччині.

Опинившись там, частинки можуть вплинути на клімат поверхні та здоров'я місцевих екосистем³⁴. Мікропластик був виявлений у різних місцях, від поверхні моря до глибоководних відкладень, від сільськогосподарських угідь до наших найвищих гір, а також у морському льоду, озерах та річках. Він був виявлений у 1300 водних і наземних видів, від безхребетних в основі харчового ланцюга до вищих хижаків, з доказами впливу на всіх рівнях біологічної організації, від клітинного до екосистемного. Мікропластик широко розповсюджений у їжі, яку ми їмо, воді, яку ми п'ємо, і повітрі, яким ми дихаємо (рис. 14). Він був виявлений у багатьох тканинах й органах людського тіла, і з'являються докази його негативного впливу³⁵.



Рисунок 14. Повсюдна присутність мікропластику в їжі, воді та повітрі.

Джерело:

<https://www.science.org/doi/10.1126/science.adl2746>

³¹Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. PNAS Nexus 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

³²Deike, L., Reichl, B. G. & Paulot, F. A Mechanistic Sea Spray Generation Function Based on the Sea State and the Physics of Bubble Bursting. AGU Advances 3, e2022AV000750 (2022). <https://doi.org/10.1029/2022AV000750>

³³Allen, S. et al. Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics. PLoS ONE 15, e0232746 (2020). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232746>

³⁴Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research. Micro- and nanoplastic from the atmosphere is polluting the ocean. <https://www.awi.de/en/about-us/service/press/single-view/mikro-und-nanoplastik-aus-der-atmosphaere-belastet-meere.html> (Дата доступу: 01.05.2025)

³⁵Thompson, R. C. et al. Twenty years of microplastic pollution research—what have we learned? Science 386, eadl2746 (2024). <https://doi.org/10.1126/science.adl2746>

Таким чином, переміщення у віддалені та навіть полярні регіони може бути зумовлене поєднанням атмосферного та морського переносу. Відповідно, важливо розуміти взаємодію між атмосферою та океаном, щоб визначити, які розміри частинок переносяться і в яких кількостях.

Наприклад, нещодавно група дослідників виявила в хмарах на вершинах гір у Японії пластикові гранули, що мають гідрофільну (водопритягувальну) поверхню³⁶. Потім вони проаналізували зразки і дійшли висновку, що низьковисотні та щільніші хмари містять більшу кількість мікропластику. Наявність полімерів як ядер конденсації **відіграє ключову роль у швидкому утворенні хмар**, що в кінцевому підсумку може вплинути на загальний клімат³⁶.

Частинки пластику в хмарах сприяють утриманню більшої кількості води, це затримує випадання дощу. Коли ж дощ починає йти, він стає сильнішим, оскільки в хмарах встигає накопичитися більше води. Крім того, мікропластик, який піддавався впливу ультрафіолетового світла і відфільтрованої води з хмар, має більш шорстку поверхню, що сприяє накопиченню на його поверхні більше свинцю, ртуті та кисневмісних груп³⁷.

Атмосфера здебільшого переносить дрібні частинки мікропластику, що робить її набагато швидшим транспортним шляхом, який може призвести до суттєвих відкладень у широкому діапазоні екосистем. Дані досліджень показують, що ліси виступають у ролі бар'єрів для мікропластику, який переноситься вітром. Листя, гілки та стовбури затримують мікропластик, який осідає на їхніх поверхнях. Це призводить до того, що мікрочастинки пластику, які переносяться вітром і опадами, залишаються на рослинах або осідають на землю.

Обмежена вентиляція під щільним лісовим пологом сприяє стійкому накопиченню цих частинок у лісових масивах. Листя полог у слугує довготривалим резервуаром для повітряного мікропластику³⁸. Дослідження показали, що з осені 2017 року до літа 2019 року в 11 природних парках і заповідниках на заході США разом з опадами випало понад 1000 тонн пластикових частинок. Цієї кількості достатньо для виробництва 120 млн пластикових пляшок³⁹. Аналогічна ситуація спостерігається і в інших регіонах світу. Наприклад, ліси пилчастого дуба (*Quercus serrata*) в Японії, що займають площу близько 32 500 км², щороку вловлюють у своїх кронах близько 420 трлн частинок мікропластику, які переносяться повітрям⁴⁰.

³⁶Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

³⁷Busse, H. L., Ariyasena, D. D., Orris, J. & Freedman, M. A. Pristine and Aged Microplastics Can Nucleate Ice through Immersion Freezing. *ACS EST Air* 1, 1579–1588 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsestair.4c00146>

³⁸Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. et al. Alkaline extraction yields a higher number of microplastics in forest canopy leaves: implication for microplastic storage. *Environ Chem Lett* 22, 1599–1606 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3>

³⁹Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnenberger, M. & Sukumaran, S. Plastic rain in protected areas of the United States. *Science* 368, 1257–1260 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aaz5819>

⁴⁰Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. & Miyazaki, A. Alkaline extraction yields a higher number of microplastics in forest canopy leaves: implication for microplastic storage. *Environ Chem Lett* 22, 1599–1606 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3>

На відміну від лісів, у містах, завдяки належному провітрюванню та наявності більш важких суспензій від вихлопів автомобілів і промислового смогу, частина мікро- й нанопластику осідає. Сьогодні повітря в лісах більш насичене нанопластиком, ніж у мегаполісах.

Світ змінився! І тепер, коли люди купаються в океані, засмагають на пляжі або здійснюють пробіжки вздовж узбережжя чи в парку, гуляють у лісі з метою поліпшити здоров'я, навпаки, вони піддають свій організм додатковому впливу мікропластику. Мікропластик з Африки та Північної Америки було виявлено у віддалених і, здавалося б, незайманих місцях, таких як французькі Піреней. Це свідчить про глобальне поширення мікропластику, який переноситься повітряними потоками та опадами, долаючи величезні відстані.

Мікро- й нанопластик потрапляє в міські водойми через зливові стоки, промислові викиди та дощову воду, яка вловлює частинки з атмосфери. Наприклад, під час одного прання синтетичних тканин у стічні води може потрапляти до 1,5 мільйона частинок мікропластику⁴¹. Ці частинки, опинившись у стічних водах, потім потрапляють у річки та океани, там їх заковтують риби та інші водні організми. Аналізуючи відходи, виявлені в річках і навколишньому ландшафті, дослідники змогли підрахувати, що лише 10 річкових систем переносять від 88 до 95 % пластику, який потрапляє в океан із річок⁴².

Під час іншого дослідження вчені переглянули загальноприйняті припущення про транспортування пластику в річках і дійшли висновку, що фактична кількість пластикових відходів у річках може бути на 90 % більшою, ніж припускалося раніше⁴³.

Пластик також присутній і в більшості великих озер світу. Водночас щільність пластикових відходів в озерах може бути навіть вищою, ніж у найбільших океанічних сміттєвих плямах, і навіть озера, що розташовані в незайманих районах, містять значну кількість сміття. Це було підтверджено під час великого міжнародного дослідження, проведеного під керівництвом Барбари Леоні та Вероніки Нава з Міланського університету Бікокка⁴⁴.

Згідно зі звітом Програми ООН із довкілля (UNEP) за 2021 рік, мікропластик було виявлено у всіх досліджених прісноводних водоймах, включно з річками, озерами та водосховищами⁴⁵. Наприклад, дослідники виявили, що майже 10 000 метричних тонн, або 22 мільйони фунтів, пластикового сміття щорічно потрапляють до Великих озер зі Сполучених Штатів і Канади⁴⁶.

⁴¹De Falco, F., Di Pace, E., Cocca, M. & Avella, M. The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. *Sci Rep* 9, 6633 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43023-x>

⁴²Schmidt, C., Krauth, T. & Wagner, S. Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea. *Environ. Sci. Technol.* 51, 12246–12253 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02368>

⁴³Valero, D., Belay, B. S., Moreno-Rodenas, A., Kramer, M. & Franca, M. J. The key role of surface tension in the transport and quantification of plastic pollution in rivers. *Water Research* 226, 119078 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119078>

⁴⁴Nava, V., Chandra, S., Aherne, J. et al. Plastic debris in lakes and reservoirs. *Nature* 619, 317–322 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06168-4>

⁴⁵United Nations Environment Programme. Monitoring Plastics in Rivers and Lakes: Guidelines for the Harmonization of Methodologies. (2020) <https://www.unep.org/resources/report/monitoring-plastics-rivers-and-lakes-guidelines-harmonization-methodologies> (Дата доступу: 01.05.2025)

⁴⁶Hoffman, M. J. & Hittinger, E. Inventory and transport of plastic debris in the Laurentian Great Lakes. *Marine Pollution Bulletin* 115, 273–281 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.061>

У кінцевому підсумку мікропластик повертається до людини у вигляді риби або морепродуктів.

Італійські вчені виявили, що фрукти та овочі також містять мільйони частинок мікропластику. Велика концентрація цих частинок була виявлена в яблуках, грушах, моркві, картоплі, салаті латук та броколі. Водночас у фруктах концентрація частинок виявилася в 2–3 рази вищою, ніж в овочах: від 52 000 частинок на грам у салаті і до 223 000 — у яблуках⁴⁷.

Під час дослідження було виявлено, що 81 % з 159 зразків водопровідної води, взятих по всьому світу, містить мікропластик⁴⁸. Інші дослідження підтверджують ці висновки, відзначаючи присутність мікропластикових частинок і в мінеральній воді. Цікаво, що кількість частинок була приблизно однаковою як у скляній, так і в поліетилентерефталатній (ПЕТ) пляшці, водночас кількість сягала 6292 частинок на літр^{49 50 51}.

Вчені з Ньюкаслського університету (Австралія) провели дослідження⁵², щоб оцінити, скільки пластику в середньому споживає сучасна людина. Результати показали, що людина з'їдає близько 250 г пластику на рік, що еквівалентно 50 пластиковим пакетам⁵³.

⁴⁷Oliveri Conti, G. et al. Micro- and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population. *Environmental Research* 187, 109677 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109677>

⁴⁸Kosuth, M., Mason, S. A. & Wattenberg, E. V. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *PLoS ONE* 13, e0194970 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194970>

⁴⁹Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U. & Fürst, P. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research* 129, 154–162 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.011>

⁵⁰Oßmann, B. E. et al. Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water Research* 141, 307–316 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>

⁵¹Winiarska, E., Jutel, M. & Zemelka-Wiacek, M. The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks. *Environmental Research* 251, 118535 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>

⁵²University of Newcastle. Plastic ingestion by people could be equating to a credit card a week.

<https://www.newcastle.edu.au/newsroom/featured/plastic-ingestion-by-people-could-be-equating-to-a-credit-card-a-week> (Дата доступу: 01.05.2025)

⁵³Senathirajah, K. et al. Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials* 404, 124004 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>

ЕКОЛОГІЧНІ ТА КЛІМАТИЧНІ НАСЛІДКИ ЗАБРУДНЕННЯ МІКРО- ТА НАНОПЛАСТИКОМ

Як МНП руйнує екосистеми на молекулярному рівні

Пластикові відходи присутні скрізь: від океанів і річок до ґрунту, повітря і навіть льодовиків⁵⁴.

Багаторічні спостереження підтверджують, що пластик, на відміну від рослинних і тваринних речовин, не піддається активному природному розкладанню⁵⁵. Він зберігається в навколишньому середовищі, не беручи участі в природних циклах біодеградації. Створений для опору процесам розпаду, пластик став постійним елементом глобальної екосистеми.

Ця стійкість, яка спочатку вважалася технологічним успіхом, тепер призводить до значного екологічного дисбалансу. У виробництві пластмас використовується понад 13 000 хімічних речовин. З них понад 3200, включно з мономерами, добавками та допоміжними речовинами для переробки, потенційно небезпечні через свої токсичні властивості⁵⁶.

Вплив МНП на властивості ґрунту та деградацію екосистем

Дослідження показують, що забруднення мікропластиком наземних екосистем, особливо сільськогосподарських ґрунтів, може перевищувати рівень забруднення водного середовища в 4–23 рази⁵⁷, вказуючи на значне накопичення пластику в ґрунтах. Пластик накопичується в ґрунті різними способами, включно з очисними спорудами, мульчуванням, атмосферними відкладеннями і продуктами повсякденного використання. Широке використання одноразових пластикових виробів нерозривно пов'язане з серйозним забрудненням ґрунту мікро- й нанопластиком. Природні та антропогенні фактори сприяють⁵⁸ проникненню дрібних частинок мікропластику в ґрунт, що змінює важливі екологічні процеси⁵⁹.

Спостереження підтверджують згубний вплив мікропластику на екосистеми, що зачіпає структуру і функції мікроорганізмів, рослин і ґрунтів (рис. 15).

⁵⁴Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L. & Zeng, E. Y. A Global Perspective on Microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125, e2018JC014719 (2020). <https://doi.org/10.1029/2018JC014719>

⁵⁵Huang, S. et al. Plastic Waste Management Strategies and Their Environmental Aspects: A Scientometric Analysis and Comprehensive Review. *IJERPH* 19, 4556 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijerph19084556>

⁵⁶United Nations Environment Programme. Chemicals in Plastics - A Technical Report (2023). <https://www.unep.org/resources/report/chemicals-plastics-technical-report> (Дата доступу: 01.05.2025)

⁵⁷Yu, H., Zhang, Y., Tan, W. & Zhang, Z. Microplastics as an Emerging Environmental Pollutant in Agricultural Soils: Effects on Ecosystems and Human Health. *Front. Environ. Sci.* 10, 855292 (2022). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.855292>

⁵⁸Rillig, M. C., Ingraffia, R. & De Souza Machado, A. A. Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. *Front. Plant Sci.* 8, 1805 (2017). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>

⁵⁹Shafea, L. et al. Microplastics in agroecosystems: A review of effects on soil biota and key soil functions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 186, 5–22 (2023). <https://doi.org/10.1002/jpln.202200136>

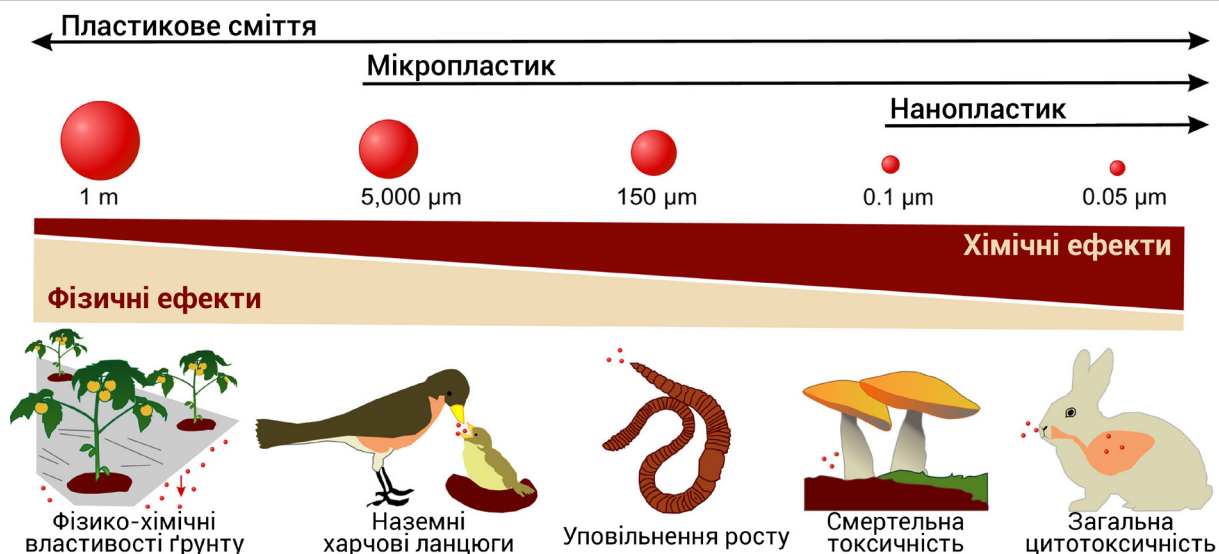


Рисунок 15. Мікропластик як тригер комбінованих фізичних або хімічних ефектів.

Біогеохімія ґрунту, пов'язана з сільськогосподарським мульчуванням, споживанням в їжу наземними та континентальними птахами, зниженням росту дощових черв'яків, летальною токсичністю для грибів, запаленням легенів ссавців і широкою цитотоксичністю нанопластику.

Джерело: de Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S. & Rillig, M. C. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology* 24, 1405–1416 (2018). <https://doi.org/10.1111/gcb.14020>

Результати дослідження Китайської академії наук показали, що наявність пластикової плівки різних розмірів у ґрунті значно збільшує швидкість випаровування води. Особливо сильний ефект спостерігається при додаванні 2-міліметрових частинок. Більші пластикові фрагменти (5–10 мм) призводять до розтріскування ґрунту, руйнуючи його структурну цілісність. Ці дані вказують на те, що забруднення пластиком порушує водний цикл у ґрунтах, що може посилити дефіцит ґрунтової води та вплинути на вертикальний перенос забруднюючих речовин⁶⁰ (рис. 16, 17).

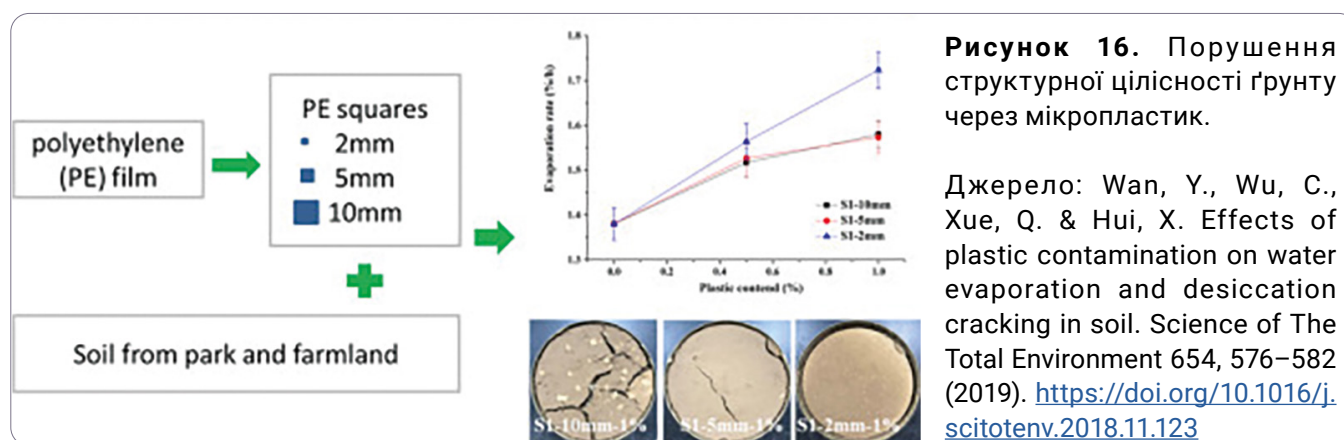


Рисунок 16. Порушення структурної цілісності ґрунту через мікропластик.

Джерело: Wan, Y., Wu, C., Xue, Q. & Hui, X. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of The Total Environment* 654, 576–582 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>

⁶⁰Wan, Y., Wu, C., Xue, Q. & Hui, X. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of The Total Environment* 654, 576–582 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>

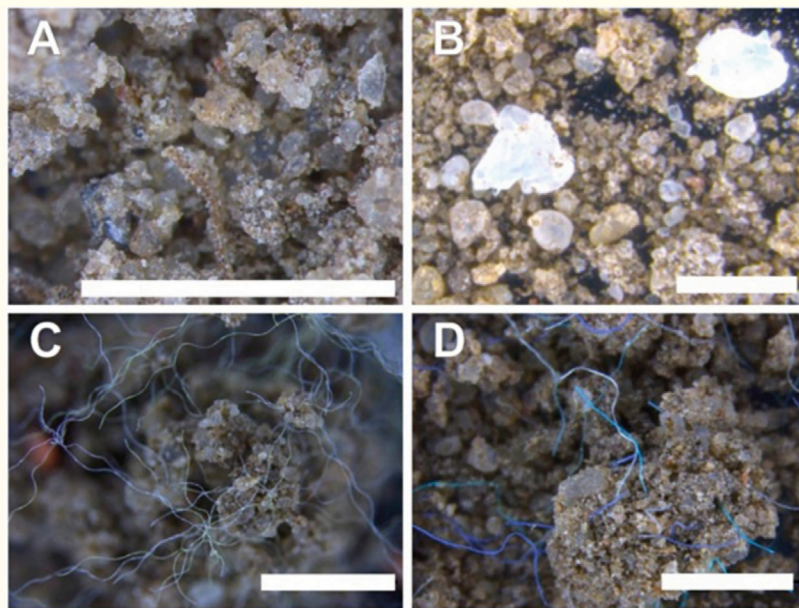


Рисунок 17. Інтеграція мікропластикових частинок у біофізичне середовище ґрунту.

Структура контрольного ґрунту (А) візуально не відрізнялася під стереомікроскопом від ґрунту, забрудненого поліамідними кульками (SI S1D). Поліетиленові фрагменти (В) і поліефірні (С) або поліакрилові волокна (D) призвели до візуально помітних ознак ґрунту. Біла смуга на кожній панелі відповідає розміру 1 мм.

Джерело: De Souza Machado, A. A. et al. Impacts of Microplastics on the Soil Biophysical Environment. Environ. Sci. Technol. 52, 9656–9665 (2018). <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>

Дослідження також підтверджують несприятливий вплив пластику на ґрунтову біоту — різноманітну спільноту, що включає мікроорганізми (наприклад, бактерії, гриби) та фауну (мікроскопічні й макроскопічні тварини). Ці організми взаємодіють один із одним, з корінням рослин і навколишнім середовищем, утворюючи ґрунтові харчові ланцюги (рис. 18), необхідні для кругообігу поживних речовин і здоров'я рослин.



Рисунок 18. Схематичне зображення процесу утворення ґрунтових харчових ланцюгів.

Джерело: Ng, E.-L. et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. Science of The Total Environment 627, 1377–1388 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>

Різні види наземної біоти слугують біоіндикаторами забруднення мікропластиком. Аналіз всіх зразків показав наявність частинок мікропластику і потенційно токсичних елементів (Sb, As, Fe, Al, Se, Zn) в різних концентраціях, що свідчить⁶¹ про можливу токсичність мікропластику⁶².

Дослідження показали, що полістирольні гранули можуть поглинатися ґрунтовим організмом нематодою *Caenorhabditis elegans* (рис. 19); це також означає, що частинки полістиролу можуть накопичуватися в ґрунтовому харчовому ланцюзі⁶³.

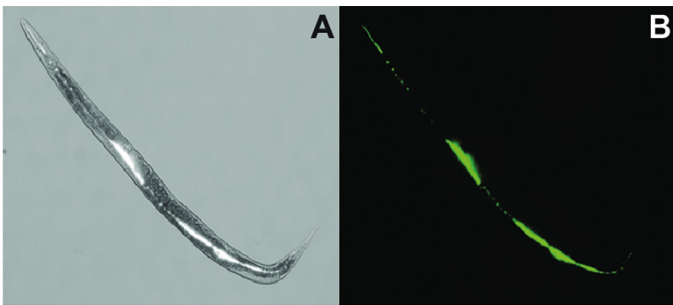


Рисунок 19. Зображення у світлому полі (А) та флуоресцентні зображення (В) дорослого черв'яка *Caenorhabditis elegans*, який накопичував 0,5 мкм мікросфери жовто-зеленої флуоресценції протягом 15 хв. при 20 °С. Фотографії були зроблені при збільшенні $\times 100$.

Джерело: Kiyama, Y., Miyahara, K. & Ohshima, Y. Active uptake of artificial particles in the nematode *Caenorhabditis elegans*. *Journal of Experimental Biology* 215, 1178–1183 (2012). <https://doi.org/10.1242/jeb.067199>

Ґрунтова біота — це не просто «біологічний двигун Землі», а багатофункціональна система, від якої залежать усі наземні екосистеми. Її роль у підтримці життя на планеті можна порівняти з функціями океанів і атмосфери, що підтверджується дослідженнями ґрунтознавців, екологів і кліматологів. Тому будь-яка зміна, викликана токсичністю, може вплинути на багато критичних процесів у ґрунтах і на харчовий ланцюг, викликаючи екологічний дисбаланс⁶⁴.

Дані вказують на здатність мікропластику швидко адсорбуватися на поверхні ґрунтів за рахунок малого розміру, великої питомої площі, високої гідрофобності та стійкості до біодеградації⁶⁵. Це сприяє його легкому поглинанню організмами і накопиченню в них, що створює потенційну загрозу для здоров'я людини. Цей процес не обмежується ґрунтовим шаром, а поширюється на рослини, де він продовжує свій згубний вплив.

МНП у продуктах харчування

Антропогенні забруднювачі можуть мати значний вплив на екосистеми, особливо коли потрапляють у рослини. Було підтверджено, що МНП можуть поглинатися й переміщуватися в різні органи рослин.

⁶¹Ng, E.-L. et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. *Science of The Total Environment* 627, 1377–1388 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>

⁶²Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. *Coatings* 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>

⁶³Kiyama, Y., Miyahara, K. & Ohshima, Y. Active uptake of artificial particles in the nematode *Caenorhabditis elegans*. *Journal of Experimental Biology* 215, 1178–1183 (2012). <https://doi.org/10.1242/jeb.067199>

⁶⁴Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. *Coatings* 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>

⁶⁵Sajjad, M. et al. Microplastics in the soil environment: A critical review. *Environmental Technology & Innovation* 27, 102408 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>

Дані досліджень вказують, що мікропластик накопичується в рослинних системах різними шляхами, чинячи несприятливий вплив на рослини, сільськогосподарські культури та харчові продукти.

Нанопластик за рахунок свого малого розміру здатний безпосередньо проникати в рослинну тканину. Рослини поглинають нанопластик з живильного середовища, після чого він транспортується в надземні частини через ксилему — систему провідних судин, що транспортують воду й поживні речовини від коренів до стебел і листя.

Мікропластик, що осідає на листі, проникає через продихи і може переміщатися до коренів по судинних пучках. Як мікро-, так і нанопластик проявляє токсичний вплив на фізіологічні процеси та ферментативну активність сільськогосподарських рослин⁶⁷ (рис. 20).

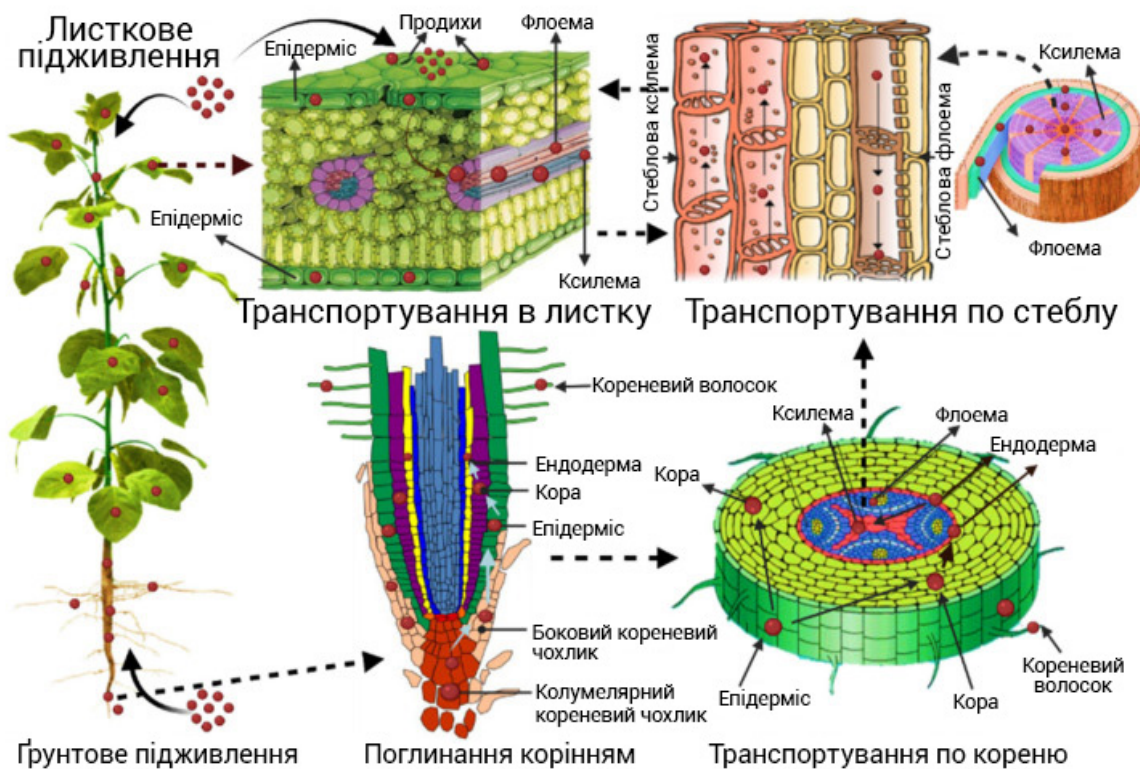


Рисунок 20. Механізми поглинання мікро- й нанопластику в рослинах.

Механізм поглинання пластику рослинами при потраплянні в ґрунт через поглинання корінням; транспортні шляхи від кореня до стебла та транспорт від стебла до листя й плодів. Позакореневе внесення показує потрапляння пластику в продихи листя й подальше перенесення в інші частини рослини. Суцільна стрілка вказує на доступність пластику для рослини, а пунктирна стрілка вказує на транспортування всередині рослини.

Джерело: Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

⁶⁶Hasan, M. M. et al. Impact of microplastics on terrestrial ecosystems: A plant-centric perspective. *Environmental Pollution and Management* 1, 223–234 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.epm.2024.11.002>

⁶⁷Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

Система транспортування води в рослинах здатна швидко переносити нанопластик в стебла, листя і, можливо, плоди. Згідно з даними, отриманими при дослідженні рослин тютюну (*Nicotiana tabacum*), нанопластик розміром 100 нм не проникає в рослинні клітини, тоді як частинки розміром від 20 до 40 нм успішно поглинаються⁶⁸.

Крім того, деякі пластикові частинки мають власний заряд, що може посилювати їхню адсорбцію в коренях рослин за рахунок електростатичного тяжіння, впливаючи на іммобілізацію поживних речовин або процеси фотосинтезу⁶⁹. Негативно заряджені мікропластики з більшою ймовірністю проникають в кору кореня⁷⁰.

В агроекосистемах з сильним забрудненням частинками пластику відзначається уповільнення росту і розвитку рослин⁷¹, а також короткостроковий і тимчасовий вплив на швидкість проростання і розвиток коренів⁷².

Дослідження підтверджують присутність мікропластику в комерційно доступному меді, виробленому як промислово, так і локально. Подальший аналіз виявив широке поширення мікропластику в суцвіттях різних видів рослин^{73 74}.

За останні роки різко погіршився стан популяцій бджіл у всьому світі. Дослідження показують, що однією з недооцінених причин цього може бути забруднення навколишнього середовища мікропластиком (МП) і нанопластиком (НП). Дослідження показали, що бджоли «збирають» мікропластик з повітря, води, рослин та ґрунту, а потім приносять його у вулик. Бджоли збирають нектар і пилок із рослин, а також воду з природних джерел, і всі ці середовища вже сьогодні містять мікропластик. Волоски на тілі бджіл відіграють роль «пасток» для частинок. Частинки пластику також накопичуються на лапках, особливо в згинах та між сегментами — вони контактують з поверхнями рослин, землі, води та навіть самим вуликом.



«Медоносна бджола є дуже хорошим біологічним індикатором забруднення навколишнього середовища, оскільки вона всюдишує, вкрита волосками, що вловлюють домішки та частинки, присутні в повітрі, чутлива до забруднювачів, дуже рухлива і має широкий радіус польоту, серед іншого»⁷⁵.

⁶⁸Bandmann, V., Müller, J. D., Köhler, T. & Homann, U. Uptake of fluorescent nano beads into BY2-cells involves clathrin-dependent and clathrin-independent endocytosis. *FEBS Letters* 586, 3626–3632 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2012.08.008>

⁶⁹Lian, J. et al. Do polystyrene nanoplastics affect the toxicity of cadmium to wheat (*Triticum aestivum* L.)? *Environmental Pollution* 263, 114498 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114498>

⁷⁰Li, W. et al. Uptake and effect of carboxyl-modified polystyrene microplastics on cotton plants. *Journal of Hazardous Materials* 466, 133581 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133581>

⁷¹Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

⁷²Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P. & Vijver, M. G. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere* 226, 774–781 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>

⁷³Liebezeit, G. and Liebezeit, E. Non-pollen particulates in honey and sugar. *Food Additives & Contaminants: Part A* 30, 2136–2140, 2013. <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.843025>

⁷⁴Basaran, B. et al. Microplastics in honey from Türkiye: Occurrence, characteristic, human exposure, and risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis* 135, 106646 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106646>

⁷⁵Alma, A. M., de Groot, G. S. & Buteler, M. Microplastics incorporated by honeybees from food are transferred to honey, wax and larvae. *Environmental Pollution* 320, 121078 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121078>

До організму бджоли мікро- й нанопластик потрапляє також через кутикулу (зовнішню оболонку тіла). Після потрапляння в тіло бджоли частинки пластику вже через 3 дні досягають мозку, викликаючи у неї порушення пам'яті, орієнтації та когнітивних функцій, критично важливих для пошуку їжі та навігації⁷⁶. Вплив мікропластику на мозок призводить також до зниження здатності відновлення пам'яті. Це критично, тому що бджоли орієнтуються за знайомими орієнтирами в просторі. Нанопластик в мозку бджіл також призводить до того, що бджоли втрачають здатність запам'ятовувати, де знаходяться джерела нектару, гірше реагують на запахи квітів і збиваються зі шляху назад до вулика. Такі когнітивні порушення безпосередньо знижують ефективність запилення і можуть дестабілізувати всю колонію⁷⁶.

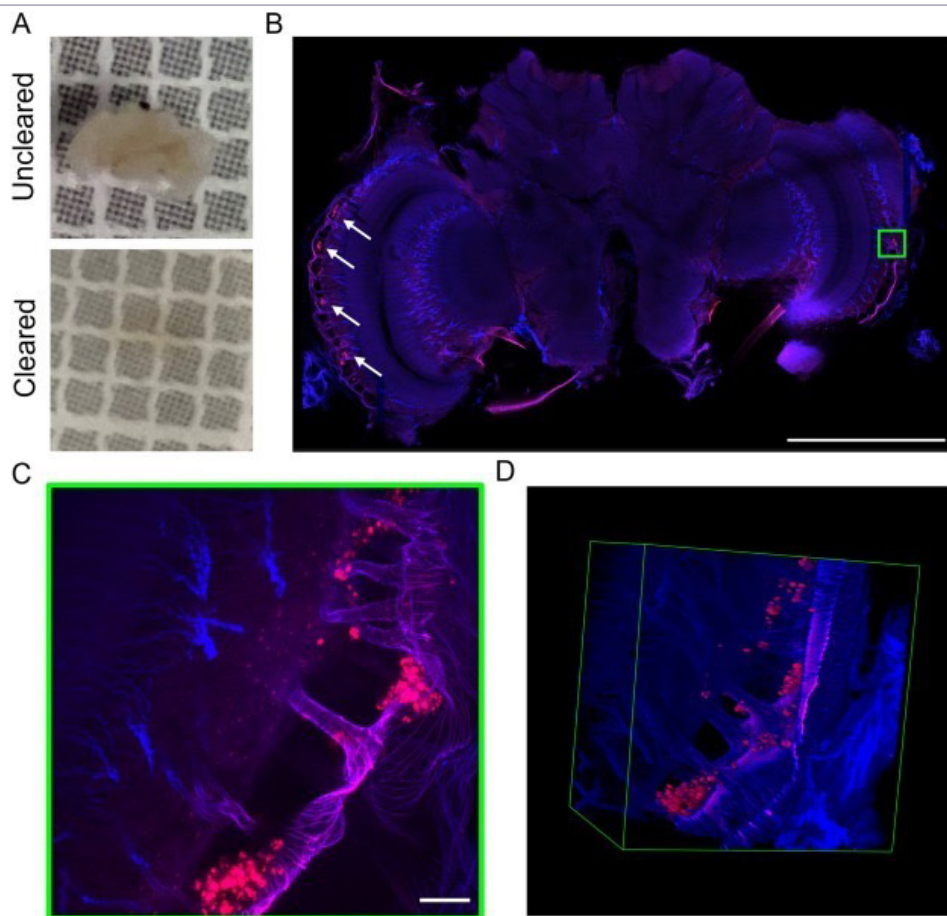


Рисунок 21. Виявлення значної кількості мікропластику в мозку медоносної бджоли.

А) Фотографії препарованого мозку до й після просвічування методом iDISCO.

В) Одиночний оптичний зріз (глибина ~ 200 мкм) 3D-реконструкції всього мозку, отриманої за допомогою двофотонної флуоресцентної мікроскопії з об'єктивом 10х; роздільна здатність — $0,51 \times 0,51 \times 2$ мкм³. Синій колір — автофлуоресценція тканини, червоний — мікропластик з червоною флуоресценцією (позначений білими стрілками). Масштабна лінійка: 1000 мкм.

С) Вставка з високою роздільною здатністю з виділеної зеленим області на зображенні В, отримана з об'єктивом 63х. Зображення є проєкцією максимальної інтенсивності стекової серії глибиною 150 мкм з роздільною здатністю $0,17 \times 0,17 \times 1$ мкм³. Масштабна лінійка: 20 мкм.

Д) 3D-візуалізація стекової серії, представленої в С. Розміри: $170 \times 170 \times 150$ мкм³.

Джерело: Pasquini, E. et al. Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition. Science of The Total Environment 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>

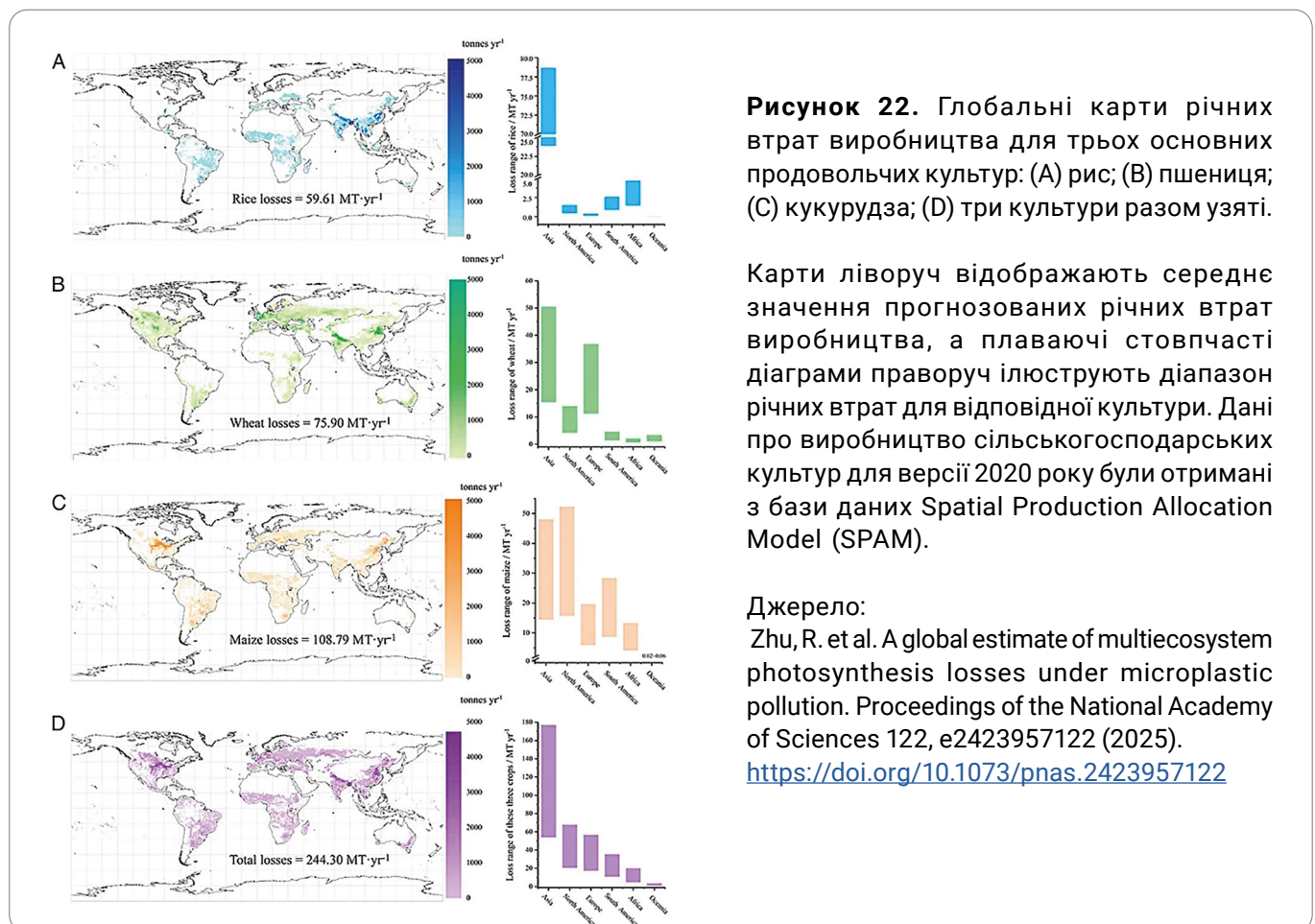
⁷⁶Pasquini, E. et al. Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition. Science of The Total Environment 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>

Потрапляючи в організм бджоли, нанопластик також викликає пошкодження кишківника, ослаблення імунної системи і підвищує сприйнятливість до вірусів, що може призводити до смерті бджіл навіть за відсутності гострої токсичності пластику^{75,77}. Крім цього, фрагменти пластику накопичуються не лише в бджолах, але й у меду, воску та личинках, що утворює замкнутий цикл пластикового забруднення всередині вулика⁷⁵.

Це потенційно може мати серйозні наслідки не лише для бджіл, але й для продовольчої безпеки. Бджоли — ключові запилювачі, тому їхнє ослаблення безпосередньо впливає на врожайність сільськогосподарських культур.

Пошкодження мозку, зниження маси тіла і ослаблення імунітету призводять до зниження запилювальної активності, що, як попереджають вчені, може поглибити кризу глобального виробництва продовольства⁷⁷. Бджоли діють як активні біоіндикатори забруднення, і вже зараз значні кількості мікропластику знайдено в меду, незалежно від країни виробництва⁷⁸.

Також вплив МП знижує загальний вміст хлорофілу на 5,63–17,42 %, що призводить до втрати світового виробництва рису, пшениці та кукурудзи. Така втрата становить 4,11–13,52 % від загального річного світового виробництва цих культур, що має значні наслідки для продовольчої безпеки⁷⁹ (рис. 22).



⁷⁷Sheng, D., Jing, S., He, X., Klein, A.-M., Köhler, H.-R. & Wanger, T. C. Plastic pollution in agricultural landscapes: an overlooked threat to pollination, biocontrol and food security. *Nature Communications* 15, 8413 (2024).

⁷⁸Al Naggar, Y. A., Sayes, C. M., Collom, J. C., Ayorinde, T., Qi, S., El-Seedi, H. R., Paxton, R. J. & Wang, K. Chronic exposure to polystyrene microplastic fragments has no effect on honey bee survival, but reduces feeding rate and body weight. *Toxics* 11, 100 (2023).

⁷⁹Zhu, R. et al. A global estimate of multiecosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

Ліси як накопичувачі МНП

Аналіз виявив присутність нанопластику в коренях, стеблах, листі та хвої в усіх досліджених концентраціях і часових інтервалах. Концентрації нанопластику в коренях перевищували їх у надземних частинах щонайменше в 10 разів.

Пластикове забруднення негативно позначається на функціонуванні як вічнозелених хвойних, так і листопадних видів дерев, викликаючи окислювальний стрес і знижуючи ефективність фотосинтезу, що може призвести до уповільнення росту й навіть загибелі рослини. Дослідження показують, що порушення у стадіях фотосинтезу призводять до накопичення надлишкової світлової енергії, яка, не перетворюючись на хімічну, викликає фотоокислювальний стрес і пошкодження тканин рослин. Для захисту рослини активують фотозахисні механізми, в яких каротиноїди розсіюють зайву енергію у вигляді тепла⁸⁰.

Порушуючи фотосинтез, викликаючи окислювальний стрес і знижуючи фізіологічну активність рослин, пластикове забруднення посилює вразливість екосистем до змін клімату. Ці дані підкреслюють масштаб впливу пластикового забруднення на рослинні угруповання, що, в свою чергу, ставить питання про його вплив на наземних тварин, які залежать від цих екосистем.

Як нанопластик руйнує фауну

Дані численних досліджень свідчать, що накопичення мікро- й нанопластику в навколишньому середовищі, зокрема в рослинах, впливає на розвиток тваринництва⁸¹, зачіпаючи ланцюжки харчування та здоров'я тварин. Спостереження на молочній фермі в Італії показали, що всі зразки сіна райграсу містили мікропластик⁸². Дослідження в Індії виявило забруднення мікропластиком поліетилентерефталату в 100 % зразків раціону молочних корів, з концентраціями 89–326 г/кг⁸³.

⁸⁰Murazzi, M. E., Pradel, A., Schefer, R. B., Gessler, A. & Mitrano, D. M. Uptake and physiological impacts of nanoplastics in trees with divergent water use strategies. *Environ. Sci.: Nano* 11, 3574–3584 (2024). <https://doi.org/10.1039/D4EN00286E>

⁸¹Borreani, G. & Tabacco, E. 9 - Plastics in Animal Production. in *A Guide to the Manufacture, Performance, and Potential of Plastics in Agriculture* (ed. Orzolek, M. D.) 145–185 (Elsevier, 2017). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102170-5.00009-9>

⁸²Glorio Patrucco, S., Rivoira, L., Bruzzoniti, M. C., Barbera, S. & Tassone, S. Development and application of a novel extraction protocol for the monitoring of microplastic contamination in widely consumed ruminant feeds. *Science of The Total Environment* 947, 174493 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174493>

⁸³Maganti, S. S. & Akkina, R. C. Detection and characterisation of microplastics in animal feed. *ojafr* 13, 348–356 (2023). <https://doi.org/10.51227/ojafr.2023.50>

Аналіз підтвердив присутність мікропластику в фолікулярній рідині великої рогатої худоби⁸⁴, молоці⁸⁵, калі овець⁸⁶, яловичині та крові⁸⁷, вказуючи на значний вплив на жуйних тварин. Згідно з даними, 50–60 % сторонніх тіл, вилучених із забитої худоби⁸⁸, включно з дрібними жуйними тваринами, такими як кози та вівці, є пластиковими матеріалами. Крім того, мікропластик виявлено у внутрішніх тканинах міських собак і котів⁸⁹, кишківнику домашніх качок⁹⁰ та легеневій тканині свиней⁹¹.

Дані досліджень підтверджують, що мікропластик завдає шкоди тваринам не лише сам собою, але і через добавки, що застосовуються під час його виробництва, а також забруднюючі речовини, що поглинаються ним з навколишнього середовища, викликаючи пошкодження різного ступеня⁹². Спостереження показують, що мікропластик провокує у тварин токсичні ефекти, включно з окислювальним стресом, пошкодженням кишківника, імунотоксичністю, а також репродуктивною токсичністю та нейротоксичністю⁹³ (рис. 23). До того ж, мікропластик служить носієм для таких забруднювачів, як важкі метали, антибіотики, стійкі органічні сполуки і пестициди, що підсилює потенційні ризики для екосистем, здоров'я тварин і людини⁹⁴.

⁸⁴Grechi, N. et al. Microplastics are present in women's and cows' follicular fluid and polystyrene microplastics compromise bovine oocyte function in vitro. *eLife* 12, (2023). <https://doi.org/10.7554/eLife.86791.1>

⁸⁵Da Costa Filho, P. A. et al. Detection and characterization of small-sized microplastics ($\geq 5 \mu\text{m}$) in milk products. *Sci Rep* 11, 24046 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03458-7>

⁸⁶Beriot, N., Peek, J., Zornoza, R., Geissen, V. & Huerta Lwanga, E. Low density-microplastics detected in sheep faeces and soil: A case study from the intensive vegetable farming in Southeast Spain. *Science of The Total Environment* 755, 142653 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142653>

⁸⁷van der Veen, I., van Mourik, L.M., van Velzen, M.J.M., Groenewoud, Q.R., & Leslie, H.A. Plastic particles in livestock feed, milk, meat and blood: A pilot study. Report EH22-01, 29 April 2022. <https://vakbladvoedingsindustrie.nl/storage/app/media/Rapporten/rapporten%202022/07-juli/VOE-2022-JUL-PLASTICSOUF.pdf> (Дата доступу: 01.05.2025)

⁸⁸Galyon, H. et al. Long-term in situ ruminal degradation of biodegradable polymers in Holstein dairy cattle. *JDS Communications* 4, 70–74 (2023). <https://doi.org/10.3168/jdsc.2022-0319>

⁸⁹Prata, J. C. et al. Microplastics in Internal Tissues of Companion Animals from Urban Environments. *Animals* 12, 1979 (2022). <https://doi.org/10.3390/ani12151979>

⁹⁰Susanti, R., Yuniastuti, A. & Fibriana, F. The Evidence of Microplastic Contamination in Central Javanese Local Ducks from Intensive Animal Husbandry. *Water Air Soil Pollut* 232, 178 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05142-y>

⁹¹Li, H. et al. Detection of microplastics in domestic and fetal pigs' lung tissue in natural environment: A preliminary study. *Environmental Research* 216, 114623 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114623>

⁹²Brennecke, D., Duarte, B., Paiva, F., Caçador, I. & Canning-Clode, J. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 178, 189–195 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.003>

⁹³Su, M. et al. Toxicity Mechanisms of Microplastic and Its Effects on Ruminant Production: A Review. *Biomolecules* 15, 462 (2025). <https://doi.org/10.3390/biom15040462>

⁹⁴Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V. & Uricchio, V. F. A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *IJERPH* 17, 1212 (2020). <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>

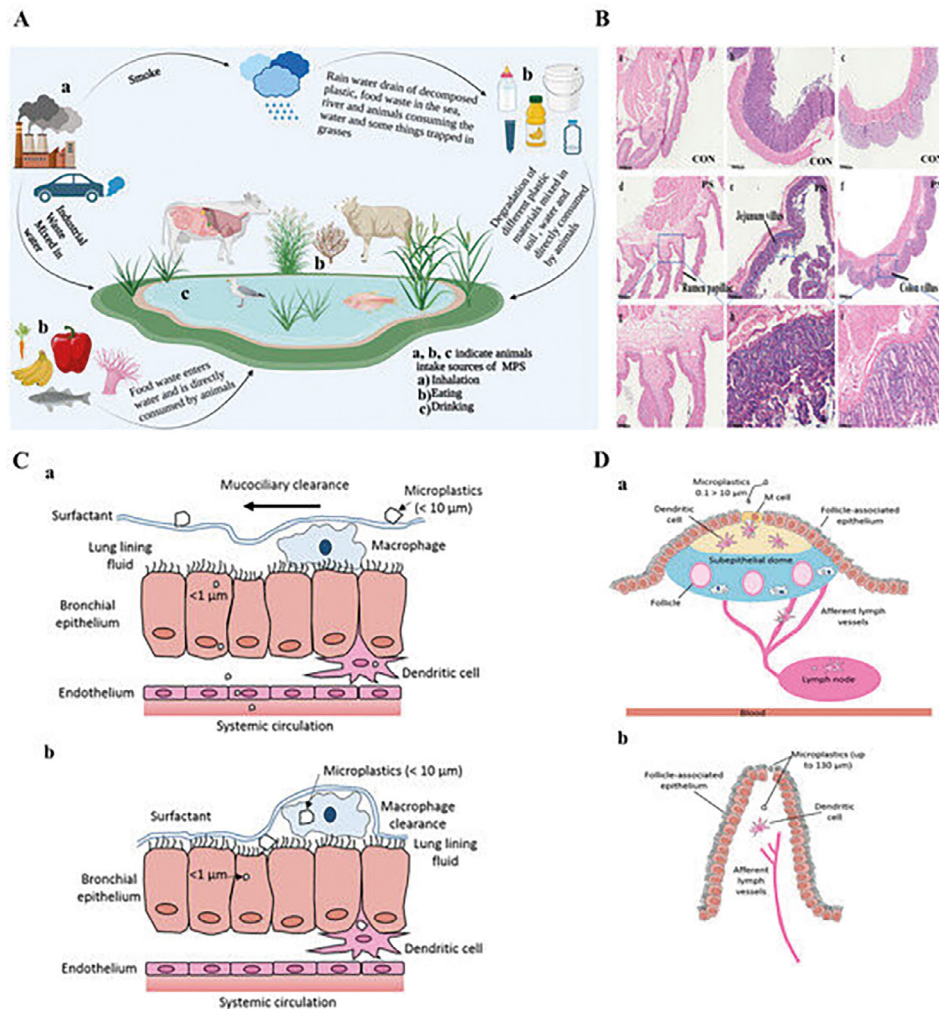


Рисунок 23. Схематичне зображення шляхів надходження мікропластику до організму тварин і його впливу на шлунково-кишковий тракт.

(А) Шляхи потрапляння мікропластику (МП) в організм тварин.

(В) Стан шлунково-кишкового тракту під впливом полістирольних частинок (ПС) до і після експозиції: Зображення, забарвлені гематоксилін-еозином (Н&Е), рубця (а), порожньої кишки (b) і товстої кишки (c) в контрольній групі (КГ).

(d) Н&Е-зображення рубця групи з полістирольними частинками малого розміру (Дрібний ПС).

(e) Н&Е-зображення порожньої кишки групи з полістирольними частинками великого розміру (Великий ПС).

(f) Н&Е-зображення товстої кишки групи з полістирольними частинками великого розміру (Великий ПС).

(g–i) Локально збільшені зображення, що відповідають (d–f) відповідно.

(С) Потенційні механізми поглинання та виведення мікропластику (розміром від 0,1 до 10 мкм) в легенях:

(a) У верхніх дихальних шляхах (центральної частині легенів), де легенева мембрана товща, легеневі рідини (сурфактант і слиз) знижують ймовірність зміщення мікропластику. Частинки розміром більше 1 мкм видаляються в'ячастою слизовою оболонкою. Частинки менше 1 мкм можуть поглинатися епітелієм.

(b) Якщо аеродинамічний діаметр мікропластику дозволяє йому осідати в глибоких відділах легенів, він може проникати через більш тонкий шар легеневої рідини й контактувати з епітелієм, поширюючись шляхом дифузії або активного клітинного захоплення.

(D) Передбачувані шляхи поглинання мікропластику з шлунково-кишкового тракту (ШКТ):

(a) Поглинання мікропластику (розміром від 0,1 до 10 мкм) з просвіту ШКТ через М-клітини збірних лімфатичних вузлів Пейєра шляхом ендоцитозу. М-клітини відбирають і транспортують частинки з просвіту кишківника в лімфоїдну тканину слизової оболонки.

(b) Мікропластик поглинається з просвіту ШКТ шляхом параклітинної абсорбції. Частинки, що не розкладаються, такі як мікропластик, можуть механічно вбудовуватися в підлеглі тканини через слабкі з'єднання в одношаровому епітелії. Дендритні клітини здатні захоплювати ці частинки, транспортуючи їх в лімфатичні судини і вени, розташовані нижче. Частинки можуть розподілятися у вторинні тканини, зокрема в печінку, м'язи та мозок.

Джерело: Su, M. et al. Toxicity Mechanisms of Microplastic and Its Effects on Ruminant Production: A Review. Biomolecules 15, 462 (2025). <https://doi.org/10.3390/biom15040462>

Дані спостережень свідчать, що дикі тварини помилково сприймають пластикові відходи за їжу. Це призводить до їх накопичення в кишківнику. У Зімбабве⁹⁵ та на Шрі-Ланці⁹⁶ слони, які харчувалися на відкритому звалищі, загинули від неперетравлюваного пластику. У японському парку Нара дикі олені вмирали від ускладнень, викликаних проковтуванням пластикових відходів, залишених туристами⁹⁷. Дослідження понад 30 000 верблюдів поблизу Дубая в Об'єднаних Арабських Еміратах виявило, що 1 % тварин, ймовірно, загинув через пластик, що накопичився в їхньому травному тракті⁹⁸.

Вчені ввели термін «полібезоар» для опису щільної маси неперетравлюваних матеріалів, таких як пластик, мотузки, сміття й сольові відкладення, яка формує каменеподібний конкремент в шлунку або кишківнику, особливо у жуйних. Термін об'єднує «полі» (синтетичну речовину) та «безоар» (кам'янисте утворення). Спостереження підтверджують, що полібезоари викликають закупорку шлунково-кишкового тракту, сепсис від росту бактерій, зневоднення і недоїдання (рис. 24).



Рисунок 24. Полібензоари, знайдені всередині мертвих верблюдів у пустелі, недалеко від Дубая. Найбільший із проаналізованих для нового дослідження важив майже 64 кг (141 фунт). Джерело: Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. The plight of camels eating plastic waste. Journal of Arid Environments 185, 104374 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>

⁹⁵Breton, J. L. Visitation patterns of African elephants (*Loxodonta africana*) to a rubbish dumpsite in Victoria Falls, Zimbabwe. *Pachyderm* 60, 45–54 (2019). <https://doi.org/10.69649/pachyderm.v60i.30>

⁹⁶Animal Survival International. Sri Lankan Elephants Die After Eating Plastic From Rubbish Dumps. (2020) <https://animalsurvival.org/habitat-loss/sri-lankan-elephants-die-after-eating-plastic-from-rubbish-dumps> (Дата доступу: 01.05.2025)

⁹⁷Agence France-Presse. Japan's famous Nara deer dying from eating plastic bags. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/world/2019/jul/10/japans-famous-nara-deer-dying-from-eating-plastic-bags> (Дата доступу: 01.05.2025)

⁹⁸Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. The plight of camels eating plastic waste. *Journal of Arid Environments* 185, 104374 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>

Передача МНП по харчових ланцюгах від планктону до людини

Накопичення пластику в океані має значний негативний вплив на морські екосистеми. Наукові спостереження за останні чотири десятиліття виявили мікропластик практично в усіх морських середовищах світу⁹⁹. Дослідження підтверджують, що пластикове сміття загрожує морському біорізноманіттю, зачіпаючи не менше 690 видів, зокрема китоподібних, ластоногих, морських птахів, черепах, риб і ракоподібних¹⁰⁰. Проковтування пластику піддає тварин впливу додаткових токсинів. Хімічні речовини з пластиків вилужуються в організм після споживання, передаючись по харчових ланцюгах від здобичі до хижака. Наслідки заплутування або проковтування варіюються від летальних до сублетальних, викликаючи порушення годування, проблеми з травленням, недоїдання, хвороби, зниження репродуктивної здатності, уповільнення росту й скорочення тривалості життя¹⁰¹. Через свої невеликі розміри мікропластик поглинається планктоном — ключовою ланкою морських харчових ланцюгів. Планктон споживається багатьма морськими видами, а ті, хто не харчуються ним безпосередньо, поїдають організми, які вже засвоїли планктон. Таким чином, мікропластик інтегрується до харчових ланцюгів (рис. 25–26).

У 1999 році аналіз зразків поверхневих вод у центральному кругообігу північної частини Тихого океану виявив, що маса пластику перевищує масу зоопланктону — основного джерела живлення екосистеми — у шість разів¹⁰², що підкреслює перевагу пластику над живими організмами в океані.

Розрахунки, засновані на даних спостережень, показують, що концентрація мікропластику зростає зі збільшенням розміру риби. Дані свідчать, що найбільша тварина — кит — щодня поглинає до 43,6 кг пластику, причому 98,5 % цього обсягу надходить через їжу, а не безпосередньо з води, оскільки мікропластик вже міститься в здобичі¹⁰³.

⁹⁹Ivar Do Sul, J. A. & Costa, M. F. The present and future of microplastic pollution in the marine environment. *Environmental Pollution* 185, 352–364 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.036>

¹⁰⁰O'Hanlon, N. J., James, N. A., Masden, E. A. & Bond, A. L. Seabirds and marine plastic debris in the northeastern Atlantic: A synthesis and recommendations for monitoring and research. *Environmental Pollution* 231, 1291–1301 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.101>

¹⁰¹Ocean Blue Project. Plastic Pollution in the Ocean: How Many Animals Die from Pollution? (2021) <https://oceanblueproject.org/wp-content/uploads/2023/02/how-many-animals-die-from-plastic-pollution-ocean-blue-report.pdf> (Дата доступу: 01.05.2025)

¹⁰²Moore, C. J., Moore, S. L., Leecaster, M. K. & Weisberg, S. B. A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre. *Marine Pollution Bulletin* 42, 1297–1300 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)

¹⁰³Kahane-Rapport, S. R. et al. Field measurements reveal exposure risk to microplastic ingestion by filter-feeding megafauna. *Nat Commun* 13, 6327 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5>

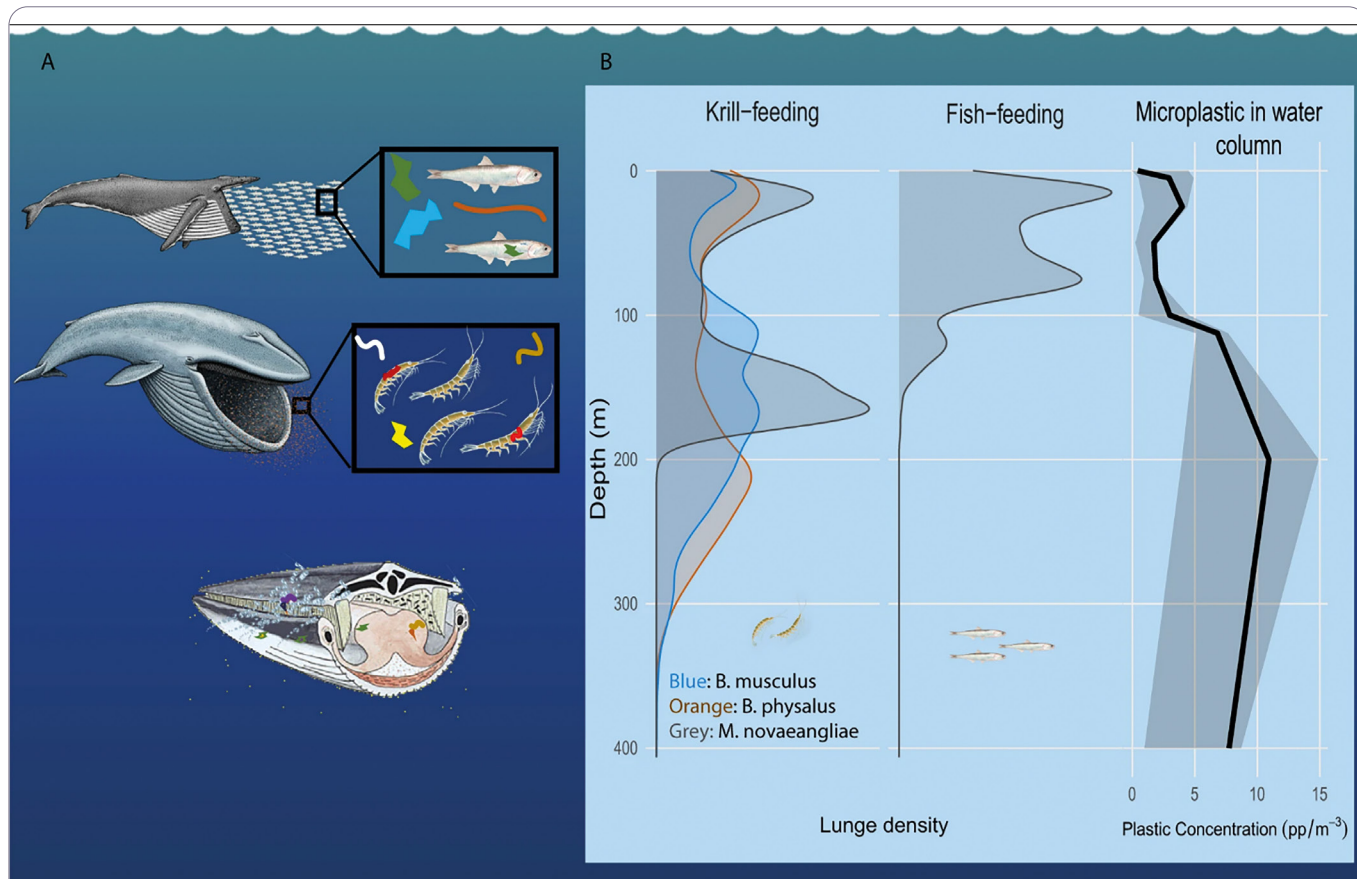


Рисунок 25. Глибина харчової поведінки смугастих китів залежно від концентрації мікропластику в товщі води.

а — Пластик, проковтнутий китами за день, змодельований як сума (i) пластику, відфільтрованого з води за день, і (ii) пластику, спожитого здобиччю за день. Діапазон можливого ризику впливу проковтування пластику: низький, середній та високий, — оскільки деякі змінні не мають вичерпних даних; б — Глибина випадання від розміщень у затоці Монтерей, що відповідає профілю глибини концентрації пластику в затоці Монтерей. Китові та об'єкти видобутку були проілюстровані Алексом Боерсмом, а діаграма фільтрації в розрізі була проілюстрована Скоттом Лендрі з Центру прибережних досліджень.

Джерело: Kahane-Rapport, S. R. et al. Field measurements reveal exposure risk to microplastic ingestion by filter-feeding megafauna. Nat Commun 13, 6327 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5>



Рисунок 26. Схематичне зображення проникнення пластику в харчові ланцюги

Пластик вбиває морські організми

Щорічно від забруднення гине близько 1 мільйона морських птахів і 100 000 морських ссавців¹⁰⁴. Спостереження підтверджують зв'язок між проковтнутим сміттям і смертністю морських птахів. Дослідження 1733 особин із 51 виду виявило, що всередині 557 птахів (32,1 %) знаходилося морське сміття — від 1 до 40 предметів, із максимальною вагою 3340 мг і об'ємом 3621 мм³¹⁰⁵.

Окремі дані свідчать, що деякі пластики виділяють диметилсульфід — хімічну речовину, що імітує нюховий сигнал, який використовується морськими птахами для ідентифікації їжі¹⁰⁶. Нові дослідження також встановили, що проковтування пластику викликає у пташенят ураження нирок, печінки та шлунка, а також ураження мозку, схожі з хворобою Альцгеймера. Це підкреслює руйнівний вплив пластикового забруднення на морську фауну¹⁰⁷. У кожній особини всіх семи видів черепах у трьох океанічних басейнах було виявлено синтетичні частинки¹⁰⁸ (рис. 27).

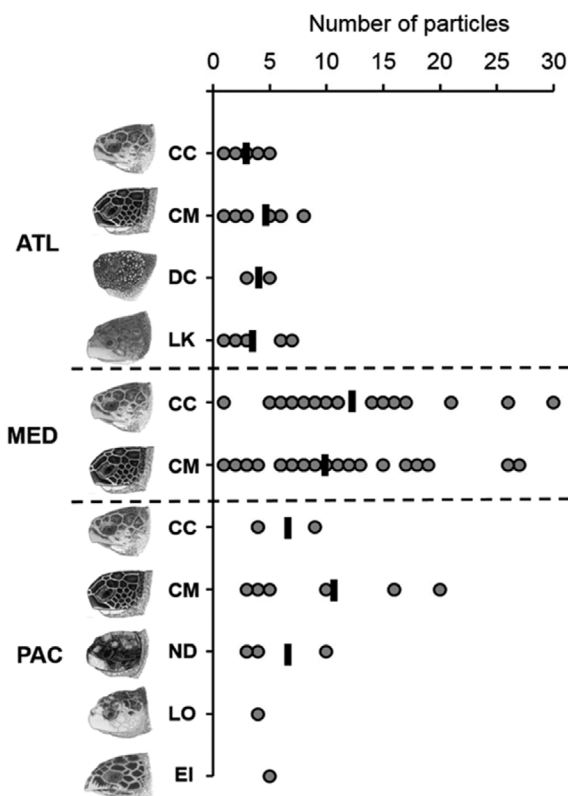


Рисунок 27. Проковтування синтетичних мікрочастинок усіма видами морських черепах із трьох океанічних басейнів. Загальна кількість частинок, ідентифікованих у кожній підвибірці об'ємом 100 мл для кожного виду в кожному океанічному басейні. Чорна лінія — середня кількість частинок. Фігурки черепів морських черепах використовуються з дозволу WIDECAST; оригінальні малюнки Тома Макфарланда.

Джерело: Duncan, E. M. et al. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. *Global Change Biology* 25, 744–752 (2019). <https://doi.org/10.1111/gcb.14519>

¹⁰⁴WWF-Australia. How many birds die from plastic pollution? <https://wwf.org.au/blogs/how-many-birds-die-from-plastic-pollution> (Дата доступу: 01.05.2025)

¹⁰⁵Roman, L., Hardesty, B. D., Hindell, M. A. & Wilcox, C. A quantitative analysis linking seabird mortality and marine debris ingestion. *Sci Rep* 9, 3202 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36585-9>

¹⁰⁶Savoca, M. S., Wohlfeil, M. E., Ebeler, S. E. & Nevitt, G. A. Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. *Sci. Adv.* 2, e1600395 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>

¹⁰⁷De Jersey, A. M. et al. Seabirds in crisis: Plastic ingestion induces proteomic signatures of multiorgan failure and neurodegeneration. *Sci. Adv.* 11, eads0834 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.ads0834>

¹⁰⁸Duncan, E. M. et al. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. *Global Change Biology* 25, 744–752 (2019). <https://doi.org/10.1111/gcb.14519>

Дослідження 171 774 особин із 555 видів морських риб показують, що 386 видів морських риб, у тому числі 210 комерційно значущих, споживають пластикове сміття¹⁰⁹. Частота проковтування мікропластику рибами, за даними досліджень, склала 26 %, збільшившись удвічі за останнє десятиліття (рис. 28). Аналіз виявив позитивну кореляцію між великою кількістю пластику в поверхневих водах (рис. 29) і його споживанням морськими організмами (рис. 30).

Лабораторні дослідження показують, що сполуки з пластику, проникаючи в тканини риб, знижують активність, порушують роботу печінки, пошкоджують мозок, а також уповільнюють ріст і погіршують репродуктивну функцію^{109 110 111}.

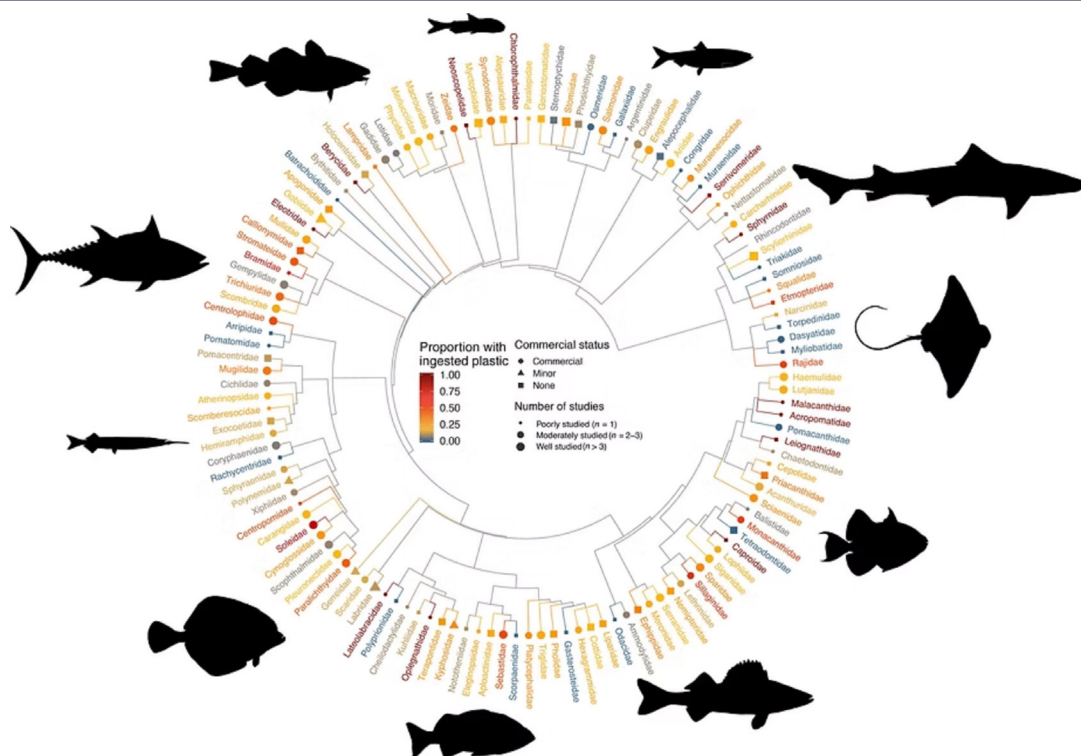


Рисунок 28. Родини риб і проковтування пластику.

Філогенетичні зв'язки родин морських риб (n = 131), забарвлені залежно від частоти проковтування пластику. Форми кожного кінчика позначають частку видів у межах родини в наборі даних, які виловлюються в комерційних цілях (0 – немає видів, що виловлюються в комерційних цілях; незначні – 25 % видів, що виловлюються в комерційних цілях; комерційні – > 25 % видів, що виловлюються в комерційних цілях). Розмір вершини вказує на кількість досліджень, проведених за видами в цій родині. Це виділяє 15 добре вивчених родин (n > 10 особин, > 2 видів) із високою частотою проковтування пластику (FO plastic > 0,25); 67 із цих родин із записами про проковтування пластику також є комерційними.

Джерело: Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. *Global Change Biology* 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

¹⁰⁹Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. *Global Change Biology* 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

¹¹⁰Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

¹¹¹Avio, C. G., Gorb, S. & Regoli, F. Experimental development of a new protocol for extraction and characterization of microplastics in fish tissues: First observations in commercial species from Adriatic Sea. *Marine Environmental Research* 111, 18–26 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.06.014>

Microplastics in the surface ocean, 1950 to 2050

Our World
in Data

Microplastics are buoyant plastic materials smaller than 0.5 centimeters in diameter. Future global accumulation in the surface ocean is shown under three plastic emissions scenarios: (1) emissions to the oceans stop in 2020; (2) stagnate at 2020 rates; or (3) continue to grow until 2050 in line with historical plastic production rates.

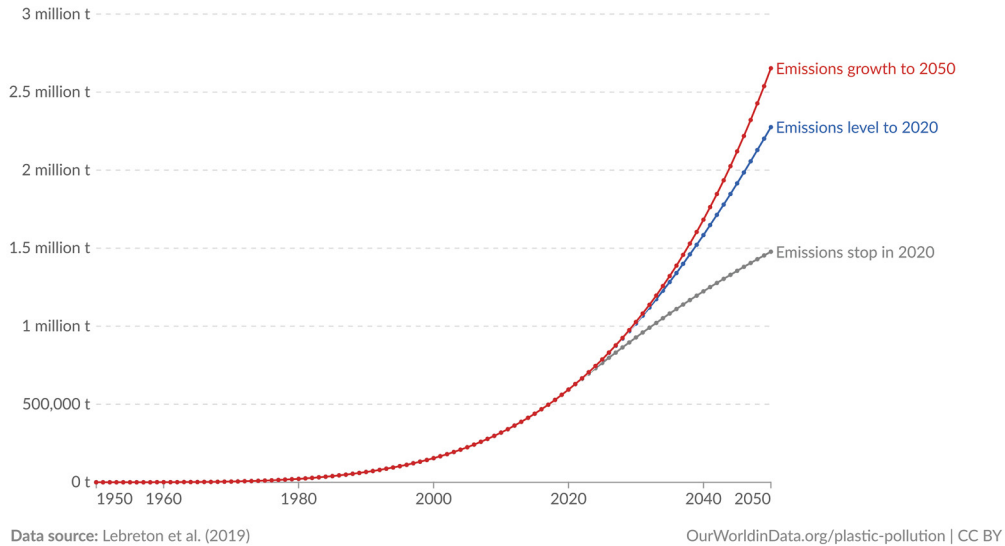


Рисунок 29. Графік зростання кількості мікропластику на поверхні океану з прогнозом до 2050 року.

Джерело: <https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean> (Дата доступу: 01.05.2025)

Джерело даних: Lebreton, L., Egger, M. & Slat, B. A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean. Sci Rep 9, 12922 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49413-5>

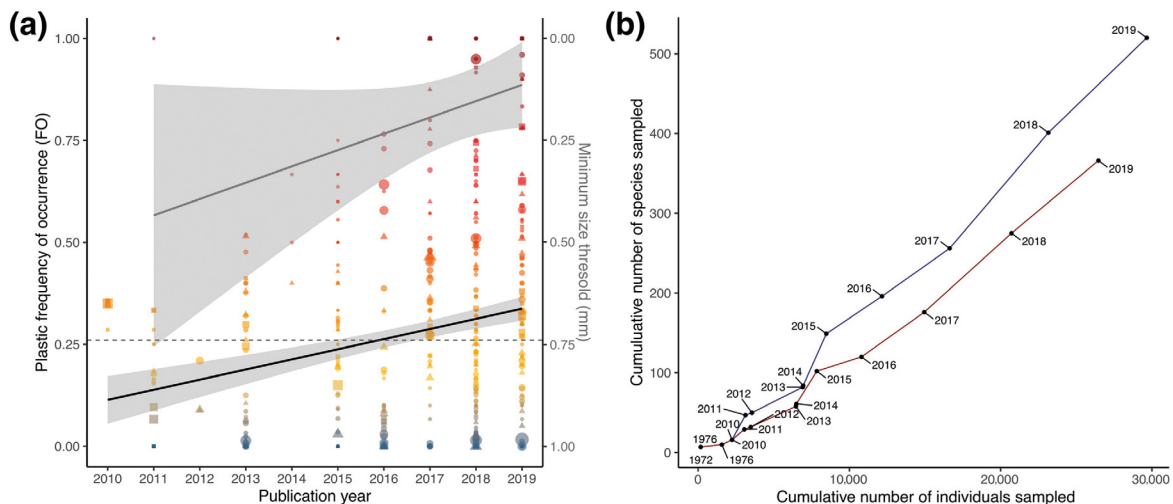


Рисунок 30. Часові тенденції споживання пластику рибами. (а) Верхня сіра лінія вказує на те, що з 2011 року спостерігається тенденція до виявлення дедалі дрібніших частинок. Нижня чорна лінія показує збільшення частоти виявлення пластику (FO) серед усіх видів риб з 2010 до 2019 року. Протягом цього періоду частота споживання пластику значно зросла зі швидкістю 2,4 % на рік. Горизонтальна пунктирна лінія представляє FO 0,26, середню частоту споживання пластику рибами в усьому світі. (б) Крива накопичення видів, де синя лінія вказує на сукупну кількість видів, досліджених із плином часу, включаючи види, виявлені з поглинутим пластиком і без нього, а червона лінія зображує тільки види з поглинанням пластику. Відсутність асимптоти на червоній лінії вказує на високу ймовірність того, що в найближчі роки продовжуватимуть з'являтися додаткові види, які поглинатимуть пластик.

Джерело: Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. Global Change Biology 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

Корали під ударом: мікрозагроза глобального масштабу

Пластикове забруднення створює зростаючу небезпеку для коралових рифів, проникаючи до їхніх харчових ланцюгів і посилюючи поширення хвороб і руйнування структури рифових спільнот. Аналіз виявив антропогенне сміття на 77 з 84 досліджених рифів, включаючи ізольовані атоли центральної частини Тихого океану¹¹². У п'яти з шести вивчених видів зареєстровано негативні наслідки для здоров'я¹¹³, такі як знебарвлення й некроз тканин¹¹⁴ (рис. 31).

Крупніші пластикові фрагменти сприяють передачі захворювань і фізичних пошкоджень, посилюючи вразливість коралів до патогенів¹¹⁵. Ці ефекти зачіпають скелетний мікробіом, який відіграє ключову роль у підтримці здоров'я коралових колоній¹¹⁶ (рис. 32). Дослідження також виявляють, що біоплівки на мікропластику, відомі як «пластисфери»¹¹⁴, здатні викликати дисбіоз мікробіому коралів¹¹⁷. При контакті з пластиком ризик захворювань коралів зростає з 4 до 89 % (рис. 33). Загибель коралових рифів істотно впливає на скорочення біорізноманіття, оскільки вони забезпечують середовище існування для чверті морських видів¹¹⁵.

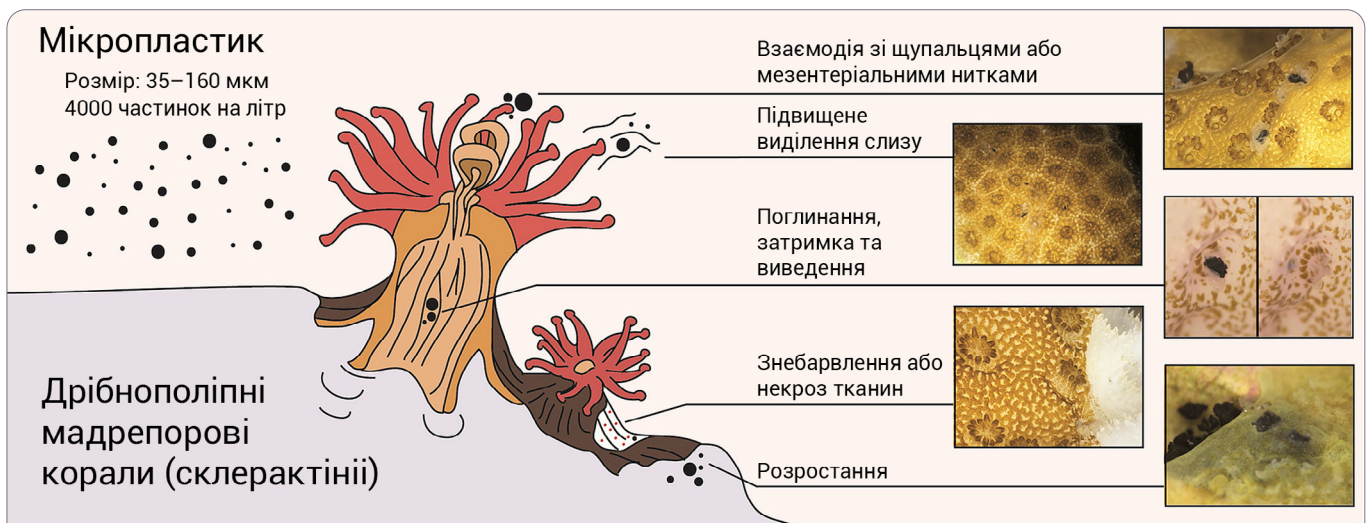


Рисунок 31. Вплив пластику на стан коралових рифів.

Корали можуть реагувати на частинки пластику різними механізмами очищення (наприклад, війковою дією, виробленням слизу або розширенням тканин), утриманням частинок за рахунок розростання або екскрецією помилково проковтнутих частинок.

Джерело: Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution* 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>

¹¹²Pinheiro, H. T. et al. Plastic pollution on the world's coral reefs. *Nature* 619, 311–316 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06113-5>

¹¹³Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution* 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>

¹¹⁴Pantos, O. Microplastics: impacts on corals and other reef organisms. *Emerging Topics in Life Sciences* 6, 81–93 (2022). <https://doi.org/10.1042/ETLS20210236>

¹¹⁵Lamb, J. B. et al. Plastic waste associated with disease on coral reefs. *Science* 359, 460–462 (2018). <https://doi.org/10.1126/science.aar3320>

¹¹⁶Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. et al. Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species. *Commun Biol* 4, 431 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01961-1>

¹¹⁷Lear, G., Kingsbury, J.M., Franchini, S. et al. Plastics and the microbiome: impacts and solutions. *Environmental Microbiome* 16, 2 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40793-020-00371-w>

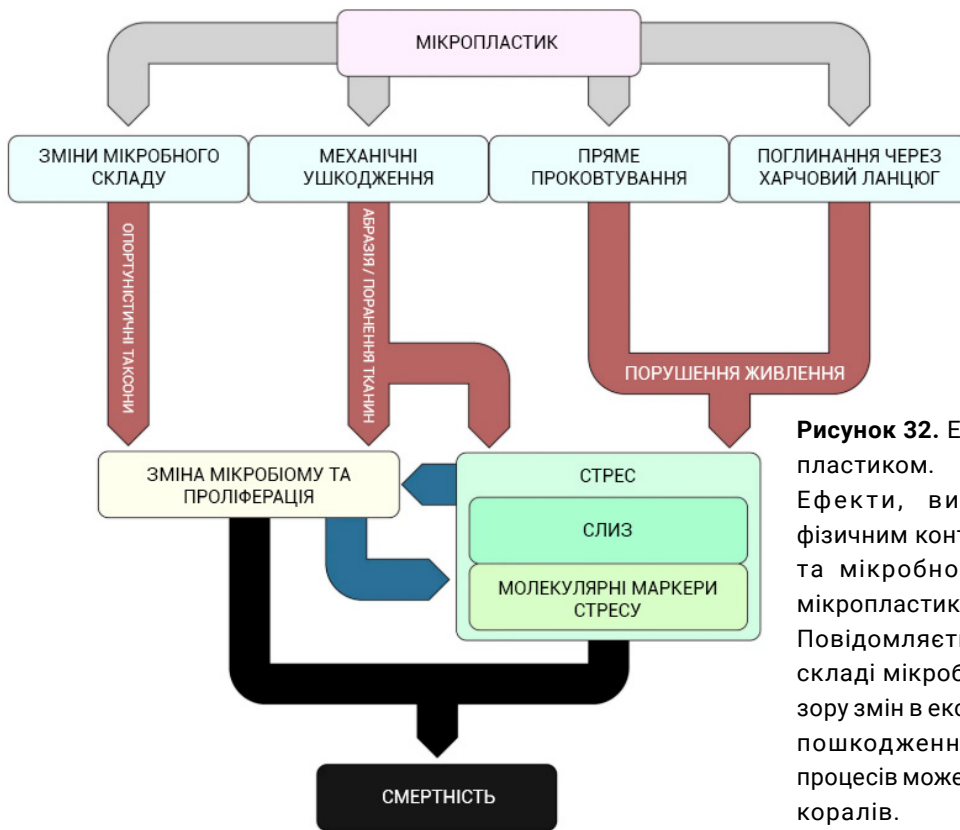


Рисунок 32. Ефекти, викликані контактом із пластиком.

Ефекти, викликані проковтуванням, фізичним контактом із кораловою тканиною та мікробною реакцією на присутність мікропластикових частинок у морській воді. Повідомляється про подальші зрушення у складі мікробіома коралів та стрес із точки зору змін в експресії генів та окислювального пошкодження ДНК. Поєднання всіх цих процесів може зрештою призвести до загибелі коралів.

Джерело: Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. et al. Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species. *Commun Biol* 4, 431 (2021).

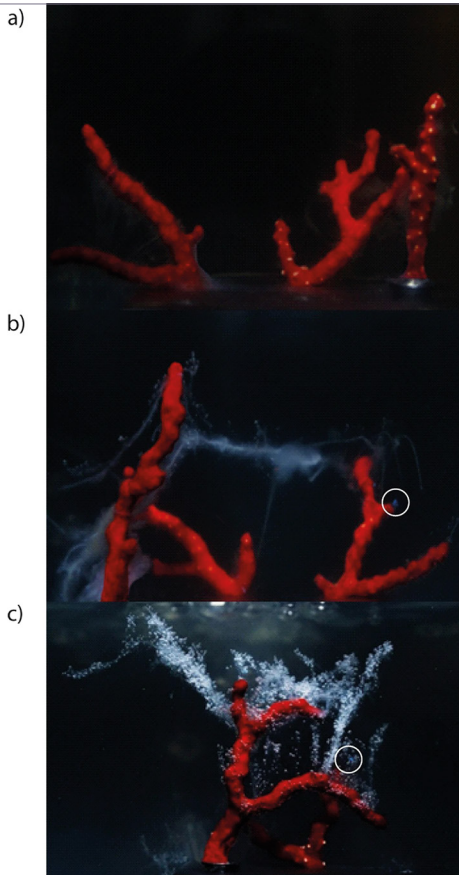


Рисунок 33. Виділення слизу збільшується зі збільшенням концентрації частинок мікропластику.

а — низька, b — середня та c — висока концентрація частинок мікропластику. Виділення слизу збільшується зі збільшенням концентрації частинок мікропластику. Білі кола позначають частинки мікропластику, захоплені слизом (частинки поліетилену).

Джерело: Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. et al. Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species. *Commun Biol* 4, 431 (2021).

<https://doi.org/10.1038/s42003-021-01961-1>

Вплив МНП на кисневий баланс екосистем

Спостереження свідчать, що пластик у навколишньому середовищі деградує переважно під впливом сонячного випромінювання. Цей процес змінює його хімічний склад і структуру. Дослідження підтверджують, що реакції, викликані сонячним світлом, підсилюють вилугування розчинених органічних сполук, що впливає на біогеохімію морської води та стимулює ріст гетеротрофних бактерій¹¹⁸ (рис. 34).

Загрози від мікропластику в морському середовищі

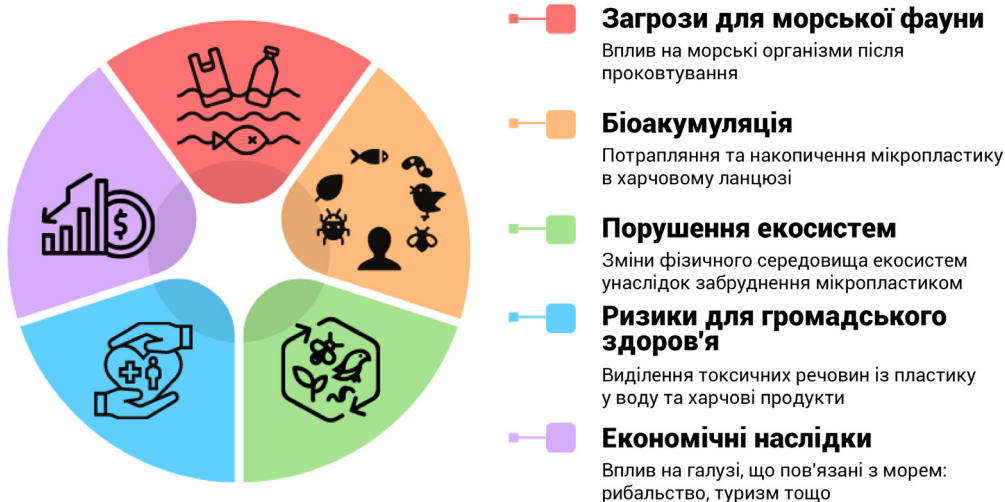


Рисунок 34. Загрози, створювані морським мікропластиком.

Джерело: Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

Багаторічні дослідження показують, що хімічні сполуки, які виділяються пластиком у морську воду під час його розкладання, походять або з самого матеріалу, або з добавок, що використовуються для надання полімеру кольору або стійкості. Деякі з цих сполук є органічними кислотами, що пояснює їхню роль у зниженні pH. Таким чином, пластик посилює закислення океану (рис. 35), а це в свою чергу може значно порушити функціонування природних систем Землі¹¹⁹.

¹¹⁸Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>

¹¹⁹Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

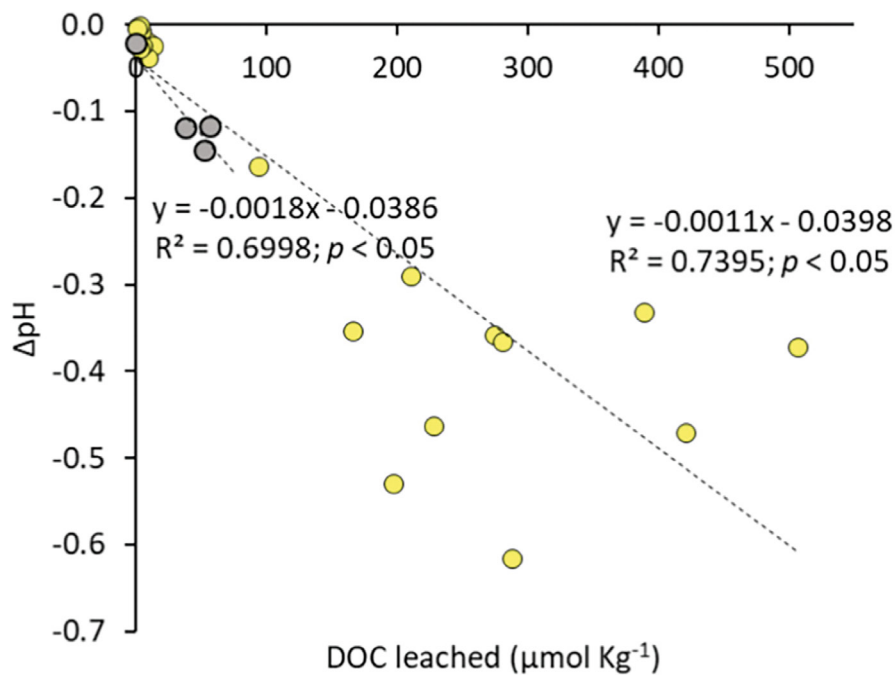


Рисунок 35. Взаємозв'язки між зміною pH і DOC, вилуженого з пластику, нанесені на графік для кожного окремого повторного зразка всіх експериментів. Також включено контрольні зразки без пластику для кожного експерименту. Жовті точки відповідають опроміненим обробкам, а сірі точки — темним обробкам.

Джерело: Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>



«Завдяки цьому дослідженню нам вдалося довести, що в значно забруднених пластиком районах поверхні океану деградація пластику призведе до зниження рівня pH до 0,5 одиниць, що можна порівняти з падінням pH, яке передбачається в найгірших сценаріях антропогенних викидів до кінця XXI століття», — зазначає Крістіна Ромера-Кастільо, наукова співробітниця Інституту морських наук (ICM-CSIC)¹²⁰ (рис. 36).

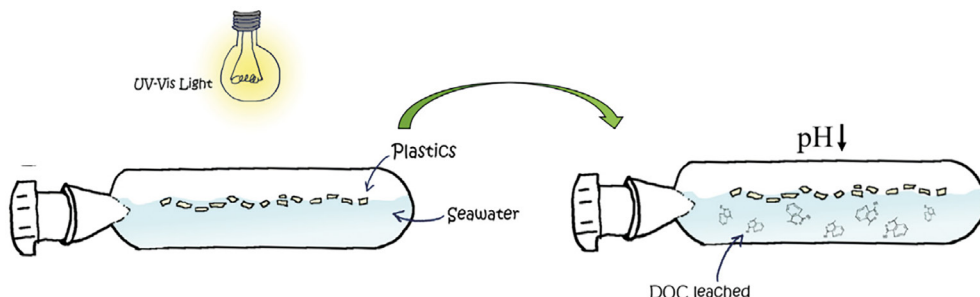


Рисунок 36. Вилугування пластику може призвести до зниження pH морської води до 0,5 одиниць. Джерело: Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

¹²⁰Institute of Marine Sciences (ICM-CSIC). Plastic degradation in the ocean contributes to its acidification. <https://www.icm.csic.es/en/news/plastic-degradation-ocean-contributes-its-acidification> (Дата доступу: 01.05.2025)

Закислення океану — це порушення умов морського середовища, стійкий і наростаючий екологічний тиск¹²¹. Наслідки для екосистем проявляються десятиліттями, століттями й довше. Спостереження підтверджують скорочення біорізноманіття в прибережних системах через зниження рН^{122 123}. Це зменшує стійкість екосистем, загрожує їхнім функціям, включаючи середовище існування, кругообіг поживних речовин і зберігання вуглецю¹²³.

Дослідження показують, що при закисленні океану мідії (*Mytilus edulis*) повільніше ростуть і гірше виживають (рис. 37). Це зменшує їхню чисельність, що знижує здатність фільтрувати воду й підтримувати якість прибережного середовища¹²⁴.

Сучасні значення рН на поверхні океану є безпрецедентними, принаймні за останні 26 000 років¹²⁵. Цей процес має значний вплив на коралові рифи, глибоководні й високоширотні екосистеми, які залежать від унікальних видів. Ці види відіграють незамінну роль, і їх зникнення порушує ключові функції екосистем, оскільки аналогів, здатних їх замінити, не існує¹²⁶.

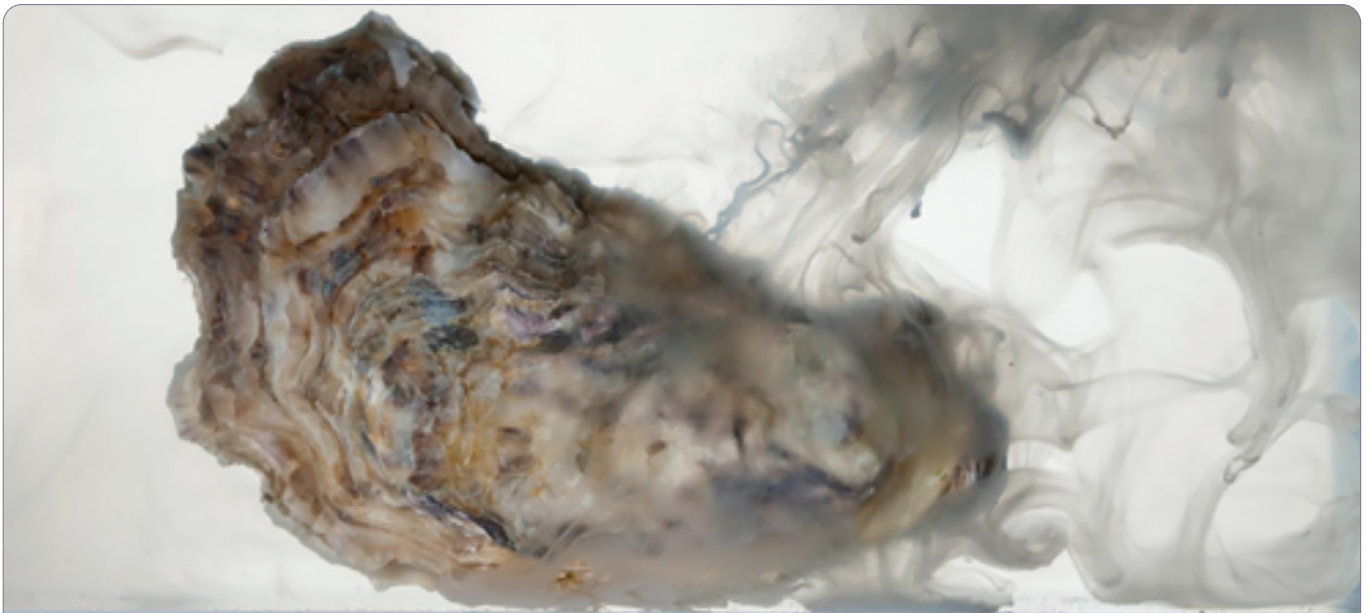


Рисунок 37. Тихоокеанська устриця випускає каламутну сперму в устричному розпліднику Whiskey Creek в Орегоні. У деяких прибережних водах закислення вже досягло серйозного рівня; тут воно скоротило виробництво вдвічі, сповільнюючи ріст устричних личинок.

Джерело: <https://www.nationalgeographic.com/magazine/article/ocean-acidification>

¹²¹Scott C. Doney, D. Shalhin Busch, Sarah R. Cooley and Kristy J. Kroeker. The Impacts of Ocean Acidification on Marine Ecosystems and Reliant Human Communities. Annual Review of Environment and Resources 45, 83–112 (2020). <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083019>

¹²²Hall-Spencer, J. M. & Harvey, B. P. Ocean acidification impacts on coastal ecosystem services due to habitat degradation. Emerging Topics in Life Sciences 3, 197–206 (2019). <https://doi.org/10.1042/ETLS20180117>

¹²³James P. Barry, Stephen Widdicombe, and Jason M. Hall-Spencer. Effects of ocean acidification on marine biodiversity and ecosystem function. Ocean acidification, edited by Jean-Pierre Gattuso, Lina Hansson. Oxford, Oxford University Press, 2011. <https://books.google.com.ua/books?id=8yjNFxkALjIC&pg=PA192>

¹²⁴Broszeit, S., Hattam, C. & Beaumont, N. Bioremediation of waste under ocean acidification: Reviewing the role of *Mytilus edulis*. Marine Pollution Bulletin 103, 5–14 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.040>

¹²⁵The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1> (Дата доступу: 01.05.2025).

¹²⁶James P. Barry, Stephen Widdicombe, and Jason M. Hall-Spencer. Effects of ocean acidification on marine biodiversity and ecosystem function. Ocean acidification, edited by Jean-Pierre Gattuso, Lina Hansson. Oxford, Oxford University Press, 2011. <https://books.google.com.ua/books?id=8yjNFxkALjIC&pg=PA192>

Устриці та мідії помітно скорочуються в чисельності за градієнтами падаючої карбонатної насиченості. Закислення океану може призвести до скорочення чисельності устриць та екосистемних послуг, які вони надають у дикій природі; воно також може погіршити їхню якість як морепродуктів.

Дослідження підтверджують значний негативний вплив мікропластику на біологічні параметри мікроводоростей¹²⁷, включаючи ріст, вміст хлорофілу, активність фотосинтезу та рівень активних форм кисню^{128 129}.

Згідно з дослідженням, вплив МП призводить до глобального скорочення фотосинтезу на 7,05–12,12 % у морських і прісноводних водоростях¹³⁰. Фотосинтез, як відомо, є головним процесом на Землі, що виробляє молекулярний кисень (O₂), який виділяється в атмосферу.

Крім того, мікропластик у морських відкладах змінює мікробні спільноти й порушує кругообіг азоту, потенційно посилюючи проблеми, спричинені людиною, такі як токсичне цвітіння водоростей. Зміни в спільнотах планктону на поверхні океану можуть посилити деоксигенацію (зменшення кількості кисню у воді), позбавляючи морські організми кисню¹³¹.

Дані свідчать, що з 1960 до 2010 року океан втратив 2 % розчиненого кисню через підвищення температури води й накопичення забруднювачів, включаючи промислові, побутові та сільськогосподарські стоки¹³². Зниження кисню призводить до утворення мертвих зон — ділянок океану, де морська флора та фауна практично зникли. Спостереження показують, що в 1960-х роках у Світовому океані налічувалося 45 мертвих зон, тоді як до 2011 року їхня кількість зросла приблизно до 700¹³³. Згідно з даними, опублікованими на сайті UNDP, кількість мертвих зон з 1960-х років подвоюється кожні десять років. На підставі цієї тенденції можна з високим ступенем впевненості припустити, що до 2025 року їхня кількість може досягти 1500¹³⁴.

Забруднення пластиком впливає на безліч процесів у системі Землі. Згідно з дослідженням, воно може посилити такі гострі екологічні проблеми, як втрата біорізноманіття та зміна клімату¹³⁵.

¹²⁷Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

¹²⁸Wu, Y. et al. Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae. *Journal of Hazardous Materials* 374, 219–227 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.039>

¹²⁹Sarkar, P., Xavier, K. A. M., Shukla, S. P. & Rathi Bhuvaneswari, G. Nanoplastic exposure inhibits growth, photosynthetic pigment synthesis and oxidative enzymes in microalgae: A new threat to primary producers in aquatic environment. *Journal of Hazardous Materials Advances* 17, 100613 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100613>

¹³⁰Zhu, R. et al. A global estimate of multiccosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>

¹³¹Microplastics pose risk to ocean plankton, climate, other key Earth systems. Mongabay. (2023) <https://news.mongabay.com/2023/10/microplastics-pose-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems> (Дата доступу: 01.05.2025)

¹³²Bhuiyan, M. M. U. et al. Oxygen decline in the coastal ocean over the twenty-first century: Driving forces, trends, and impacts. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 9, 100621 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100621>

¹³³The International Union for Conservation of Nature (IUCN). Ocean deoxygenation. <https://iucn.org/resources/issues-brief/ocean-deoxygenation> (Дата доступу: 01.05.2025)

¹³⁴United Nations Development Programme. Ocean hypoxia: Dead zones. <https://www.undp.org/publications/issue-brief-ocean-hypoxia-dead-zones> (Дата доступу: 01.05.2025)

¹³⁵Villarrubia-Gómez, P., Carney Almroth, B., Eriksen, M., Ryberg, M. & Cornell, S. E. Plastics pollution exacerbates the impacts of all planetary boundaries. *One Earth* 7, 2119–2138 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.017>

ВПЛИВ МНП НА КЛІМАТ

Функції океану

Океан відіграє ключову роль у підтримці кліматичної рівноваги планети, функціонуючи як природний «кондиціонер». Його унікальна здатність акумулювати й поступово вивільняти тепло дозволяє пом'якшувати температурні коливання на планеті. Всього лише десятиметровий шар океанічних вод здатний поглинати тепла більше, ніж уся атмосфера Землі (рис. 38). Це зменшує перепади температур як у денні та нічні періоди (рис. 39), так і в сезонні — влітку та взимку.

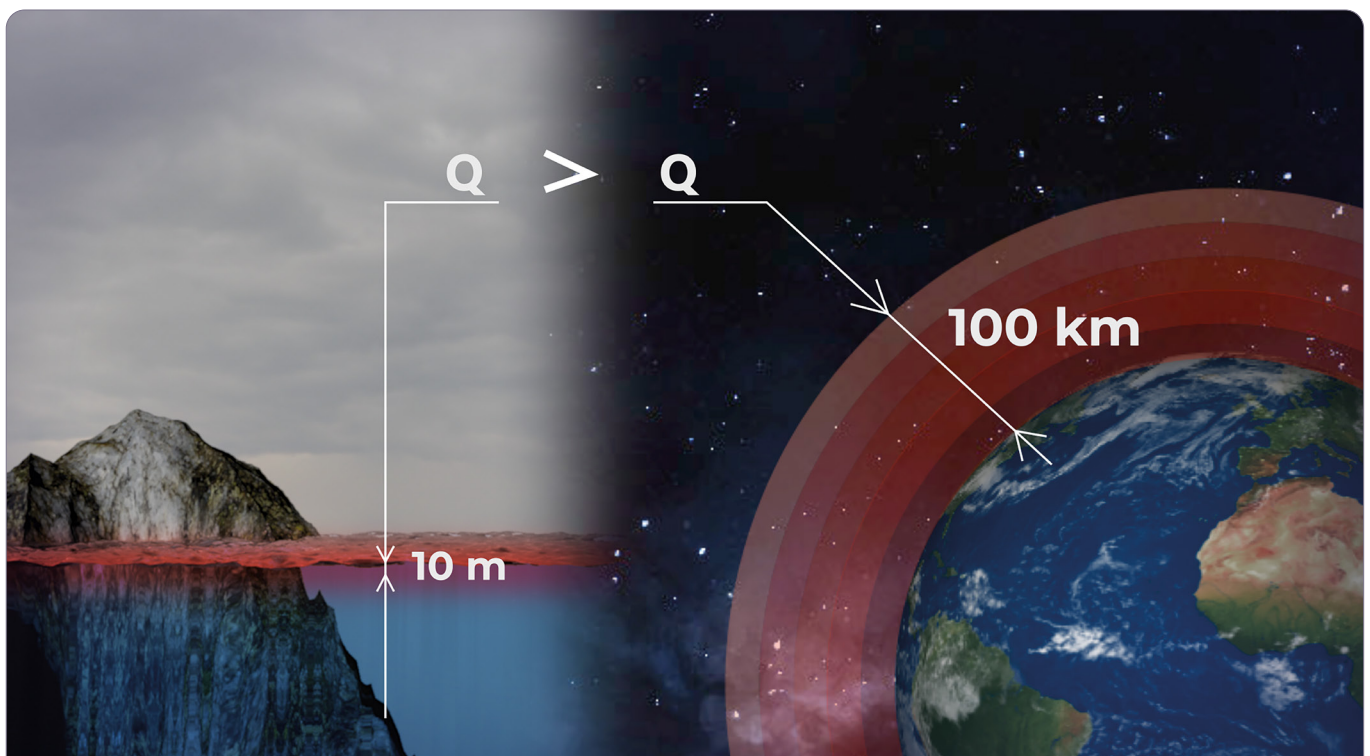


Рисунок 38. Схематичне зображення порівняльної теплоємності океану та атмосфери: незважаючи на меншу масу повітря, океан здатний накопичувати та утримувати в десятки разів більше тепла, відіграючи ключову роль у регулюванні клімату Землі

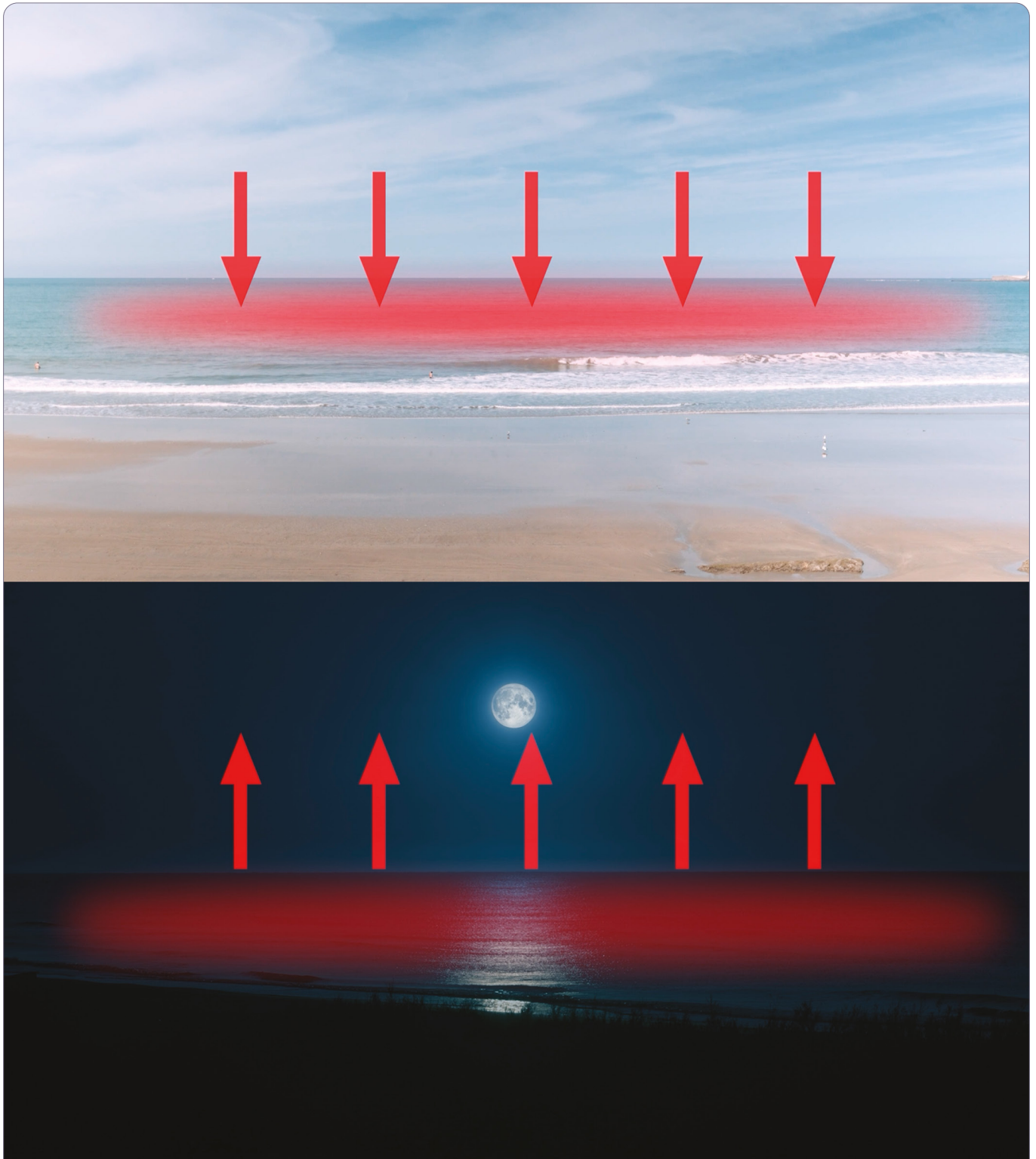


Рисунок 39. Схематичне відображення добового теплообміну: океан поглинає тепло вдень та віддає його вночі, згладжуючи перепади температури повітря

Океанічні течії переносять теплу воду з тропіків до більш холодних регіонів, наприклад, до північних широт. Це допомагає пом'якшувати клімат у прибережних зонах. Холодні течії, навпаки, повертають охолоджену воду назад до екватора. Таким чином океан регулює клімат на планеті.

Океан має значний вплив на атмосферні процеси, відіграючи ключову роль в утворенні хмар і опадів. Щодня з його поверхні випаровується величезна кількість води, яка потім конденсується в хмари та повертається на Землю у вигляді дощу або снігу. Цей процес є важливим для поповнення водних ресурсів річок, озер і ґрунту прісною водою.

Мікроскопічні водорості в океані, такі як фітопланктон (рис. 40), виробляють понад 50 % кисню¹³⁶. Багато моделей хімії та біології океану передбачають, що в міру нагрівання поверхні океану у відповідь на збільшення парникових газів в атмосфері продуктивність фітопланктону знижуватиметься^{137 138} (рис. 41).



Рисунок 40. Фітопланктон надзвичайно різноманітний: від фотосинтезуючих бактерій (ціанобактерій) до діатомових водоростей, схожих на рослини, та панцирних кокколитофорид (малюнки не масштабовано). (Колаж адаптований з малюнків і мікрофотографій Саллі Бенсусен, Наукове бюро проекту NASA EOS).

NASA. What are Phytoplankton? <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton>

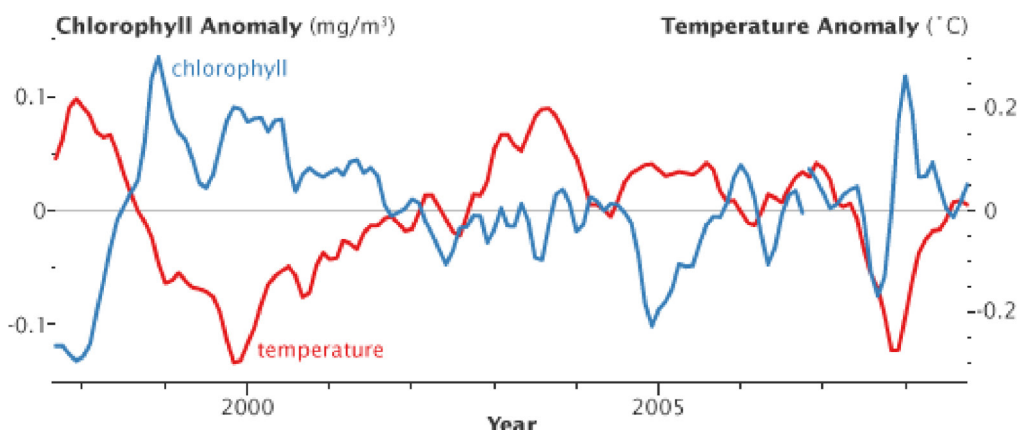


Рисунок 41. Близько 70% океану постійно стратифіковано на шари, які погано змішуються. У період з кінця 1997 року до середини 2008 року супутники спостерігали, що вищі за середні температури (червона лінія) призвели до зниження концентрації хлорофілу (синя лінія) у цих районах. (Графік адаптовано з Behrenfeld et al. 2009 Роберта Сіммона). <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton>

¹³⁶NOAA. How much oxygen comes from the ocean? <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-oxygen.html> (Дата доступу: 01.05.2025)

¹³⁷Boyce, D. G., Lewis, M. R. & Worm, B. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature* 466, 591–596 (2010). <https://doi.org/10.1038/nature09268>

¹³⁸Bopp, L. et al. Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. *Biogeosciences* 10, 6225–6245 (2013). <https://doi.org/10.5194/bg-10-6225-2013>

Зміна температурного режиму океану

Доповідь про стан Світового океану за 2024 рік демонструє тривожну картину — безпрецедентне нагрівання океану. Дослідження показують, що в період з 1960 до 1986 року спостерігалось стійке зростання температури океанів. Однак в останні кілька десятиліть цей процес прискорився в два рази¹³⁹ (рис. 42).

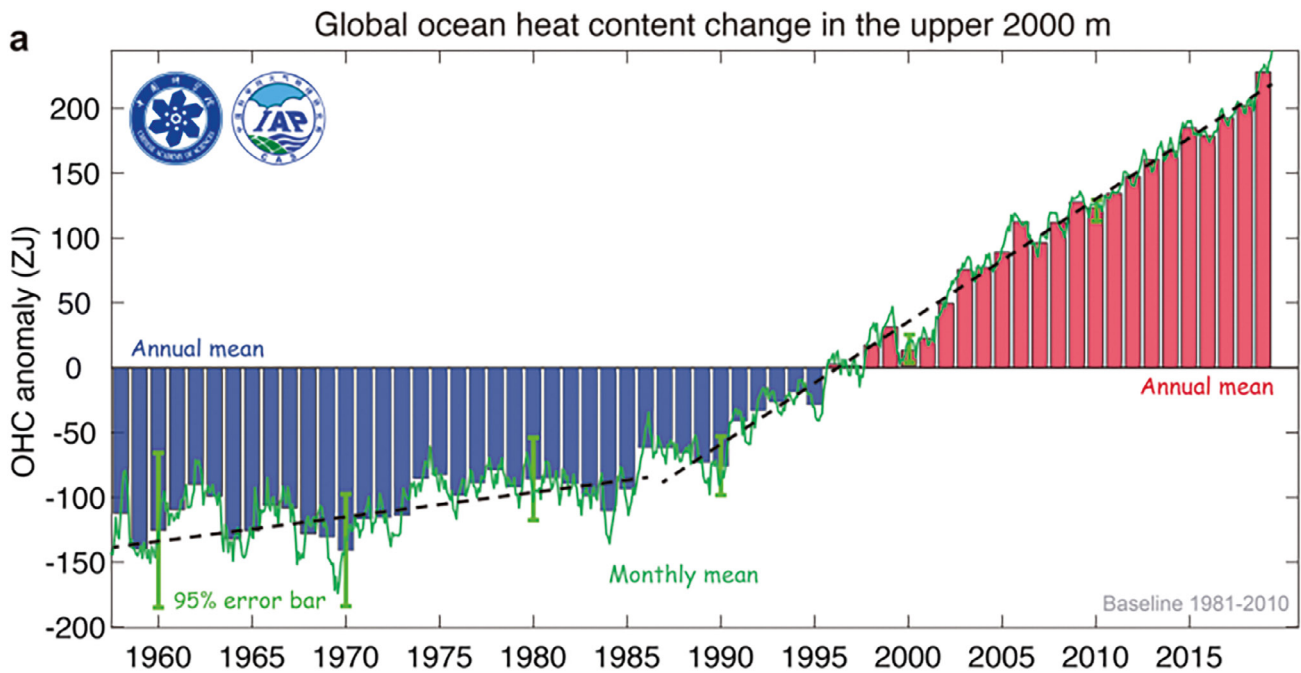


Рисунок 42. Зміна теплового вмісту у верхніх 2000 метрах Світового океану.

Джерело: Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J., Trenberth, K. E., Fasullo, J., Boyer, T., Locarnini, R., Zhang, B., Yu, F., Wan, L., Chen, X., Song, X., Liu, Y., & Mann, M. E. (2020). Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37(2), 137–142. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

2023 рік став найтеплішим роком за всю історію спостережень, перевершивши попередній рекорд, встановлений 2016 року. Також було зафіксовано абсолютний рекорд температури поверхні океану¹⁴⁰. Цей тренд продовжився: 2024 рік побив рекорди 2023 року (рис. 43) й став найтеплішим за весь період спостережень¹⁴¹. У цей період температура поверхні океану залишалася рекордно високою протягом 15 місяців поспіль, що підкреслює стійкість спостережуваного потепління.

¹³⁹Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Adv. Atmos. Sci.* 37, 137–142 (2020).

<https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

¹⁴⁰NOAA. Earth had its warmest year on record; Upper-ocean heat content was record high while Antarctic sea ice was record low.

<https://www.noaa.gov/news/global-climate-202312> (Дата доступу: 01.05.2025)

¹⁴¹World Meteorological Organization (WMO) confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55 °C above pre-industrial level.

<https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level> (Дата доступу: 01.05.2025)

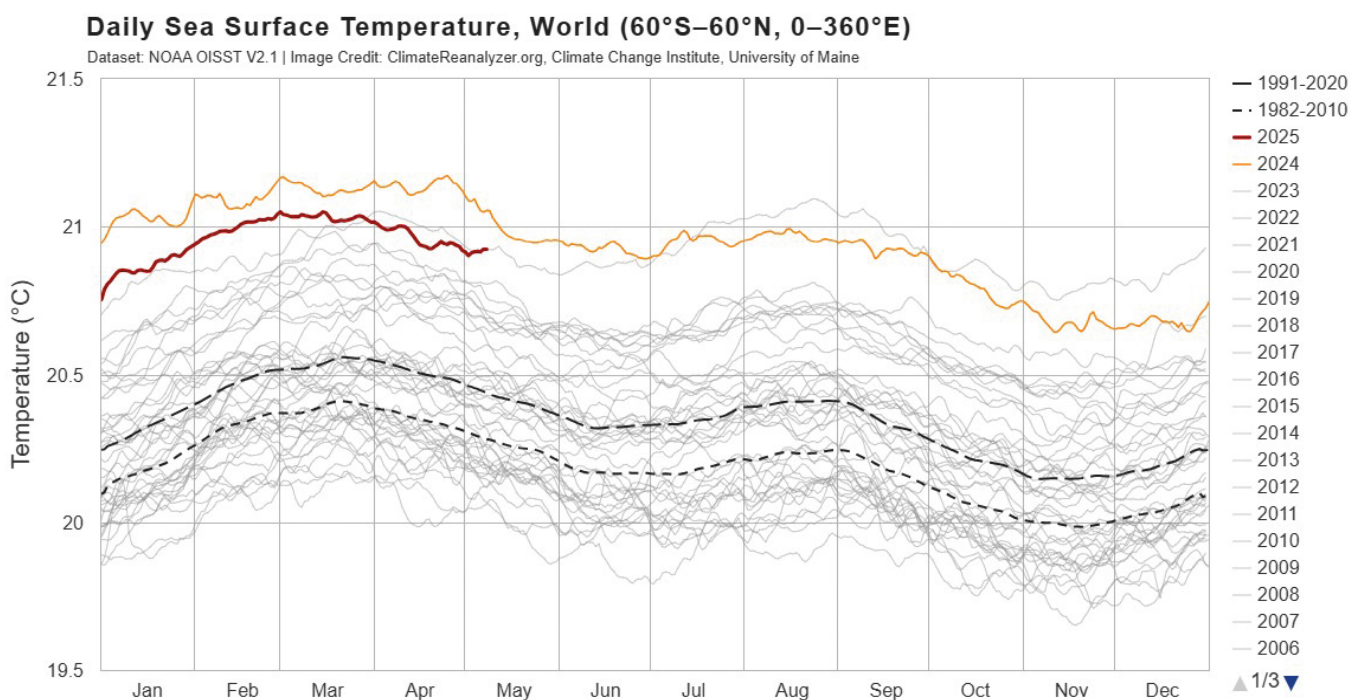


Рисунок 43. Щоденні значення температури поверхні моря: графічне відображення змін температури верхнього шару океану, що відображає сезонні коливання за роками.

Джерело: NOAA OISST V2.11 Image Credit: Climate [Reanalyzer.org](https://climateranalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2), Climate Change Institute. University of Maine https://climateranalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2

Вперше в історії середньорічна температура на $1,5^{\circ}\text{C}$ перевищила рівень доіндустріального періоду¹⁴² (рис. 44). На думку експертів, цей показник є критичним порогом, після якого людство очікують масштабні кліматичні потрясіння¹⁴³.

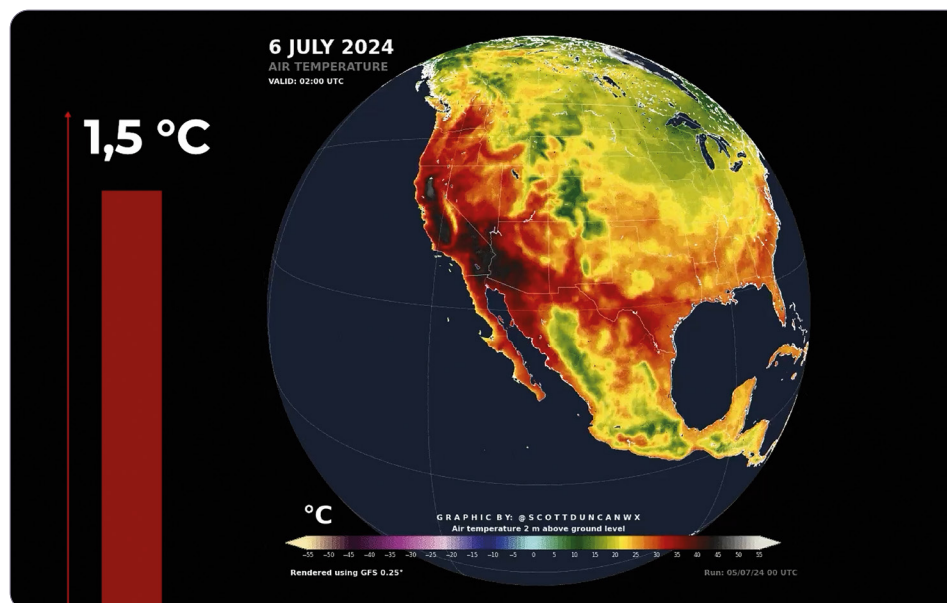


Рисунок 44.

Схематичне зображення кліматичного рубежу: 2024 року середньорічна глобальна температура вперше перевищила поріг $1,5^{\circ}\text{C}$ порівняно до доіндустріального рівня.

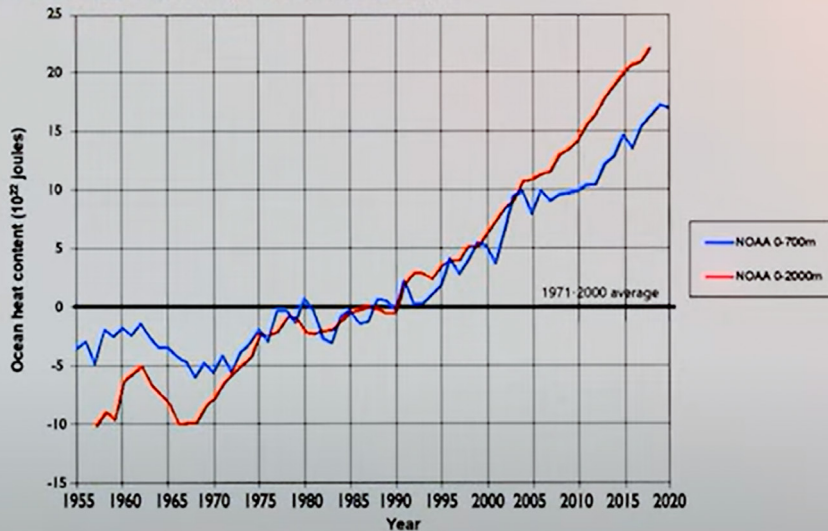
¹⁴²World Meteorological Organization (WMO). State of the Global Climate 2024. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024>

(Дата доступу: 01.05.2025)

¹⁴³IPCC. Global Warming of 1.5°C . (Cambridge University Press, 2022). <https://doi.org/10.1017/9781009157940> (Дата доступу: 01.05.2025)

Таке підвищення температури очікувалося до середини XXI століття¹⁴⁴, проте цей поріг уже перетнуто. За оцінками ООН, якщо теперішні тенденції збережуться, глобальна температура може підвищитися майже на 3 °C протягом цього століття¹⁴⁴.

Figure TD-5. Ocean Heat Content in the Top 700 Meters and the Top 2,000 Meters in the NOAA Data Sets, 1955–2020, with Standard Errors



Data source: NOAA data portal: www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT.

Рисунок 45.

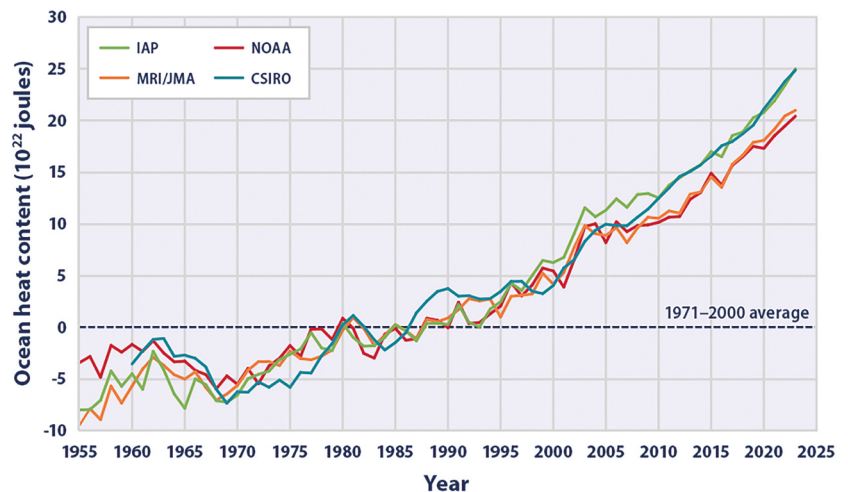
Тепловміст океану у верхніх 700 метрах і верхніх 2000 метрах. Набори даних NOAA, 1955–2020 рр., стандартні.

Джерело: портал даних NOAA

www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT

Рисунок 46.

Ця діаграма показує зміни теплового вмісту верхніх 700 метрів Світового океану з 1955 до 2023 року. Тепловий вміст океану вимірюється в джоулях – одиниці енергії – й порівнюється із середнім значенням за період 1971–2000 рр., яке встановлено як нуль для орієнтування. Вибір іншого базового періоду не змінить форми даних із плином часу. Лінії було незалежно обчислено з використанням різних методів державними організаціями чотирьох країн: Національною океанічною і атмосферною адміністрацією США (NOAA), Співдружною організацією наукових і промислових досліджень Австралії (CSIRO), Інститутом атмосферної фізики Китаю (IAP) та Метеорологічним дослідницьким інститутом Японського метеорологічного агентства (MRI/JMA).



Джерело: CSIRO, 2024;5 IAP, 2024;6 MRI/JMA, 2024;7 NOAA, 20248

¹⁴⁴The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

За останні 60 років океани на середніх глибинах нагрілися в 15 разів швидше, ніж за попередні 10 000 років¹⁴⁵ (рис. 45, 46). Це свідчить про те, що процеси глобального потепління зачіпають не лише верхні шари води, але й глибші частини океану, куди не проникають сонячні промені. Для нагрівання води на таких глибинах потрібна величезна енергія, що підкреслює масштаби проблеми. Згідно з оцінками вчених, для того щоб океан нагрівався з нинішньою швидкістю, необхідно виділення енергії, еквівалентної вибуху 7 атомних бомб щосекунди протягом року¹⁴⁶ — це колосальні цифри, що викликають питання: звідки береться така енергія?

Підвищення температури води неминуче призводить до зростання рівня Світового океану, що загрожує поглинути цілі узбережжя. За останні два століття рівень океану піднявся на 21 см, а за останні 30 років — на 10,1 см. Поточний темп зростання в 2,5 рази перевищує колишній, і ця тенденція продовжиться. Якщо ситуація не зміниться, мільйони людей стануть біженцями, змушеними залишати свої будинки й шукати притулку далеко від узбережжя.

«Підйом, який ми побачили в 2024 році, виявився вищим, ніж ми очікували, — сказав Джош Вілліс, дослідник рівня моря в Лабораторії реактивного руху NASA в Південній Каліфорнії. — Кожен рік трохи відрізняється, але ясно, що океан продовжує підніматися, і швидкість підйому стає дедалі швидшою й швидшою»¹⁴⁸ (рис. 47).

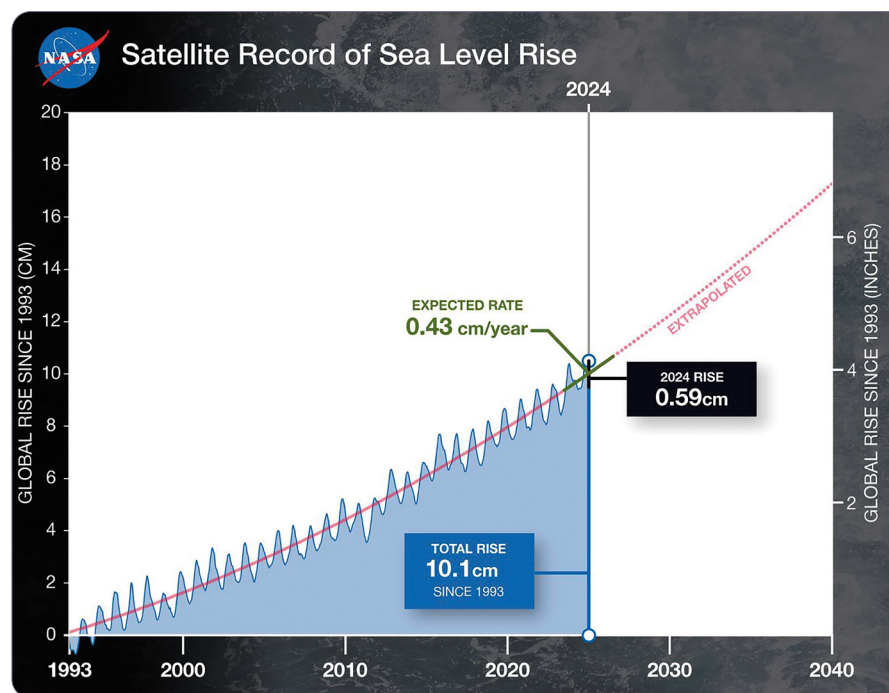


Рисунок 47. На цьому графіку показано середній рівень світового моря (синім кольором) з 1993 року, виміряний серією з п'яти супутників. Суцільна червона лінія вказує траєкторію цього підвищення, яке більш ніж подвоїлося за останні три десятиліття. Пунктирна червона лінія прогнозує майбутнє підвищення рівня моря. Кредит: NASA/JPL-Caltech.

Джерело: NASA. NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024 <https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024>

Нагрівання океану також сприяє більш частим і інтенсивним екстремальним погодним явищам, таким як повені, тайфуни та аномальні опади. Ці зміни загрожують екосистемам планети і життю мільярдів людей, і з кожним роком вони стають дедалі відчутнішими.

¹⁴⁵Rosenthal, Y., Linsley, B. K., & Oppo, D. W. (2013). Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science*, 342(6158), 617–621. <https://doi.org/10.1126/science.1240837>; Oppo, D. (2013, October 31). Is Global Heating Hiding Out in the Oceans? <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Дата доступу: 01.05.2025)

¹⁴⁶Cheng, L. et al. Another Year of Record Heat for the Oceans. *Adv. Atmos. Sci.* 40, 963–974 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2385-2>

¹⁴⁷NASA. Tracking 30 Years of Sea Level Rise <https://earthobservatory.nasa.gov/images/150192/tracking-30-years-of-sea-level-rise> (Дата доступу: 01.05.2025)

¹⁴⁸NASA. NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024 <https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024> (Дата доступу: 01.05.2025)

Чому океан нагрівається? Гіпотеза

Основними загальновизнаними факторами, що впливають на нагрівання океану, є парникові гази, такі як CO_2 , які утримують тепло в атмосфері й підвищують температуру верхніх шарів океанічних вод. Однак існують й інші фактори, які також можуть мати значний вплив на цей процес. Додатковий фактор нагрівання океану також буде розглянуто в розділі «Фактор Х. Вплив мікро- й нанопластику на динаміку циклу природних катаклізмів».

З другої половини ХХ століття спостерігається різке зростання кількості пластику в океанах, що збігається з періодом прискореного промислового розвитку та масового виробництва пластикових виробів (рис. 48).

З 1960 до 2019 року також спостерігається зміна температури океану. Графік (рис. 49) показує паралельне зростання середньої температури поверхні океанів, яке також спостерігається з середини ХХ століття. При зіставленні двох графіків (рис. 48, 49) можна помітити кореляцію між зростанням концентрації пластику в океанах і підвищенням температури вод. Це дає можливість припустити, що забруднення океанів пластиком може бути одним із значних, але недостатньо вивчених факторів, що впливають на нагрівання океанічних вод.

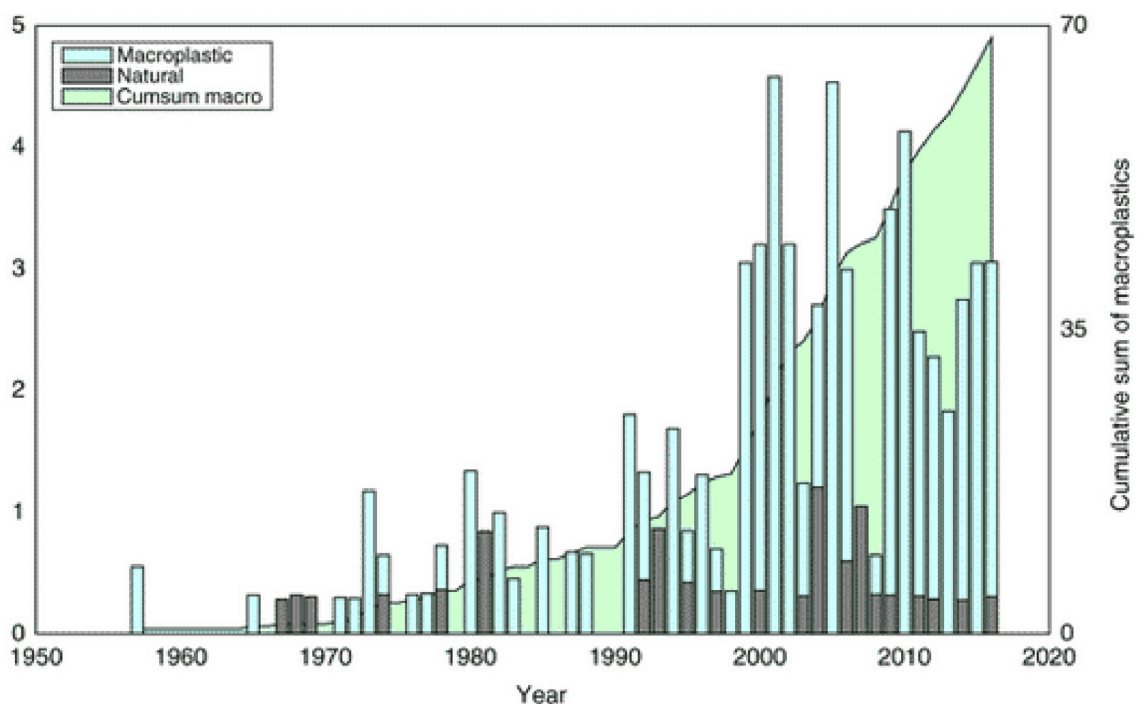


Рисунок 48. Графік зростання концентрації пластику в океанах за останні десятиліття. Сумарна кількість макропластику в океані та річні показники.

Джерело: Ostle, C., Thompson, R.C., Broughton, D. et al. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. Nature Communications, 10, 1622 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>

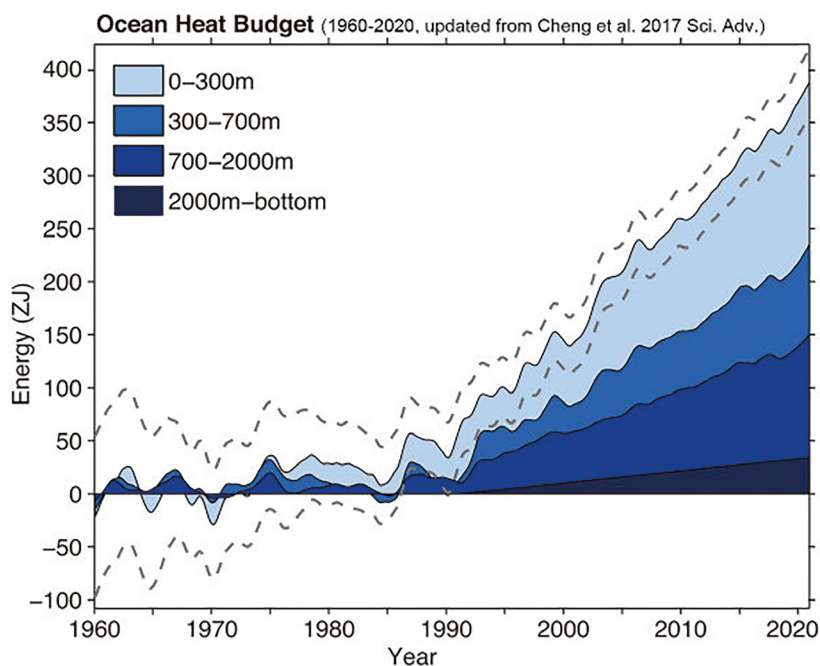


Рисунок 49. Графік зміни температури Світового океану за той самий період (1960–2019 pp.).

Джерело: (Purkey and Johnson, 2010; з оновленням даних Cheng та ін., 2017) Cheng, L. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. Adv. Atmos. Sci. 37, 137–142 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

Для подальшого вивчення цього питання важливо зрозуміти, чи здатний пластик впливати на фізичні властивості океанічної води, такі як теплопровідність і теплоємність. І чи можуть ці зміни сприяти підвищенню температури океану? Щоб краще зрозуміти ці процеси, заглибимося в основні характеристики води та її взаємодію з забруднювачами.

Основні характеристики води

Молекула води має симетричну V-подібну форму, де два атоми водню розташовані з одного боку відносно більшого атома кисню (рис. 50).

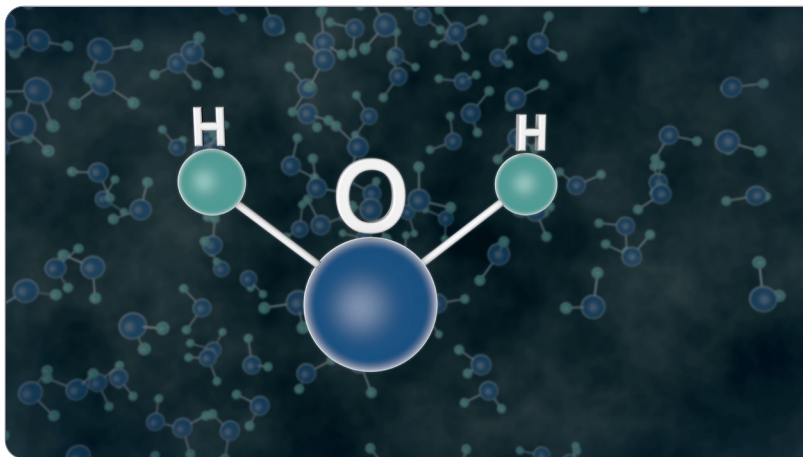


Рисунок 50.

Схематичне зображення молекули води: два атоми водню (H) з'єднані з одним атомом кисню (O) під кутом $\sim 104,5^\circ$, утворюючи диполь з позитивним і негативним зарядами.

Ця структура відрізняється від лінійних молекул, наприклад таких як CO_2 , де всі атоми розташовуються в ланцюжок. Така форма молекули води робить її особливою і важливою для численних процесів на Землі. Особливості молекул води дозволяють воді залишатися рідиною при температурах, які зазвичай призводять до газоутворення інших трьохатомних молекул (рис. 51).

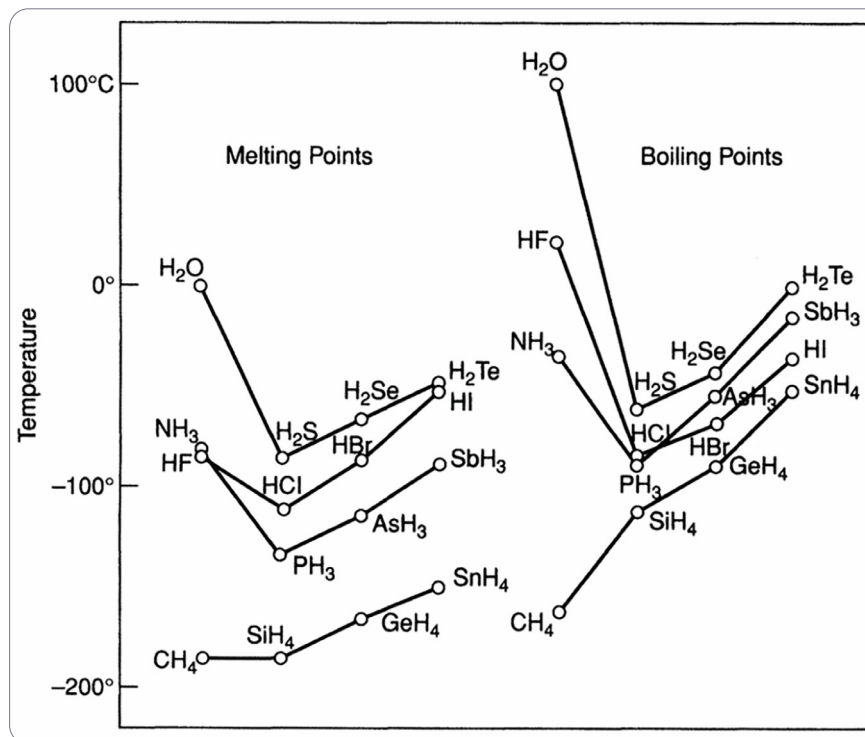


Рисунок 51.

Температури плавлення (ліворуч) і кипіння (праворуч) ізоелектронних послідовностей молекул гідридів. Температури для води істотно вищі, ніж виходить при екстраполяції температур аналогічних сполук.

Джерело: Pauling, L. The Nature of the Chemical Bond, 3rd edn, Chapter 12-2 (Cornell Univ. Press, 1960).

Це відбувається завдяки водневим зв'язкам¹⁴⁹, які пов'язують молекули води, утворюючи міцну та впорядковану структуру.

Більшість водневих зв'язків є слабкими притяганнями з міцністю зв'язку, що становить близько однієї десятої від міцності звичайного ковалентного зв'язку. Проте вони дуже важливі. Без них всі дерев'яні конструкції завалилися б, цемент розсипався б, океани випарувалися б, а все живе розпалося б на неживу матерію¹⁵⁰.

Тому вода має здатність формувати кластери, що пояснює її аномальні властивості (рис. 52, 53). Кластери води можуть охоплювати більше 95 % мережі водневих зв'язків, серед яких деякі кластери максимально охоплюють тисячі молекул, що простягаються за межі 3,0 нм¹⁵¹.

¹⁴⁹ Pauling, L. The Nature of the Chemical Bond, 3rd edn, Chapter 12-2 (Cornell Univ. Press, 1960).

¹⁵⁰ Jeffrey, G. A. An Introduction to Hydrogen Bonding (Oxford University Press, New York, 1997). <https://books.google.com/books?vid=ISBN0195095499>

¹⁵¹ Gao, Y., Fang, H., Ni, K. & Feng, Y. Water clusters and density fluctuations in liquid water based on extended hierarchical clustering methods. Sci Rep 12, 8036 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11947-6>

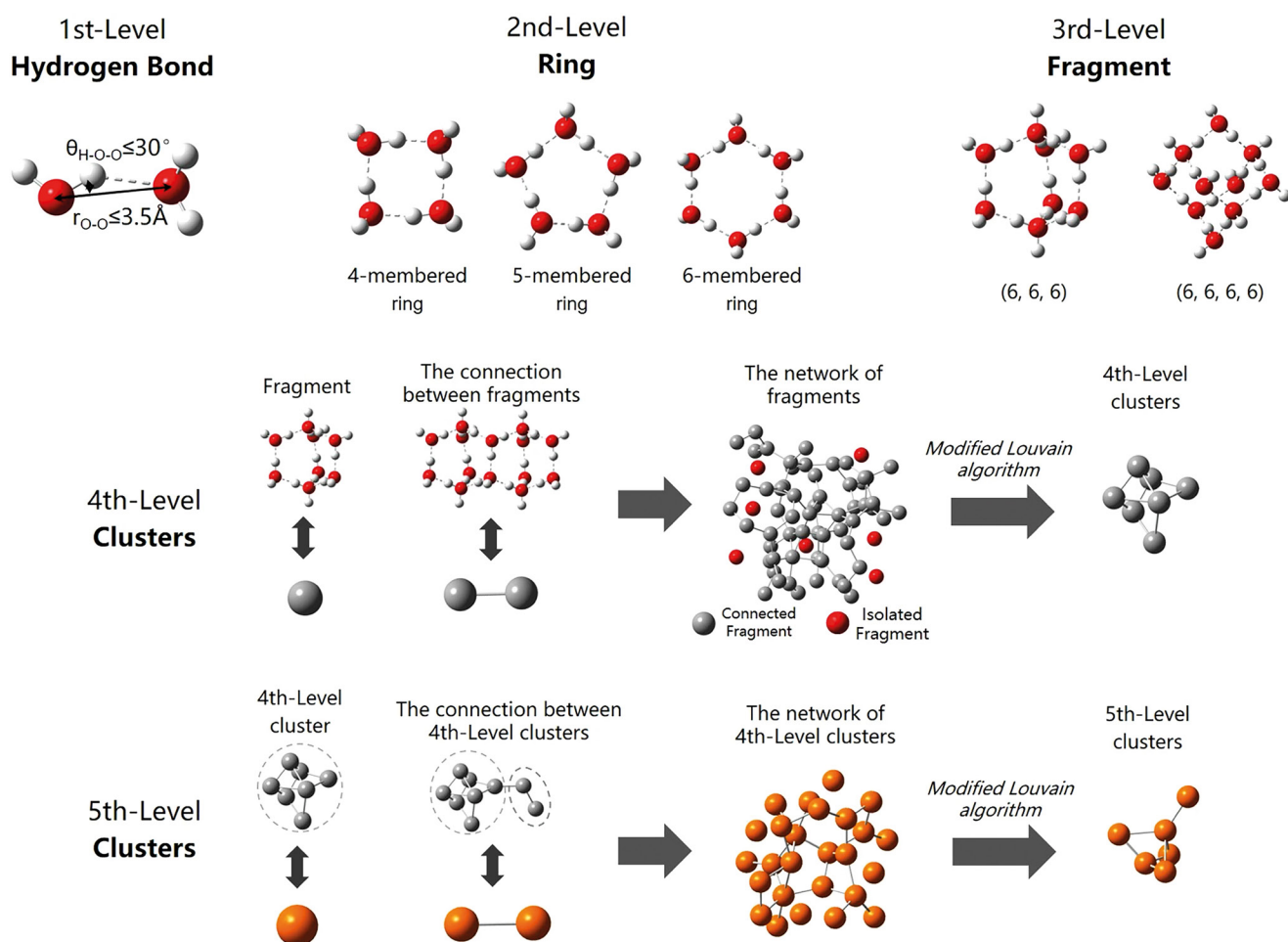


Рисунок 52. Схеми методу ієрархічної кластеризації. Водородні зв'язки, кільця та фрагменти розглядаються як структури 1-го, 2-го й 3-го рівнів, які є кулясто-стрижневими моделями з хімічного погляду, а червоні і білі кулі позначають атоми кисню і водню відповідно. Суцільні та пунктирні палички позначають ковалентні зв'язки O–H та водневі зв'язки відповідно. Кластери 4-го та 5-го рівнів проілюстровані з топологічного погляду. Кулі являють собою структуру останніх рівнів. Структури на малюнку є лише вибором серед розглянутих алгоритмом кластеризації.

Джерело: Gao, Y., Fang, H. & Ni, K. A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow. Sci Rep 11, 9542 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88810-7>

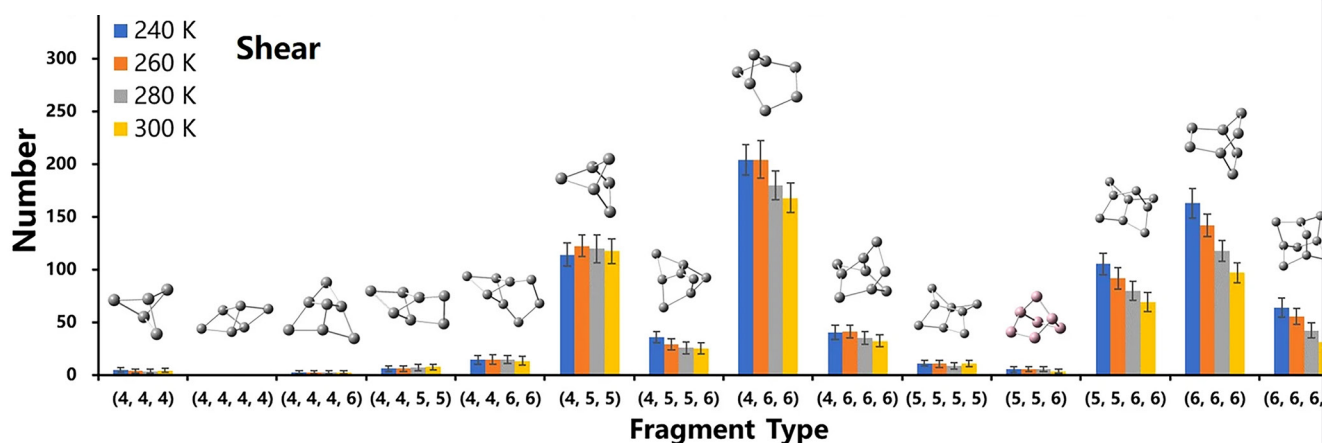


Рисунок 53. Розподіл ієрархічних структур на 1-му, 2-му й 3-му рівнях у мережі в різних випадках. (а) Розподіл водневих зв'язків (структури 1-го рівня) за різних температур. (б) Розподіл кілець (структури 2-го рівня) за різних температур. (с) Розподіл фрагментів (структури 3-го рівня) за різних температур. Зверніть увагу, що (4, 4, 4) позначає символ фрагмента, що містить три 4-членні кільця.

Джерело: Gao, Y., Fang, H. & Ni, K. A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow. Sci Rep 11, 9542 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88810-7>

Теплоємність, теплопровідність і щільність води та їхнє функціональне значення

1. Висока теплоємність води

Вода має найвищу питому теплоємність серед рідин і твердих речовин за нормальних умов, поступаючись лише деяким газам, таким як водень¹⁵². Це означає, що вона здатна поглинати, утримувати і передавати велику кількість теплової енергії при відносно невеликій зміні власної температури.

Теплоємність води визначається кількістю тепла, необхідного для підвищення температури 1 г води на 1 °C, і становить близько 4,18 Дж/(г·°C) за стандартних умов. Ця властивість є одним з ключових факторів для кліматичної регуляції: вода в океанах накопичує тепло протягом дня і повільно віддає його вночі. Влітку океан поглинає надлишкове тепло, а взимку воно поступово вивільняється, діючи як гігантський термостат і пом'якшуючи перепади температур на планеті.

2. Теплопровідність води

Вода має відносно низьку теплопровідність у порівнянні з металами, але вона є вищою, ніж у багатьох інших рідин. Теплопровідність відображає здатність речовини передавати тепло від однієї її частини до іншої без переміщення самої маси речовини. Теплопровідність води становить близько 0,6 Вт/(м·K) за стандартних умов (25 °C), що робить її ефективним провідником тепла в природних процесах, таких як розподіл тепла в океанах та інших водоймах.

¹⁵²Lide, D. R. (ed.) CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85th edn (CRC Press, 2004).

Спостереження показують, що теплопровідність води збільшується із зростанням температури до певної межі¹⁵². Крім того, це значення може змінюватися при наявності домішок або розчинених речовин^{153 154}. Ці характеристики впливають на розподіл тепла у воді, що має вирішальне значення для розуміння взаємодій між океаном і атмосферою.

3. Аномальна поведінка густини води

На відміну від більшості речовин, густина води поводить незвично при зміні температури. Під час охолодження до 4 °C її густина збільшується, але в разі подальшого охолодження (від 4 °C до 0 °C) густина починає зменшуватися (рис. 54). Коли вода замерзає, її густина зменшується на 8–9 %. Це пояснює, чому лід не тоне, а залишається на поверхні. Цей феномен критично важливий для життя у водоймах, оскільки лід захищає воду і живі організми від повного замерзання, не даючи всій воді замерзати до дна.

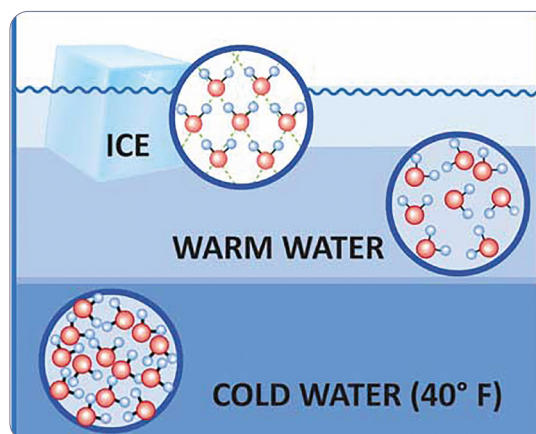


Рисунок 54. Схематичне зображення зміни густини води під час охолодження: у процесі охолодження молекули води зближуються, збільшуючи густину й досягаючи максимуму за температури 4 °C. Під час подальшого охолодження водневі зв'язки починають переважати, молекули води шикуються в кристалічну структуру льоду, що призводить до розширення води та зниження густини льоду, який стає приблизно на 10 % менш щільним, ніж рідка вода.

Джерело: <https://askascientistblog.wordpress.com/2015/11/04/if-molecules-in-colder-things-get-denser-why-does-ice-float/>

Вплив властивостей води на клімат і екосистеми

Зміни температури води можуть істотно вплинути на тепловий баланс Світового океану та його здатність акумулювати й передавати тепло. Це, своєю чергою, позначиться на кліматичній системі Землі.

Отже, фізико-хімічні властивості води, особливо її теплоємність і теплопровідність, відіграють важливу роль у підтриманні екологічного балансу на планеті та регулюванні кліматичних процесів (рис. 55).

¹⁵²Lide, D. R. (ed.) CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85th edn (CRC Press, 2004).

¹⁵³Sharqawy, M. H., Lienhard, J. H. & Zubair, S. M. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. Desalination and Water Treatment 16, 354–380 (2010). <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1079>

¹⁵⁴Jamieson, D. T. & Tudhope, J. S. Physical properties of sea water solutions: thermal conductivity. Desalination 8, 393–401 (1970). [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)80240-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)80240-4)

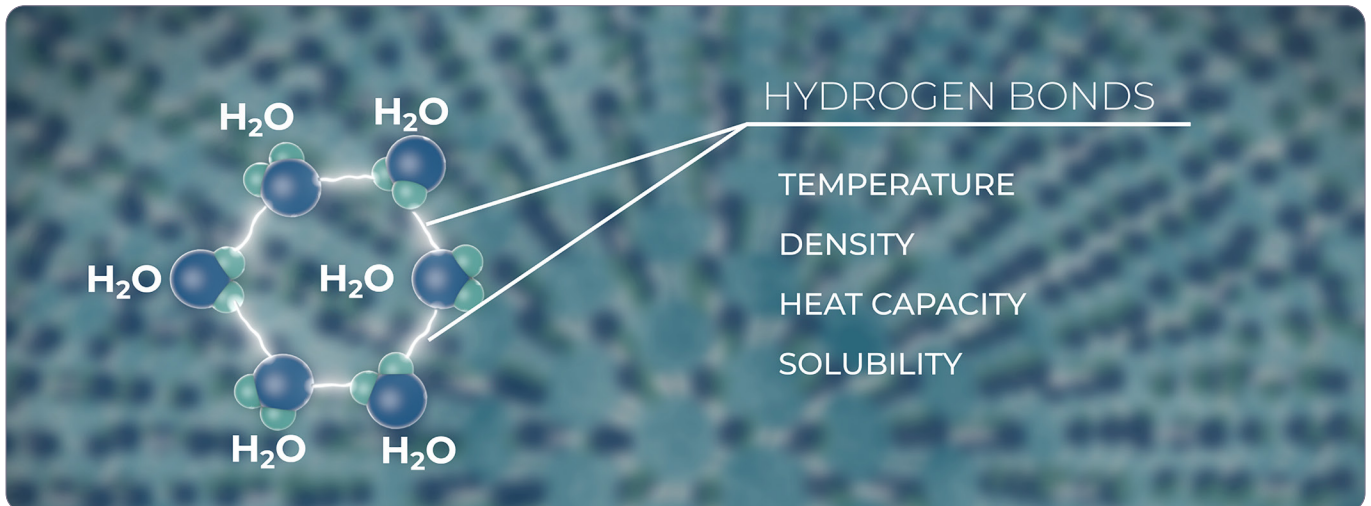


Рисунок 55. Схематичне зображення водневих зв'язків у молекулах води та їхній вплив на ключові властивості води: водневі зв'язки сприяють високій теплоємності води, що дає їй змогу ефективно поглинати й утримувати тепло. Ці зв'язки також визначають густину води, максимальну за температури 4 °C, а також її здатність розчиняти полярні та іонні речовини, що робить воду універсальним розчинником.

Роль МНП у зміні фізичних властивостей морської води

Пластик, що є продуктом нафтохімічної промисловості, не розкладається в природі, а розпадається на дрібніші частинки, такі як мікро- й нанопластик¹⁵⁵. Ці частинки, особливо нанопластик, можуть чинити значний вплив на фізико-хімічні властивості води, що, своєю чергою, може впливати на екосистеми та кліматичні процеси. Нанопластик — це частинки розміром у нанометри, що менше за розмір вірусу (рис. 56).

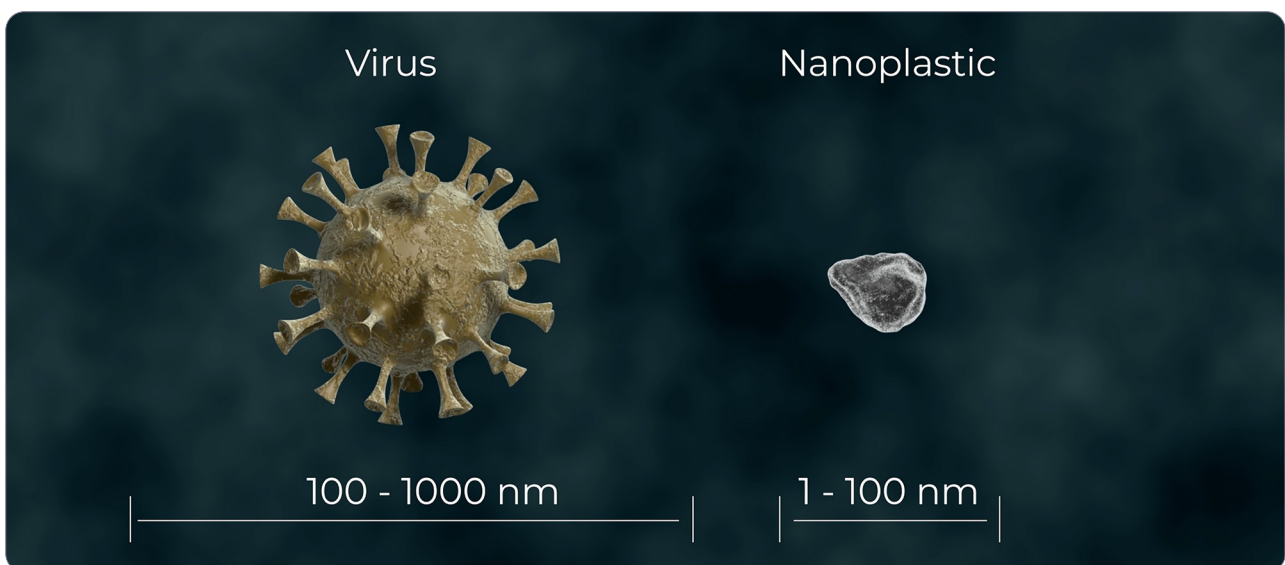


Рисунок 56. Схематичне порівняння розмірів вірусу та частинки нанопластику.

¹⁵⁵Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023).
<https://doi.org/10.3390/su151713252>

Наприклад, нанопластик із нейлону (поліаміду), що містить азот і кисень, здатний утворювати водневі зв'язки з водою¹⁵⁶. Коли частинки нанопластику потрапляють у воду, вони порушують упорядковану структуру води, яка ґрунтується на водневих зв'язках між молекулами води, що може змінювати її фізико-хімічні властивості (рис. 57). Зокрема, молекули води втрачають рухливість, що знижує їхню здатність ефективно брати участь у процесах теплообміну. Крім того, у водних розчинах, що містять різні речовини, нанопластикові частинки можуть набувати електричного заряду¹⁵⁷.

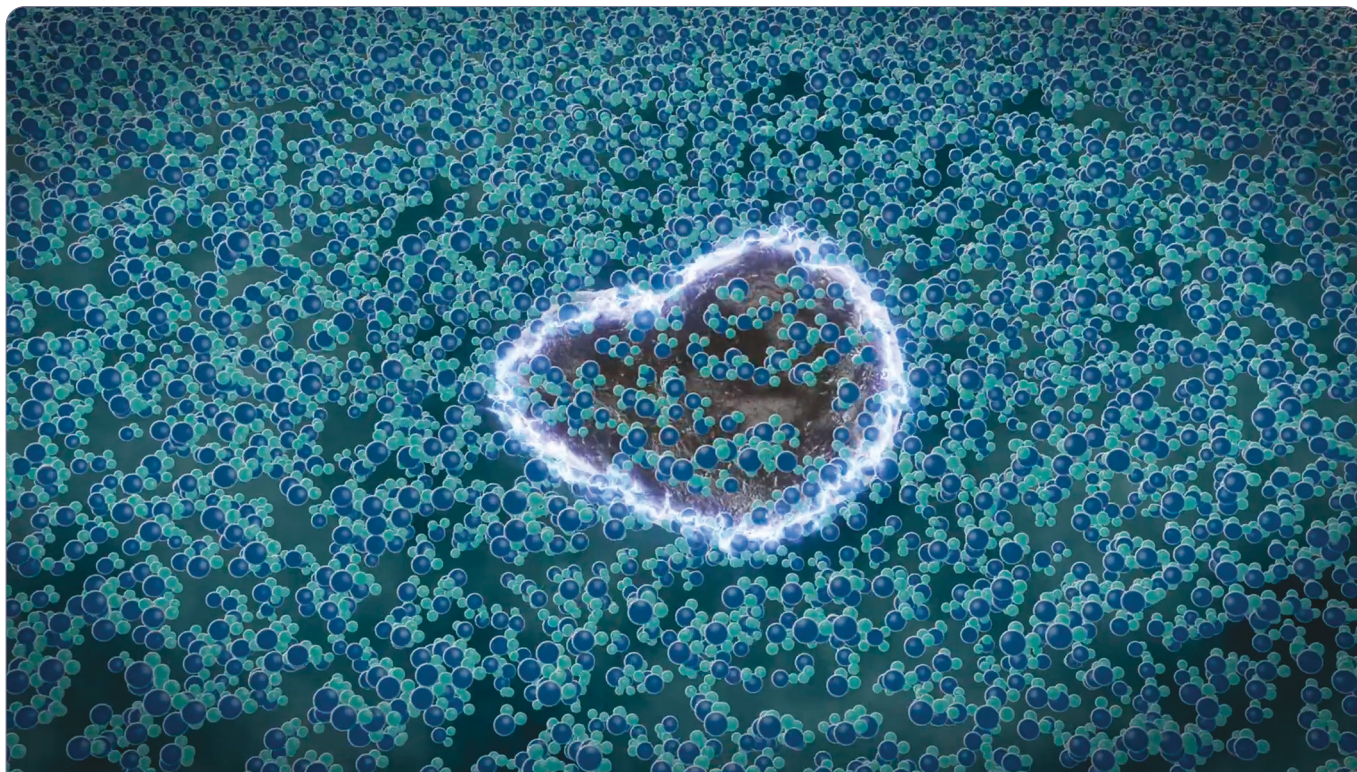


Рисунок 57. Схематичне зображення заряджених наночастинок пластику у воді: при впливі нестабільних водних умов — таких як наявність органічних або синтетичних домішок, зміна pH, температури або солоності — поверхня нанопластику стає потенційно активною та здатна генерувати електричні заряди у водному середовищі.

Джерело: Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024).

<https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

Це відбувається внаслідок хімічних змін на його поверхні, таких як окислення, а також через адсорбцію іонів, наприклад натрію (Na^+) і хлору (Cl^-), у морській воді. Заряджені наночастинки пластику, оточені іонами, притягують молекули води та формують навколо себе гідратну оболонку¹⁵⁸ (рис. 58).

¹⁵⁶Ivleva, N. P. Chemical Analysis of Microplastics and Nanoplastics: Challenges, Advanced Methods, and Perspectives. *Chem. Rev.* 121, 11886–11936 (2021).
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00178>

¹⁵⁷Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

¹⁵⁸Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016).
<https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>

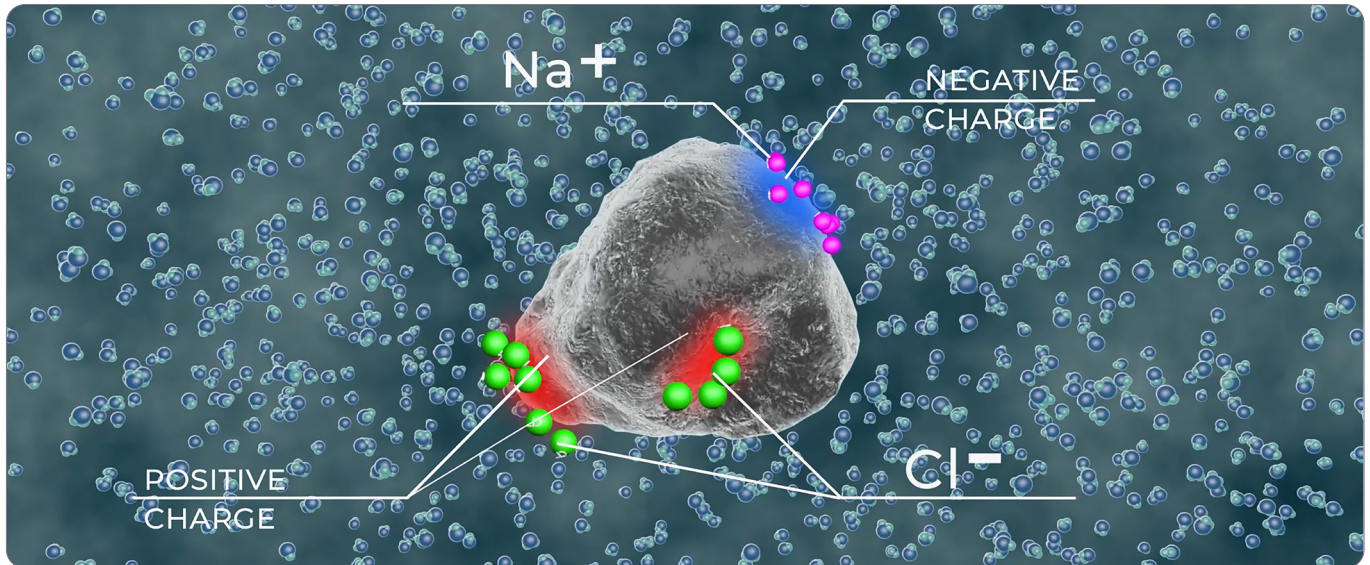


Рисунок 58. Схематичне зображення процесу формування гідратної оболонки навколо заряджених наночастинок пластику: в цьому процесі наночастинок, володіючи зарядом, притягують іони, що сприяє утворенню навколо них молекул води, створюючи захисну гідратну оболонку.

Джерело: Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>

Дослідники з Політехнічної школи в Лозанні вирішили з'ясувати, наскільки великий розмір цієї гідратної оболонки в іонів, тобто скільки молекул води реагують на іон. Виявилося, що один іон може впливати приблизно на мільйон молекул води, які його оточують. Цей ефект посилюється, якщо частинка має великий поверхневий заряд і високу концентрацію адсорбованих іонів. Як наслідок, одна частинка нанопластику може змінювати властивості мільйонів молекул води¹⁵⁸ (рис. 59). Зв'язані в гідратній оболонці молекули є менш рухливими¹⁵⁹. Як результат, знижується загальна теплоємність води^{160 161}.

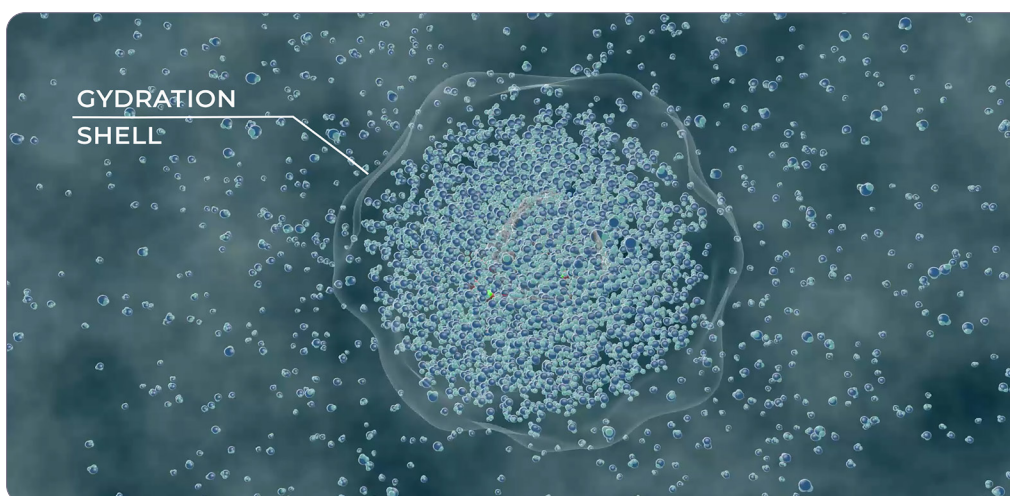


Рисунок 59. Схематичне зображення гідратної оболонки навколо частинки нанопластику

¹⁵⁸Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>

¹⁵⁹Laage, D., Elsaesser, T. & Hynes, J. T. Water Dynamics in the Hydration Shells of Biomolecules. *Chem. Rev.* 117, 10694–10725 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00765>

¹⁶⁰Chew, T., Daik, R. & Hamid, M. Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Dodecylbenzenesulfonic Acid-Doped Polyaniline Particles—Water Based Nanofluid. *Polymers* 7, 1221–1231 (2015). <https://doi.org/10.3390/polym7071221>

¹⁶¹Riazi, H. et al. Specific heat control of nanofluids: A critical review. *International Journal of Thermal Sciences* 107, 25–38 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.024>

Порушення структури водневих зв'язків також призводить до зниження теплопровідності¹⁶². Як наслідок, вода поблизу нанопластику може залишатися нагрітою, оскільки втрачає здатність ефективно передавати тепло.

Зони концентрації мікро- й нанопластику в океані

Мікро- й нанопластик може бути розподілений по всьому океану завдяки течіям, а більш щільні частинки або забруднений пластик може осідати на морському дні. Також скупчення нанопластику спостерігається в зонах термокліну — це перехідний шар, що знаходиться між теплими поверхневими водами та холоднішими глибинними шарами¹⁶³ (рис. 60).

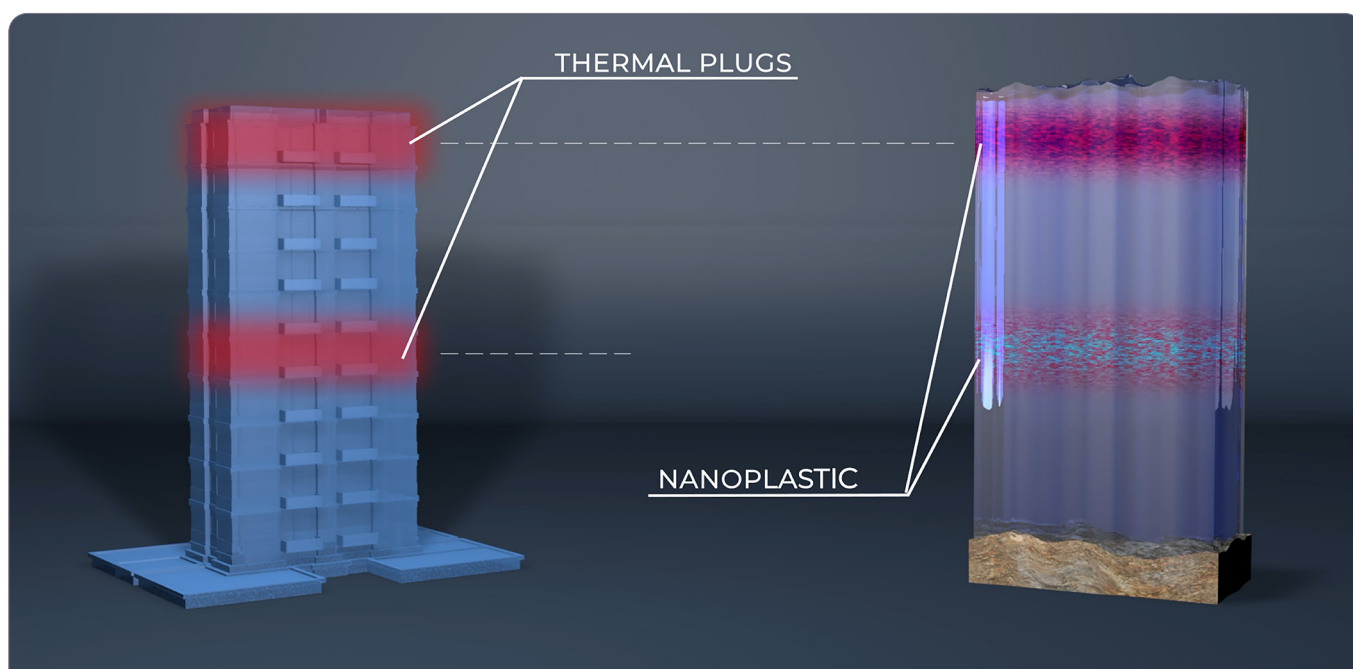


Рисунок 60. На зображенні показано образне порівняння зон концентрації мікро- й нанопластику в океані та багатоповерховій будівлі з тепловими пробками на 5-му та 10-му поверхах. Ці пробки заважають нормальному теплообміну, і замість рівномірного розподілу тепла воно накопичується на цих поверхах. Тепловізор покаже, що температура всередині будівлі значно вища, ніж у такій самій будівлі, але без пробок. Аналогічно нанопластик у воді порушує природні механізми теплообміну, створюючи «теплові пробки» в океані.

Збільшення концентрації нанопластику в океанах може призвести до змін у глобальному тепловому балансі. Це може впливати на підвищення температури океанів, а отже спричинити зміни клімату. Важливо зазначити, що навіть незначна кількість нанопластику може мати значний вплив на екосистеми. Підвищення температури поверхні океану прискорює фрагментацію пластикового сміття на мікро- й нанопластик (рис. 61). Як результат, збільшується кількість цих частинок, які разом із водяною парою потрапляють до атмосфери. Присутність мікро- й нанопластику в атмосфері сприяє додатковому її нагріванню, що своєю чергою посилює нагрівання океану. Таким чином, формується замкнене коло, де процеси взаємно підсилюють один одного.

¹⁶²Berger Bioucas, F. E. et al. Effective Thermal Conductivity of Nanofluids: Measurement and Prediction. Int J Thermophys 41, 55 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10765-020-2621-2>

¹⁶³Tikhonova, D. A., Karetnikov, S. G., Ivanova, E. V. & Shalunova, E. P. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga. Water Resour 51, 146–153 (2024). <https://doi.org/10.1134/S009780782370063X>

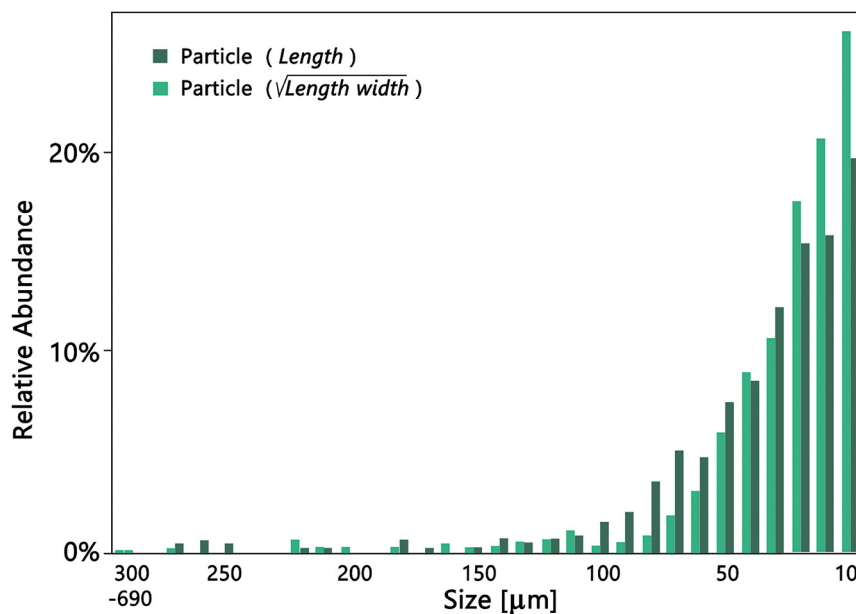


Рисунок 61. Відносний розподіл частинок мікропластику за розмірами для всіх проаналізованих станцій (nр = 543). На зображеннях показано найменші (праворуч) і найбільші (ліворуч) частинки МП, виявлені та підтверджені за допомогою Раман-мікроспектрометрії.

Джерело: Enders, K., Lenz, R., Stedmon, C. A. & Nielsen, T. G. Abundance, size and polymer composition of marine microplastics $\geq 10 \mu\text{m}$ in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution. *Marine Pollution Bulletin* 100, 70–81 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.027>

Зв'язок між електростатичним зарядом МНП і атмосферними явищами

Мікро- й нанопластик потрапляє до атмосфери різними шляхами. Водяна пара, що випаровується з поверхні океанів та інших водойм, забирає мікрочастинки в повітря¹⁶⁴. На континентах основними джерелами атмосферного пластику є заводи, сміттєспалювальні станції та звалища. Крім того, мікропластик піднімається в повітря, коли сільськогосподарські добрива та пластикова мульча висихають і розносяться вітром. Мікрочастинки пластику виділяються під час тертя автомобільних шин.

Ці та багато інших джерел роблять значний внесок у забруднення атмосфери. Ці процеси сприяють накопиченню й поширенню мікропластику в атмосфері, створюючи серйозні екологічні та кліматичні загрози. Опинившись в атмосфері, мікро- й нанопластикові частинки можуть слугувати ядрами конденсації для водяної пари. Чим більше таких ядер, тим швидше відбувається конденсація водяної пари у краплі. Повітряні мікропластики були виявлені у пробах хмарної води, зібраних на гірських вершинах Японії¹⁶⁵ (рис. 62).

¹⁶⁴Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. *PNAS Nexus* 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

¹⁶⁵Wang, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>



Рисунок 62. Повітряні гідрофільні мікропластики у хмарній воді на великих висотах та їхня роль в утворенні хмар.

Джерело: Hiroshi Okochi from Waseda University

<https://www.sustainableplastics.com/news/scientists-find-microplastics-clouds-above-mount-fuji>



«У забрудненому навколишньому середовищі з великою кількістю аерозольних частинок, таких як мікропластик, уся вода розподіляється між цією великою кількістю аерозольних частинок, утворюючи дрібніші крапельки навколо кожної з них. Коли крапель більше, виходить менше опадів. Але оскільки краплі випадають лише тоді, коли стають досить великими, у хмарі збирається більше води. Як наслідок, випадають більш рясні опади», — зазначила Міріам Фрідман, професорка хімії департаменту метеорології та атмосферних наук Університету штату Пенсільванія¹⁶⁶.

Це пояснює те, що останніми роками в різних регіонах почали спостерігати аномальні опади.

¹⁶⁶The Pennsylvania State University Research. Microplastics impact cloud formation, likely affecting weather and climate. (2024)
<https://www.psu.edu/news/research/story/microplastics-impact-cloud-formation-likely-affecting-weather-and-climate> (Дата доступу: 01.05.2025)

Електричні заряди у хмарах

Атмосфера Землі є складною електричною системою, в якій важливу роль відіграють молекули води. З 1752 року, коли Бенджамін Франклін уперше довів, що атмосфера електрифікована і що грози мають електричну природу, стало зрозуміло, що взаємодія води (у парах, рідинах і льоді) відіграє ключову роль у цих процесах. Вода у своїй чистій формі нейтральна, але під час фазових переходів, як-от танення та замерзання, а також під час зіткнень молекул, вона може передавати іони іншим частинкам, що призводить до електричних ефектів.

В атмосфері зіткнення між кристалами льоду, переохолодженими краплями води та іншими частинками за присутності природних електричних полів призводить до поділу зарядів. Цей процес відіграє ключову роль у формуванні атмосферної електрики, зокрема грозових хмар. Це явище важливе для формування хмар і опадів. Заряджені краплі починають притягатися одна до одної, прискорюючи процес їхнього об'єднання в більші краплі, що зрештою приводить до утворення хмар, здатних спричинити опади, такі як дощ, сніг або град.



«Заряди надзвичайно важливі, а в процесі утворення хмар це практично все. І ми виявили, що заряди відіграють ключову роль», — сказав Джеральд Х. Поллак, PhD, професор біоінженерії у Вашингтонському університеті, головний редактор і засновник міждисциплінарного дослідницького журналу WATER¹⁶⁷.

Також 1843 року Майкл Фарадей виявив, що електрика виникає через тертя крапель води об метал, що заряджає воду. Це відкриття привело до подальшого вивчення заряду води під час тертя, фазових переходів і контактної електризації, а також до спроб використати цей ефект для створення нових джерел енергії.

Відомо, що вологе повітря може нейтралізувати поверхневий заряд, утворюючи водяну плівку, яка дає змогу іонам переміщуватися й розсіювати накопичений заряд. Однак у деяких випадках поверхні, що адсорбують воду, можуть накопичувати заряд від вологої атмосфери, що також впливає на електричний стан навколишнього середовища¹⁶⁸. Дослідження показали, що важкі метали можуть легко прикріплюватися до мікропластику і що ця комбінація може потенційно завдати шкоди екосистемам планети.

¹⁶⁷AllatRa TV. Anthropogenic factor in the oceans' demise: Popular science film. Time 55:00, (2025).

<https://allatra.tv/en/video/anthropogenic-factor-in-the-oceans-demise-popular-science-film> (Дата доступу: 01.05.2025).

¹⁶⁸Lax, J. Y., Price, C. & Saaroni, H. On the Spontaneous Build-Up of Voltage between Dissimilar Metals Under High Relative Humidity Conditions. Sci Rep 10, 7642 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64409-2>

Крім того, мікропластик і суміш речовин на його поверхні можуть не лише прилипати до інших забруднювачів, а й взаємодіяти одне з одним, змінюючи їхні хімічні властивості¹⁶⁹. Коли в атмосферу втручаються мікро- й нанопластикові частинки, вони можуть порушувати крихкий баланс в атмосферних процесах. Пластикові частинки можуть нести заряд, що посилює тяжіння полярних молекул води, сприяючи утворенню крапель. Частинки пластику стають не звичайними ядрами конденсації, такими як пилок, морська сіль або сажа, а можуть збиратися краплями більш ефективно, ніж нейтральні частинки¹⁷⁰.

Це означає, що навколо заряджених частинок краплі води починають формуватися швидше, що впливає на структуру хмар і може спричинити утворення великих крапель і навіть аномально великих кристалів льоду¹⁷¹. Наприклад, нещодавно група дослідників виявила у хмарах на вершинах гір у Японії пластикові гранули, що мають водоприцягувальну поверхню¹⁷².

Вплив на формування хмар і опадів

Мікропластик може впливати на характер опадів, прогнозування погоди, моделювання клімату й навіть безпеку польотів, впливаючи на те, як кристали атмосферного льоду формують хмари.

Дослідження¹⁷³ показало, що краплі води з мікропластиком замерзають за температури на 4–10 °C вище, ніж краплі без нього, тобто на нижчих висотах. Зазвичай крапля води без будь-яких домішок замерзає за температури близько –38 °C. Однак у випадку з мікропластиком 50 % крапель замерзли за температури від –18 °C до –24 °C залежно від виду пластику.

Краплі води, що містять мікропластик, замерзають швидше, утворюючи більші крижані частинки. Ці частинки піднімаються висхідними потоками повітря, багаторазово покриваються шарами льоду і потім випадають на землю. Таке явище може призвести до збільшення розмірів градин (рис. 63, 64), посилення їхнього руйнівного впливу, а також до активізації процесу формування крижаних хмар. Як наслідок, змінюється частота та інтенсивність опадів, включно з дощами й снігопадами. Це може викликати каскадні ефекти, що зачіпають клімат, гідрологічний цикл та екосистеми.

¹⁶⁹Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

¹⁷⁰Harrison, R. G. Atmospheric electricity and cloud microphysics <https://cds.cern.ch/record/557170/files/p75.pdf>

¹⁷¹The Pennsylvania State University News. Microplastics impact cloud formation, likely affecting weather and climate. (2024). <https://www.psu.edu/news/research/story/microplastics-impact-cloud-formation-likely-affecting-weather-and-climate> (Дата доступу: 01.05.2025).

¹⁷²Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x> (Дата доступу: 01.05.2025).

¹⁷³Busse, H. L., Ariyasena, D. Dh., Orris J. & Freedman, M. Ar. Pristine and Aged Microplastics Can Nucleate Ice through Immersion Freezing. *ACS ES&T Air* 1, 1579–1588 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsestair.4c00146>

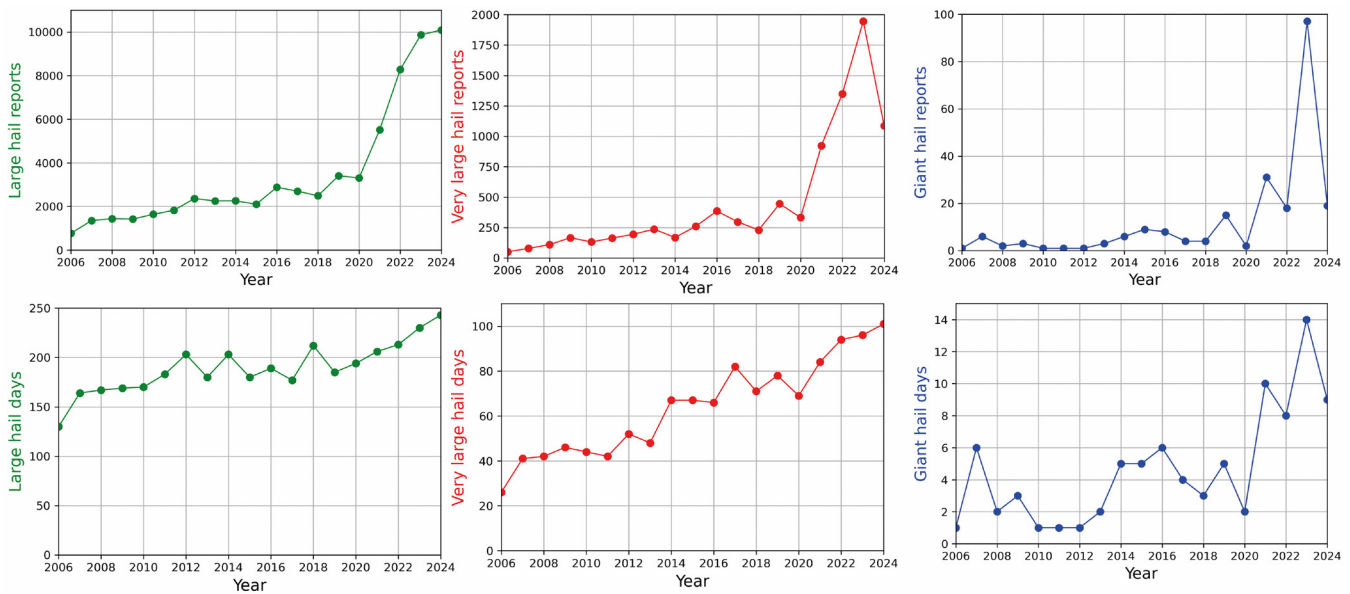


Рисунок 63. Кількість повідомлень і днів із великим (2+ см), дуже великим (5+ см) і гігантським (10+ см) градом у період з 2006 до 2024 року.

Джерело: European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024
<https://www.essl.org/cms/hailstorms-of-2024/>

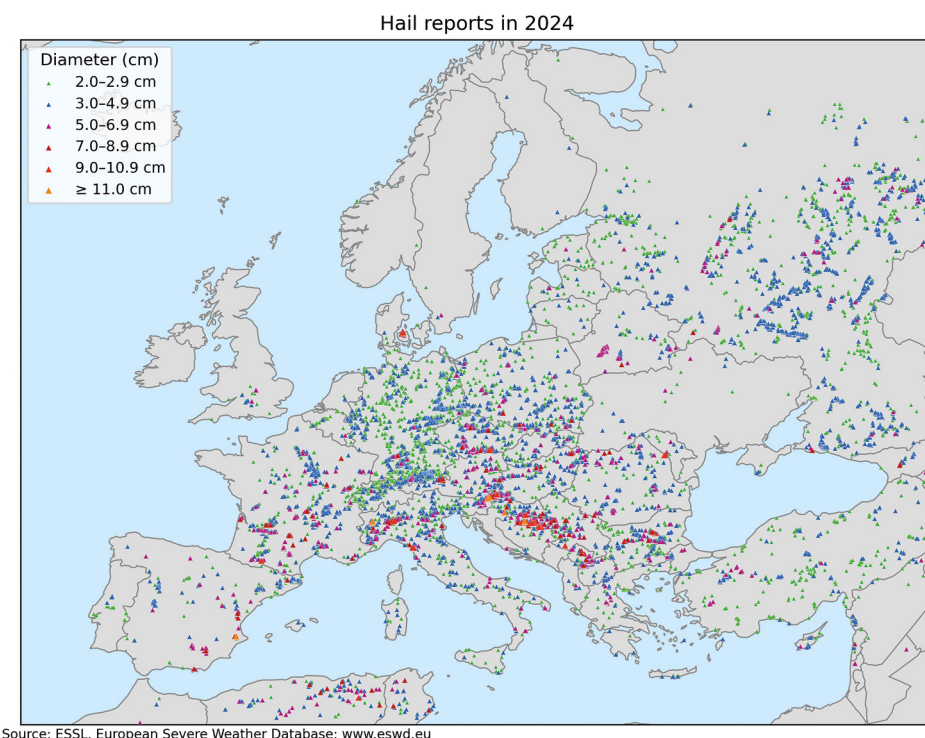


Рисунок 64. Просторовий розподіл повідомлень про великий град по Європі та прилеглих територіях у 2024 році.

Джерело: European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024
<https://www.essl.org/cms/hailstorms-of-2024/>

Коли в атмосфері присутні частинки нанопластику, хмари починають формуватися на менших висотах — зазвичай нижче 2 км. Це призводить до того, що хмари виявляються менш рухливими, що заважає нормальному розподілу опадів. Як наслідок, в одних районах може спостерігатися засуха, а в інших — надмірні опади.

Роль МНП у порушенні кліматичного балансу планети

Щільніші хмари починають утримувати тепло в нижніх шарах атмосфери, подібно до покривала, поглинаючи та повертаючи частину теплового випромінювання назад до поверхні Землі. Це зменшує витік тепла в космічний простір і сприяє нагріванню атмосфери. Підвищення температури сприяє додатковому випаровуванню води з океанів, а більша кількість вологи в атмосфері призводить до подальшого потепління. Це замкнуте коло. Важливо зазначити, що на кожен градус потепління кількість вологи в повітрі збільшується приблизно на 7 %¹⁷⁴, а частота блискавок зростає на 12 %¹⁷⁵.



Як зазначає Кевін Тренберт, заслужений кліматолог Національного центру атмосферних досліджень США (NCAR), провідний автор доповідей МГЕЗК: **«Поеднання підвищеної температури та збільшеного вмісту водяної пари в атмосфері спричиняє її більшу нестабільність. Це призводить до посилення конвекції та збільшення кількості штормів. Деякі з них, найсильніші, переростають у грози. За таких умов збільшується ризик виникнення потужних гроз.**

Коли грози починають об'єднуватися та взаємодіяти, як це відбувається в тропічних штормах, вони можуть перерости в потужніші урагани. Усі ці фактори підсумовуються, підвищується ризик виникнення штормів, сильних гроз, особливо штормів-суперкомірок, які спричиняють град, а в деяких місцях за відповідних умов можуть спричинити торнадо».

Таким чином, екстремальне нагрівання океану, надлишок електрики й тепла в атмосфері погіршують кліматичну ситуацію, призводячи до більш руйнівних кліматичних явищ, таких як потужні грози, урагани, блискавки та спрайти.

Пластик в атмосфері не лише забруднює довкілля, але й змінює кліматичні процеси, впливаючи на формування хмар і опадів. Він посилює електростатичний заряд в атмосфері, прискорює конденсацію водяної пари та впливає на щільність хмар, що може призвести до підвищення інтенсивності штормів, гроз та інших руйнівних природних явищ. Ми стоїмо на порозі розуміння масштабних наслідків цього впливу на клімат, що вимагає термінових і комплексних заходів зі зменшення забруднення пластиковими частинками в океанах і атмосфері.

¹⁷⁴ NASA. Steamy relationships: How atmospheric water vapor amplifies Earth's greenhouse effect. (2022)

<https://science.nasa.gov/earth/climate-change/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifies-earths-greenhouse-effect>
(Дата доступу: 01.05.2025).

¹⁷⁵ Roms, D. M., Seeley, J. T., Vollaro, D. & Molinari, J. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. Science 346, 851–854 (2014).
<https://doi.org/10.1126/science.1259100>

Взаємодія океану з магнітним полем Землі

Океани займають близько 70 % поверхні Землі та є не просто гігантським резервуаром води, але й важливими елементами у складних електричних процесах планети. Вони взаємодіють із магнітним полем Землі, беручи участь у її електромагнітних процесах.

Магнітне поле Землі захищає поверхню планети від сонячного вітру й космічного випромінювання, діючи як природний щит. Без цього поля атмосфера була б зруйнована. Геомагнітне поле створюється в глибині планети, де рідке зовнішнє ядро, що складається з металів, рухається навколо твердого внутрішнього ядра, утворюючи природний генератор — процес, який називається геодинамо (рис. 65).

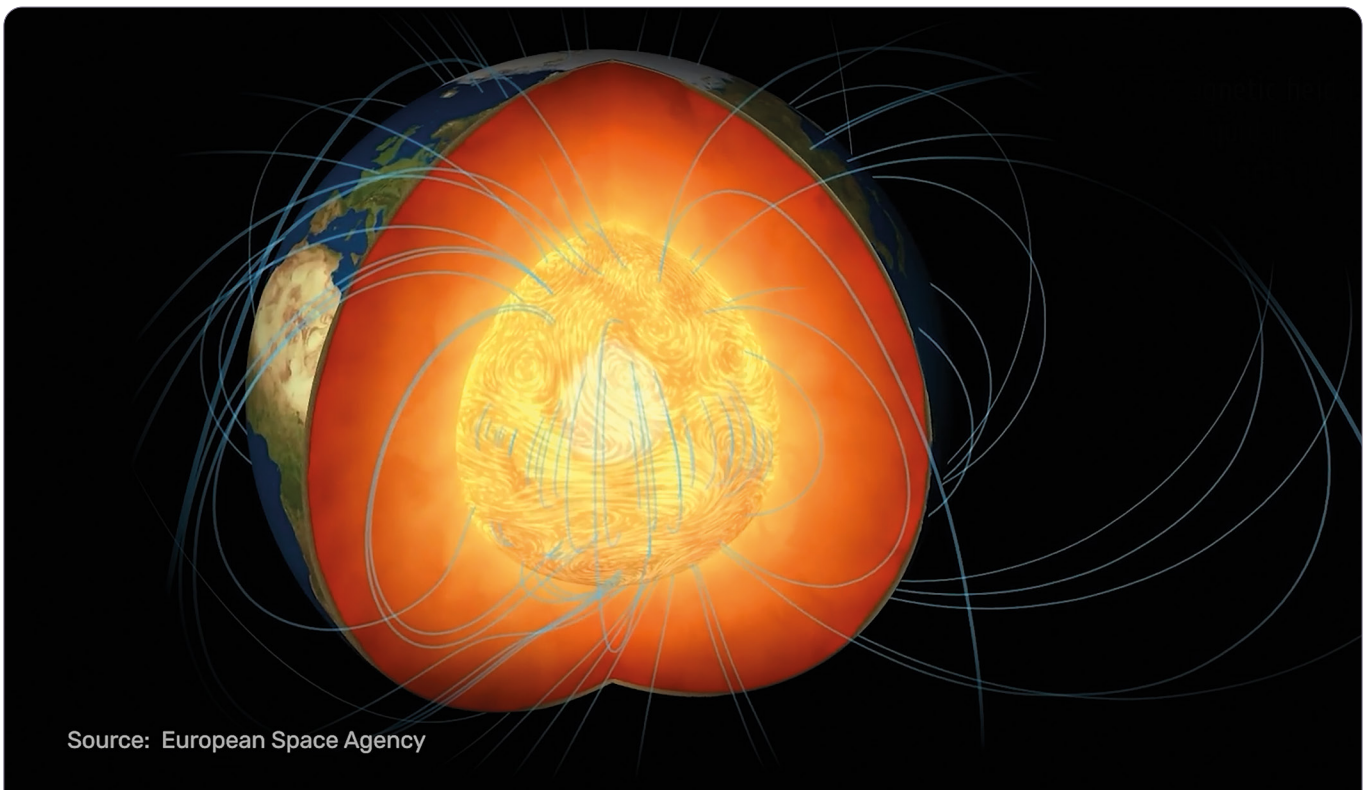


Рисунок 65. Схематичне зображення процесу утворення геомагнітного поля: рідке зовнішнє ядро Землі обертається навколо твердого внутрішнього ядра, формуючи природний генератор — геодинамо, завдяки якому утворюється магнітне поле планети.

Джерело: European Space Agency (ESA) <https://www.esa.int/>

Магнітне поле Землі взаємодіє з електричними явищами в океанах і атмосфері. Морська вода, завдяки вмісту солей і розчинених іонів, має значну електропровідність, що дозволяє їй проводити електричні струми. Ці струми, своєю чергою, взаємодіють із магнітним полем, започатковуючи складні електромагнітні процеси, які відіграють роль у динаміці планетарного магнітного поля.

Як раніше розглядалося, забруднення океанів, особливо мікро- й нанопластиком, може змінювати хімічні та електричні властивості води. Чим вищою є концентрація забруднювальних речовин, тим сильніше порушуються природні електромагнітні процеси.

Під час випаровування забрудненої води мікроскопічні краплі й аерозолі можуть переносити мікро- й нанопластик, важкі метали¹⁷⁶ та інші речовини в атмосферу, що може впливати на локальні електромагнітні процеси. Це схоже на те, як металевий об'єкт, розташований поруч із магнітом, змінює розподіл магнітного поля, послаблюючи його силу в певній області.

Вплив забруднення океанів на магнітне поле Землі потребує подальшого вивчення, особливо в контексті глобальних кліматичних змін. Розуміння цих процесів може допомогти оцінити їхній потенційний вплив на кліматичну систему та екосистеми планети.



¹⁷⁶Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. Environ. Sci. Technol. Lett. 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

ВПЛИВ МІКРО- ТА НАНОПЛАСТИКУ НА ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ



«Пластик не лише забруднює наші океани й водні шляхи та вбиває морське життя — він є в усіх нас, і ми не можемо уникнути споживання пластику. Глобальні дії є терміновими та необхідними для боротьби з цією кризою».

Марко Ламбертіні
генеральний директор WWF International

МНП як новий фактор ризику розвитку епідемій XXI століття

Останні 30 років спостерігається безперервне зростання інфарктів, інсультів, онкологічних захворювань, цукрового діабету, алергій, запальних захворювань кишечника. Зниження імунітету спостерігається як у дітей, так і у дорослих по всьому світу. Зростає поширеність безпліддя. Навіть незважаючи на обмеженість даних про кількість безплідних людей і пар, за оцінкою Всесвітньої організації охорони здоров'я, з безпліддям стикаються вже близько 17,5 % дорослих¹⁷⁷, тобто приблизно кожна шоста людина у світі.

З 2010 року спостерігається зниження інтелектуальних здібностей у людей. Навіть у розвинених країнах 25 % дорослих не можуть впоратися з базовими математичними завданнями; наприклад, у США цей показник сягає 35 %. Знижується здатність до концентрації уваги, логічного мислення та розв'язання елементарних завдань. Зростає поширеність різних форм деменції та порушення когнітивних здібностей¹⁷⁸.

Зростання психічних розладів випереджає ріст соматичних захворювань¹⁷⁹. Тривожні розлади, аутизм, депресія та біполярний розлад, синдром дефіциту уваги та гіперактивності (СДУГ) набувають масштабу пандемії.

Дедалі більше даних вказує на участь мікро- й нанопластику в патогенезі різних захворювань.

¹⁷⁷ World Health Organization. 1 in 6 people globally affected by infertility. (2023)

<https://www.who.int/news/item/04-04-2023-1-in-6-people-globally-affected-by-infertility> (Дата доступу: 01.05.2025).

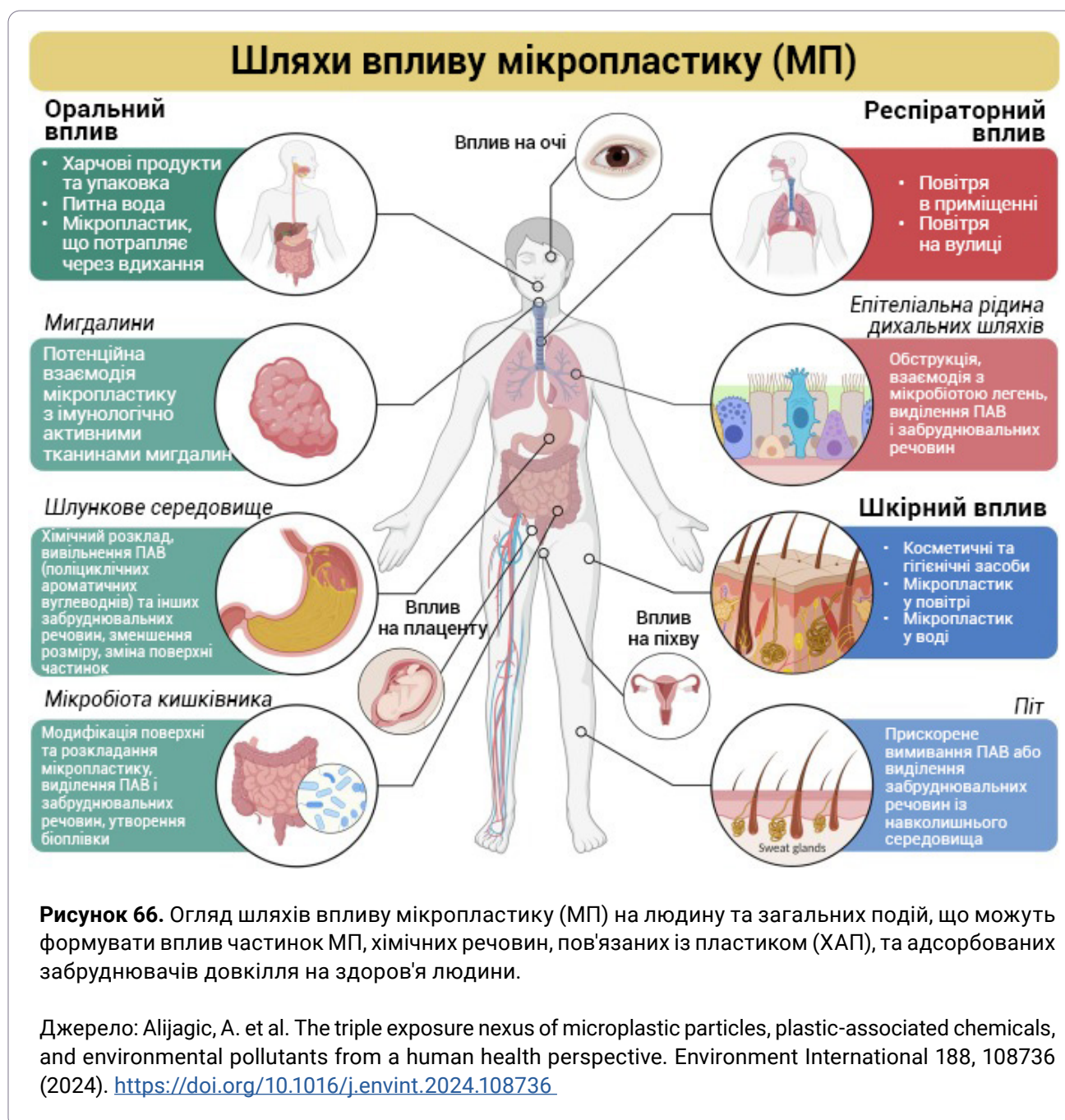
¹⁷⁸ Financial Times. Have humans passed peak brain power? <https://www.ft.com/content/a8016c64-63b7-458b-a371-e0e1c54a13fc> (Дата доступу: 01.05.2025).

¹⁷⁹ Ipsos. Ipsos Health Service Report 2024: Mental Health seen as the biggest Health issue. (2024) <https://www.ipsos.com/en/ipsos-health-service-report> (Дата доступу: 01.05.2025).

Молекулярні механізми токсичності МНП.

Пошкодження ДНК, мітохондрій і клітинних мембран

Мікро- й нанопластик (МНП) є однією з найпоширеніших форм антропогенного забруднення навколишнього середовища. Завдяки своїм фізико-хімічним властивостям, частинки пластику здатні переміщуватися на значні відстані, долаючи географічні та екологічні бар'єри. Основні шляхи надходження мікро- й нанопластику до організму людини — це проковтування (з водою та їжею), вдихання з повітрям і проникнення через шкіру¹⁸⁰ (рис. 66).



¹⁸⁰Bora, S. S. et al. Microplastics and human health: unveiling the gut microbiome disruption and chronic disease risks. Front. Cell. Infect. Microbiol. 14, 1492759 (2024). <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1492759>

Як згадувалося в розділі «Наслідки пластикового забруднення: мікро- й нанопластик (МНП) як новий фактор планетарної кризи», морське середовище слугує значним джерелом вторинного мікропластику. Згідно з оцінками, морський бриз переносить близько 136 000 тонн мікропластику на прибережні території щорічно. Крім того, відкриті водойми в урбанізованих районах, включно зі стічними та дощовими системами, стають значущими центрами накопичення й подальшого розповсюдження пластикових частинок, кількість яких може перевищувати попередні оцінки на 90 %.

Харчові продукти є важливим шляхом потрапляння МНП до організму людини. Рослини здатні акумулювати нанопластик через кореневу систему: під час поливу або опадів частинки проникають у ґрунт і поглинаються разом із водою, просуваючись ксилемою та накопичуючись у тканинах листя й плодів¹⁸¹. Найбільший вміст пластикових частинок виявлено в таких культурах, як яблука, груші, морква та броколі.

Морепродукти також слугують одним зі шляхів перенесення МНП. Заковтування мікропластику морськими організмами фіксується на всіх трофічних рівнях. Згідно з дослідженням Ньюкаслського університету, середньостатистична людина може споживати до 250 г мікропластику на рік, що еквівалентно приблизно 5 г на тиждень — масі однієї пластикової картки. Крім того, під час нагрівання пластикових контейнерів, зокрема дитячого харчування, у мікрохвильових печах може вивільнятися в їжу понад 2 мільярди наночастинок і 4 мільйони мікрочастинок пластику на кожен квадратний сантиметр поверхні.

Мікропластик значно поширений у питній воді. Дослідження показують, що до 90 % зразків водопровідної води у США містять частинки МНП. Основними шляхами його потрапляння до водних систем є стоки, промислові викиди й атмосферні опади, які містять пластик, що вловлюється з повітря. Під час випаровування забрудненої води частинки пластику можуть підніматися в атмосферу і потім випадати з дощем або снігом. Під час дослідження, проведеного в 11 національних парках США, за 14 місяців було зафіксовано випадання понад 1000 тонн пластикових частинок з опадами — обсяг, достатній для виробництва 120 мільйонів пластикових пляшок.

Аерозольне розповсюдження МНП є одним із найнебезпечніших механізмів його впливу на людину. Часточки пластику піднімаються з поверхонь морів і водойм, транспортуються повітряними масами і стають компонентом атмосферного аерозолі. Оцінки показують, що в умовах мегаполісу за двогодинну прогулянку доросла людина може вдихати до 106 тисяч частинок мікропластику, а в районах, прилеглих до водойм, ця цифра зростає в 10 разів.

¹⁸¹Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

Нове дослідження, представлене на конференції Американського коледжу кардіології (ACC.25), виявило, що потужніший вплив мікропластику, який може бути ненавмисно спожитий або вдихуваний, пов'язаний із підвищеною поширеністю хронічних неінфекційних захворювань. Дослідження показало, що в спільнотах, розташованих уздовж східного, західного узбережжя затоки, а також деяких берегів озер у США, вищі концентрації мікропластику в навколишньому середовищі асоціюються з підвищеною поширеністю хронічних неінфекційних захворювань, таких як гіпертонія, діабет та інсульт.



«Це дослідження дає початкові докази того, що вплив мікропластику позначається на здоров'ї серцево-судинної системи, особливо на хронічних неінфекційних захворюваннях, таких як високий кров'яний тиск, діабет та інсульт», — сказав Сай Рахул Поннана, магістр наук, науковий співробітник із даних досліджень у Медичній школі Case Western Reserve в Огайо та провідний автор дослідження. «Коли ми включили до нашого аналізу ¹⁵⁴ різні соціально-економічні та екологічні характеристики, ми не очікували, що мікропластик увійде до першої десятки за прогнозуванням поширеності хронічних неінфекційних захворювань»¹⁸².

Мікро- й нанопластик здатний проникати через біологічні бар'єри, зокрема через бар'єри кишківника, легенів, головного мозку та плаценти¹⁸³. Мікропластик, що зазнав впливу прісної або морської води, легше проникає до клітин (рис. 67) завдяки осіданню біомолекул на його поверхні. Ці біомолекули, формуючи покриття, сприяють проходженню мікропластику через травний тракт та його інтеграції до тканин. Таке покриття діє як механізм, що полегшує проникнення пластику в клітини, подібно до троянського коня¹⁸⁴.

¹⁸²American College of Cardiology. New evidence links microplastics with chronic disease. (2025)

<https://www.acc.org/About-ACC/Press-Releases/2025/03/25/10/19/New-Evidence-Links-Microplastics-with-Chronic-Disease> (Дата доступу: 01.05.2025).

¹⁸³Alqahtani, S., Alqahtani, S., Saquib, Q. & Mohiddin, F. Toxicological impact of microplastics and nanoplastics on humans: understanding the mechanistic aspect of the interaction. Front. Toxicol. 5, 1193386 (2023). <https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1193386>

¹⁸⁴Ramsperger, A. F. R. M. et al. Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells. Sci. Adv. 6, eabd1211 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>

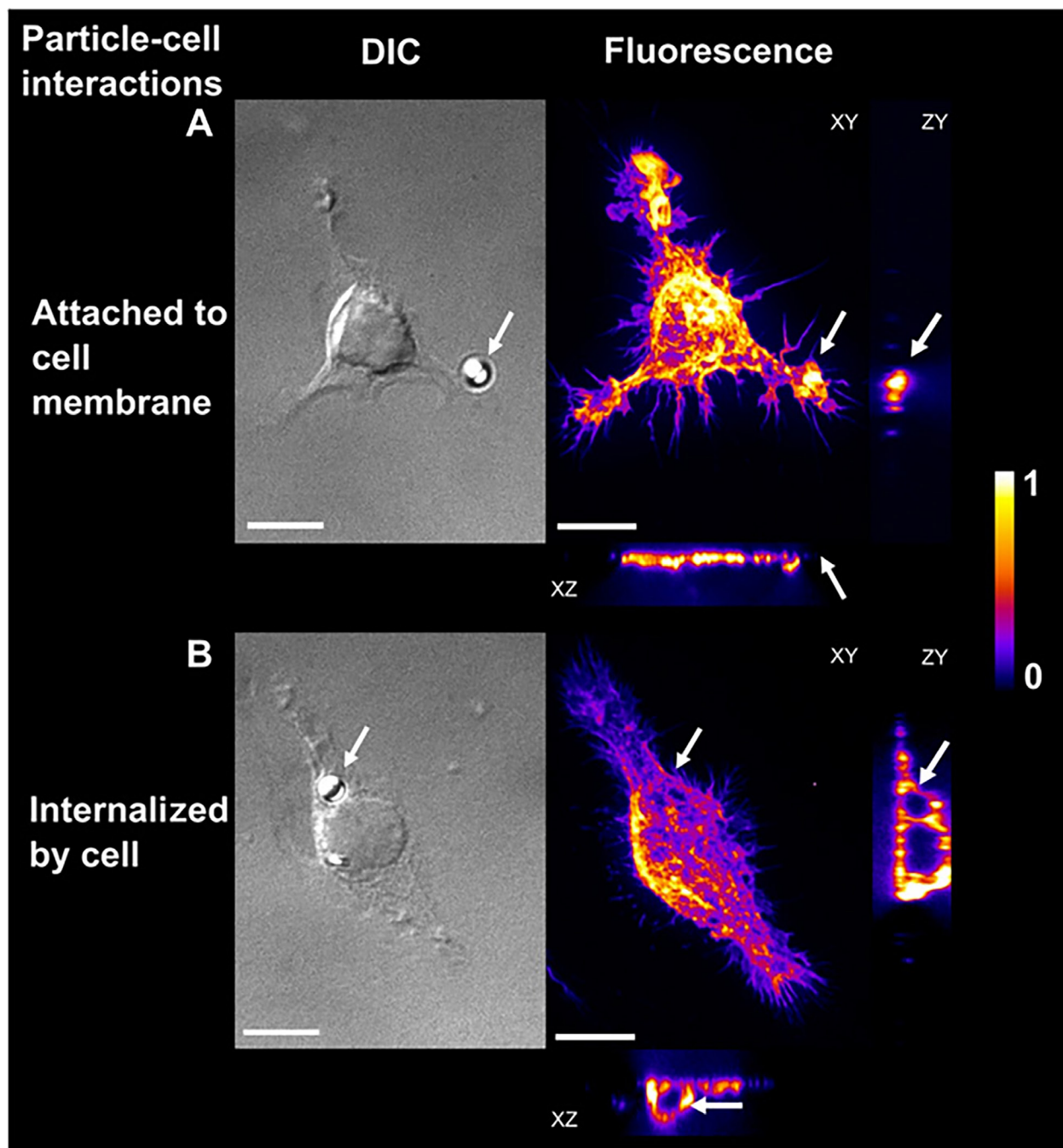


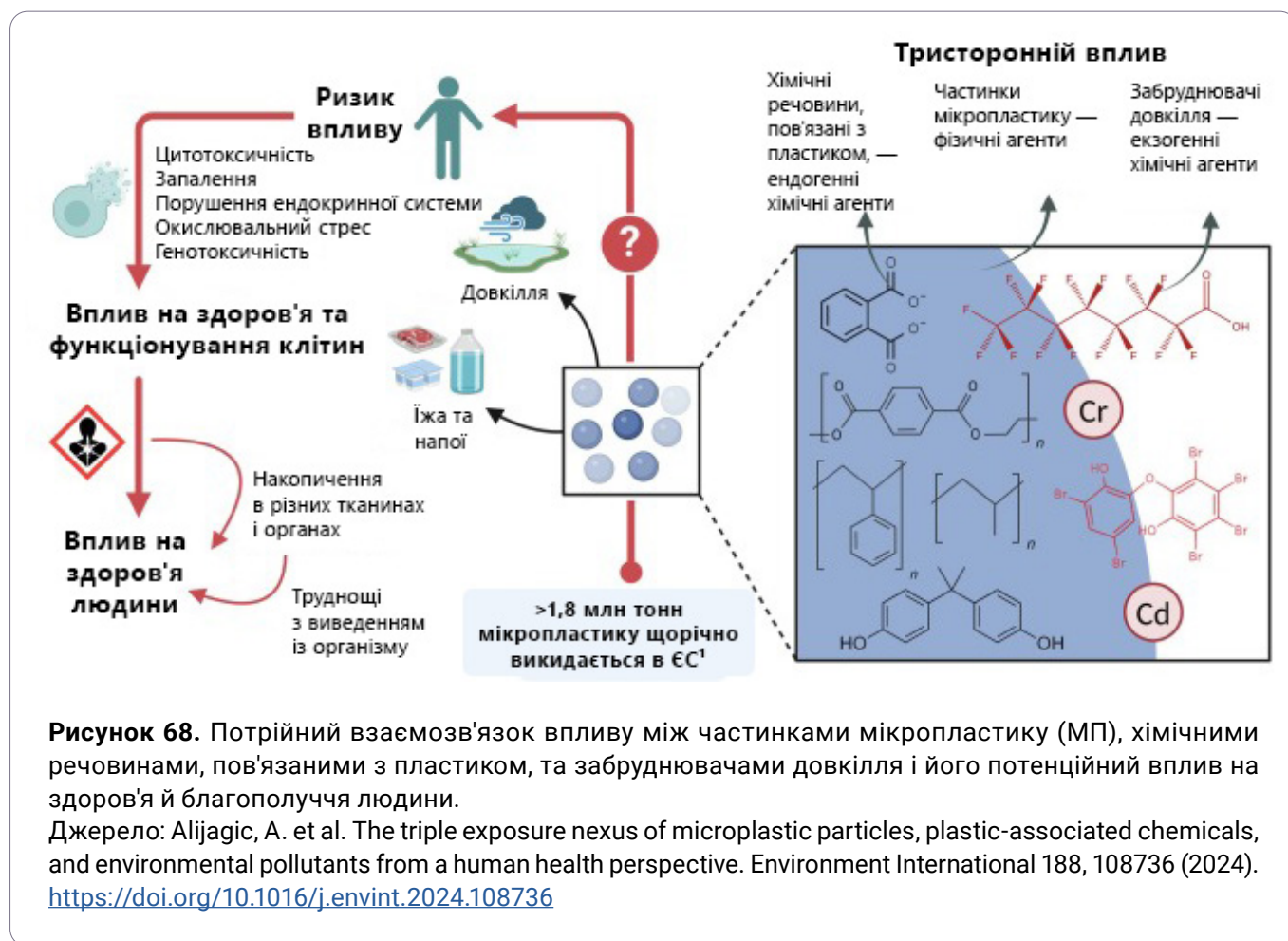
Рисунок 67. Зображення взаємодії з клітиною мікропластикових частинок, що піддавалися впливу прісної води протягом 2 тижнів.

DIC: Диференційно-інтерференційні контрастні мікроскопічні зображення взаємодій частинок і клітин. Флуоресценція: Конфокальні зображення обертового диску клітин із флуоресцентно міченим ниткоподібним актином (зображення в хибних кольорах, максимальна проєкція інтенсивності, що показує умовні одиниці). Проекції XY, YZ і XZ тривимірних конфокальних зображень дають змогу диференціювати мікропластикові частинки (A), прикріплені до клітинних мембран, або (B) інтерналізовані мікропластикові частинки. Стрілки вказують на положення мікропластикових частинок. Масштабні лінійки: 10 мкм.

Джерело: Ramsperger, A. F. R. M. et al. Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells. Sci. Adv. 6, eabd1211 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>

Токсичність мікропластику залежить від безлічі факторів: розміру, форми, поверхневого заряду, ступеня вивітрювання, часу впливу, складу домішок та інших характеристик¹⁸⁵. Дрібніші частинки легше проникають до клітин і викликають більш виражений окислювальний стрес. Поверхневий заряд мікропластику — ключовий параметр, що визначає ефективність клітинного поглинання (впливає на адгезію). Крім того, мікропластик складається з полімерів і різних домішок, що підсилюють його негативний вплив¹⁸³.

Частинки мікро- й нанопластику, хімічні сполуки у складі пластику та забруднювальні речовини довкілля, які пластик адсорбує на себе, чинять комплексний¹⁸⁶ негативний вплив на здоров'я людини (рис. 68), що становить значну загрозу.



¹⁸⁵Li, Y. et al. Potential Health Impact of Microplastics: A Review of Environmental Distribution, Human Exposure, and Toxic Effects. *Environ. Health* 1, 249–257 (2023). <https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00052>

¹⁸⁶Alijagic, A. et al. The triple exposure nexus of microplastic particles, plastic-associated chemicals, and environmental pollutants from a human health perspective. *Environment International* 188, 108736 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108736>

1 грам мікропластику може містити до 24 000 нанограмів стійких органічних забруднювачів¹⁸⁷. Ці речовини вирізняються високою токсичністю, накопичуються в організмах і здатні завдавати шкоди навіть у малих концентраціях.

Мікропластик може зробити інші забруднювальні речовини шкідливішими¹⁸⁸, оскільки мікропластик і суміш речовин на його поверхні можуть не лише прилипати до інших забруднювачів, але й взаємодіяти одне з одним, змінюючи їхні хімічні властивості.

Дослідження демонструють, що вплив мікро- й нанопластику спричиняє токсичні ефекти на різних рівнях біологічної організації:

- **Макромолекули:** Пошкодження ДНК, порушення експресії генів і зміни в транскрипції білків.
- **Клітини та органели:** Порушення клітинного поділу, цитотоксичність, апоптоз, окислювальний стрес, дисрегуляція метаболізму та підвищення внутрішньоклітинної концентрації кальцію.
- **Тканини:** Запальні процеси, фіброз, остеоліз кісткової тканини.
- **Органи:** Імунні реакції, дисфункція органів, нейротоксичність, канцерогенез, зміни метаболізму та енергетичного балансу.
- **Популяції тварин і людини:** Зниження фертильності, уповільнення росту, депопуляція.

Ці ефекти підкреслюють багаторівневий вплив мікро- й нанопластику на біологічні системи¹⁸⁹.

1. Порушення клітинних функцій

Руйнування організму під впливом МНП починається на клітинному рівні¹⁹⁰. МНП взаємодіє з клітинними мембранами через різноманітні механізми, зокрема водневі, галогенні зв'язки, а також гідрофобні, ван-дер-ваальсові та електростатичні взаємодії. Діючи як дестабілізуючий фактор, МНП порушує цілісність і функціонування клітинних мембран (рис. 69).

¹⁸⁷ Shanwei Government. Content on environmental health. Microplastics found in the human body for the first time, are they harmful to health? Here's the answer. https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post_550539.html (Дата доступу: 01.05.2025).

¹⁸⁸ Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

¹⁸⁹ Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. *Chemosphere* 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

¹⁹⁰ Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience* 26, 106061 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

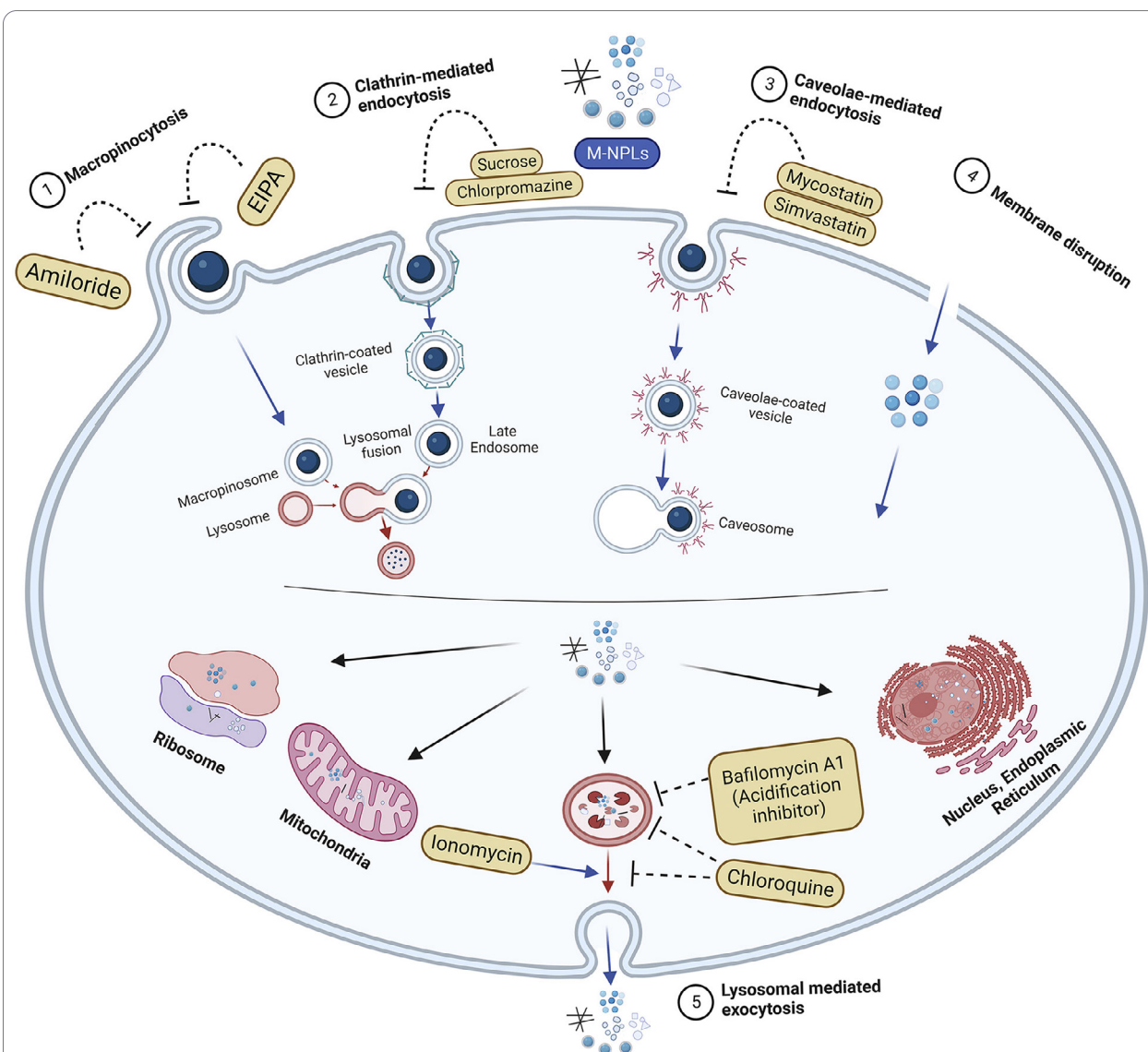


Рисунок 69. Клітинне поглинання та вивільнення M-NPL. M-NPL використовують різні типи ендоцитозу.

(1) Макропіноцитоз, (2) Ендоцитоз, опосередкований клатрином, (3) Ендоцитоз, опосередкований кавеолами, та руйнування клітинної мембрани для інтерналізації. M-NPL вивільняються з клітин за допомогою 4) ендоцитозу, опосередкованого лізосомами.

Джерело: Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience* 26, 106061 (2023).

<https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

Завдяки своїм малим розмірам МНП здатний легко проникати до клітин людини (рис. 70). Малі розміри та електростатичний заряд, накопичений на МНП, зумовлюють його системний вплив на організм¹⁹¹.

¹⁹¹Casella, C. & Ballaz, S. J. Genotoxic and neurotoxic potential of intracellular nanoplastics: A review. *Journal of Applied Toxicology* 44, 1657–1678 (2024).
<https://doi.org/10.1002/jat.4598>

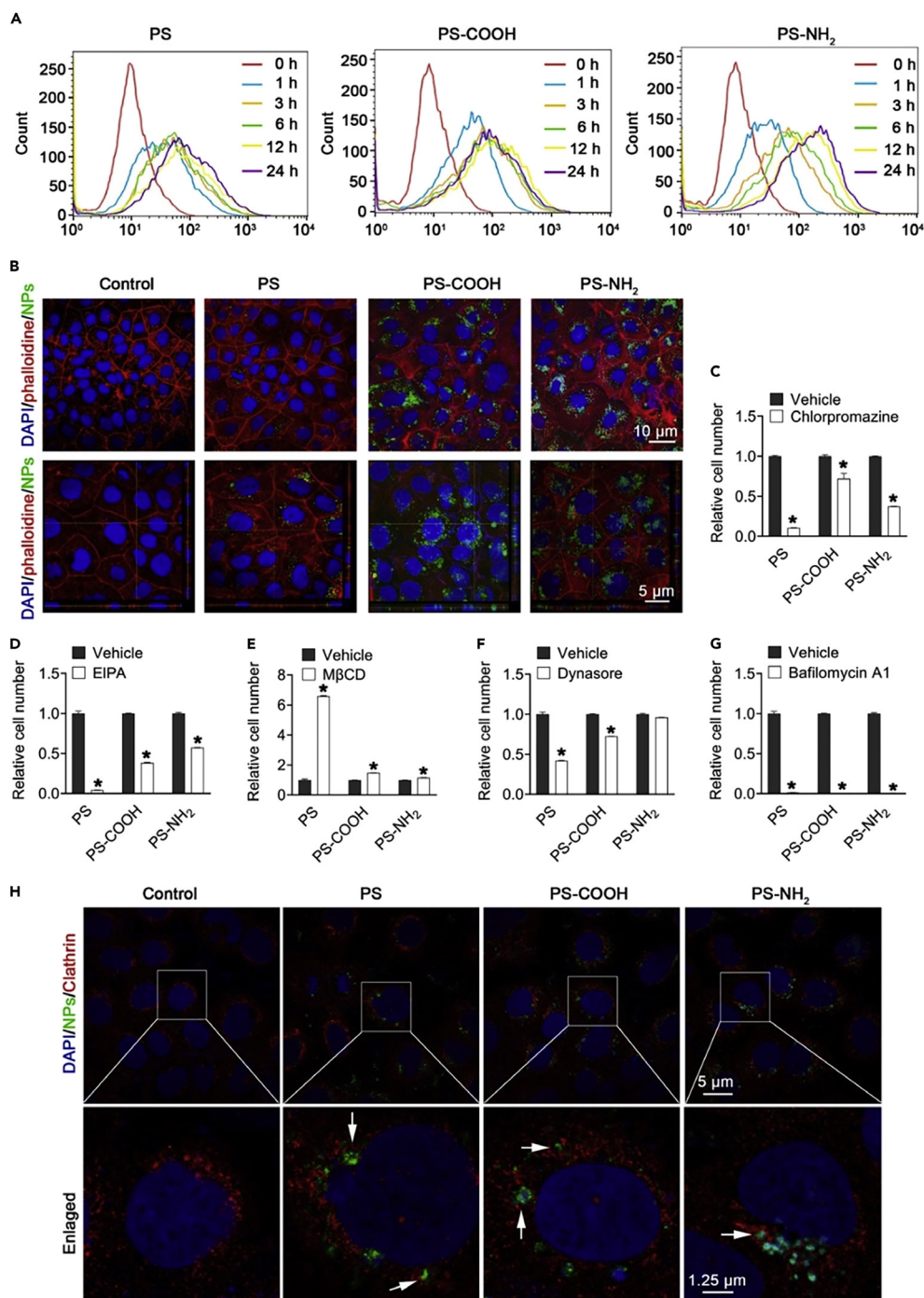


Рисунок 70. Клітини Сасо-2, що інтерналізують НП.

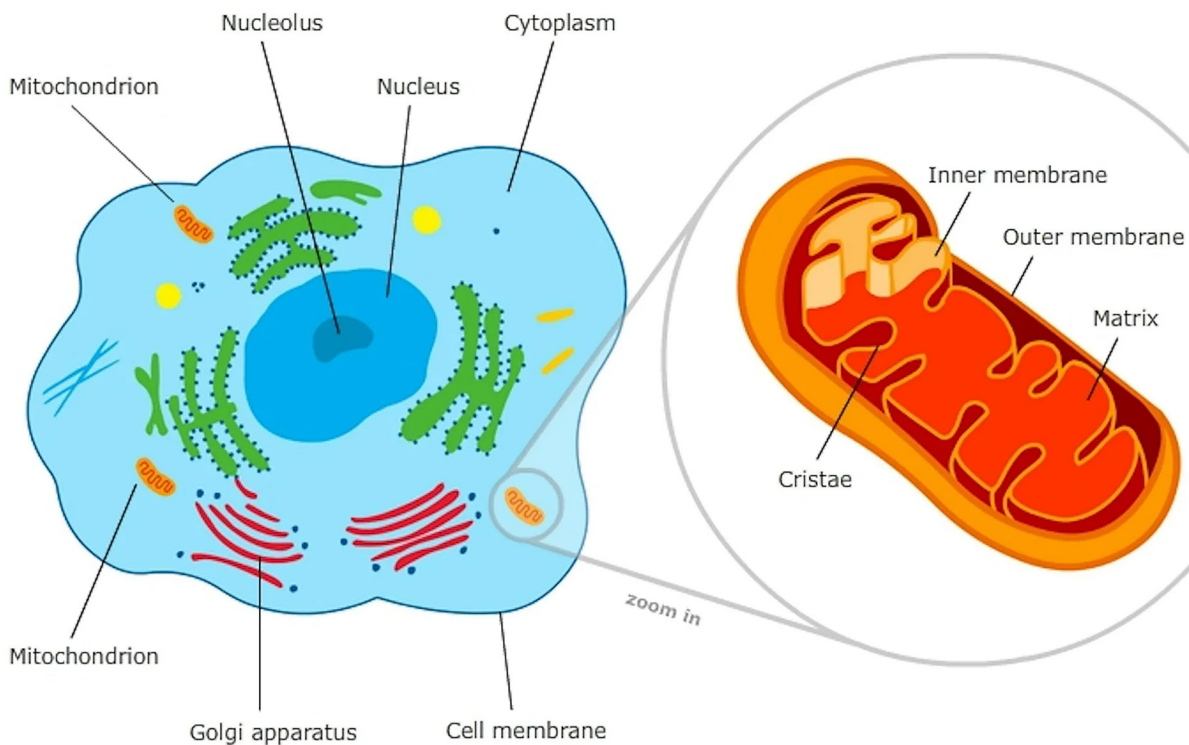
(А-Г) Аналіз інтерналізації НП клітинами Сасо-2 з використанням проточної цитометрії (А) і конфокальної мікроскопії (В). Аналіз проточної цитометрії клітин Сасо-2, попередньо оброблених упродовж 1 години хлорпромазином (С), ЕІРА (D), М β CD (Е), dynasore (F) і бафіломіцином А1 (G), з подальшою обробкою НП протягом 24 годин. Локалізацію НП у везикулах, опосередкованих клатрином, досліджено за допомогою конфокальної мікроскопії (H).

Джерело: Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience* 26, 106061 (2023).

<https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

Ключовим аспектом руйнівної дії на клітинному рівні є пошкодження клітинних мембран, мітохондрій і руйнування ДНК. Електростатично заряджені частинки мікро- й нанопластику здатні дестабілізувати мембранний потенціал клітин, особливо нейронів, спричиняючи спонтанні електричні сигнали, збої в передачі інформації між клітинами або клітинну смерть.

Усередині клітини основний удар руйнівної дії нанопластику припадає на мітохондрії — ключові органели, що забезпечують виживання та відновлення клітини (рис. 71). Мітохондрії, окрім ролі «енергетичних станцій», виконують багатофункціональні завдання, визначаючи здоров'я організму, стійкість до стресу, розвиток хронічних захворювань і процеси старіння.



© 2007-2011 The University of Waikato | www.sciencelearn.org.nz

Рисунок 71. Схематичне зображення клітини та мітохондрій

Правильне функціонування мітохондрій має вирішальне значення для виживання клітин, гомеостазу та біоенергетики. Структура і функція мітохондрій підтримуються системою контролю якості мітохондрій, яка складається з процесів мітохондріального біогенезу, мітохондріальної динаміки (злиття / поділ), мітофагії та реакції мітохондріального розгорнутого білка UPR MT. Дисфункція та/або пошкодження мітохондрій пов'язані з виникненням і прогресуванням кількох захворювань людини, включно з нейродегенеративними, серцево-судинними, віковими захворюваннями, діабетом і раком. Екологічний стрес і забруднювальні речовини можуть посилювати чутливість мітохондрій до пошкоджень, що спричиняє мітохондріальну дисфункцію. З'являється дедалі більше доказів впливу нанопластику та мікропластику на здоров'я та функцію мітохондрій. Повідомлялося, що МНП викликає окислювальний стрес і вироблення активних форм кисню, що зрештою змінює потенціал мітохондріальної мембрани. МНП може проникати через біологічні бар'єри в організмі людини та засвоюватися клітинами, потенційно змінюючи мітохондріальну динаміку, біоенергетику й сигнальні шляхи, тим самим впливаючи на клітинний метаболізм і функцію.

З огляду на критичну роль мітохондрій у клітинному та організмовому здоров'ї, МНП становить значну загрозу для здоров'я та функції мітохондрій. Поточні дані підкреслюють терміновість розв'язання всеосяжної проблеми забруднення МНП не тільки для захисту довкілля, а й для здоров'я людини¹⁹².

Мітохондрії синтезують АТФ — універсальну молекулу енергії, що забезпечує всі біологічні процеси: від м'язового скорочення та передавання нервових імпульсів до гормонального синтезу й поділу клітин. Вони беруть участь в обміні вуглеводів, жирів і амінокислот, а також підтримують метаболічний баланс в організмі.

Мітохондрії контролюють клітинну загибель (апоптоз) — критично важливий процес, що запобігає накопиченню пошкоджених або потенційно небезпечних клітин. Порушення в цій системі пов'язані з розвитком онкологічних, аутоімунних і нейродегенеративних захворювань. Мітохондрії відіграють провідну роль в антиоксидантному захисті, регулюючи рівень реактивних форм кисню (ROS). У разі збоїв у цій системі накопичуються ушкодження, прискорюється старіння, підвищується ризик хронічних запалень і захворювань (рис. 72).

¹⁹²Yöntem, F. D. & Ahabab, M. A. Mitochondria as a target of micro- and nanoplastic toxicity. Cambridge Prisms: Plastics 2, e6 (2024).
<https://doi.org/10.1017/plc.2024.6>

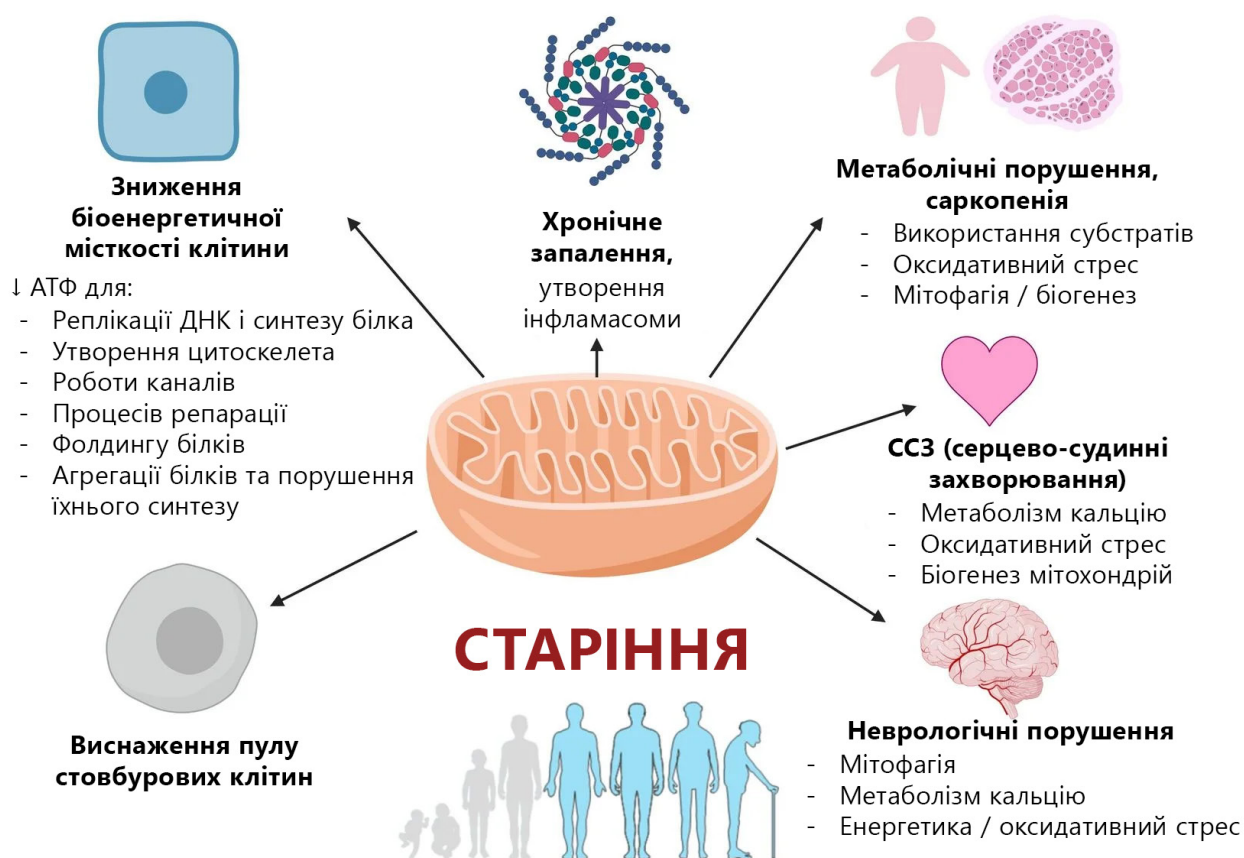


Рисунок 72: Порушення функції мітохондрій, спричинене забрудненням довкілля, може призвести до різних захворювань.

Джерело: Борисова О. Мітохондріальна медицина. Open Longevity. (2019)
https://openlongevity.org/mitochondria_medicine_1 (Дата доступу: 01.05.2025).

Мітохондрії мають власну ДНК, яка передається по материнській лінії, що робить їх унікальними учасниками успадкованих захворювань. Вони регулюють активність ядерних генів і адаптацію клітин до змін зовнішнього середовища. Також мітохондрії беруть участь у синтезі стероїдних гормонів — кортизолу, естрогенів і тестостерону. Саме порушення мітохондріальних функцій внаслідок впливу на них нанопластику лежить в основі каскаду патологічних процесів, що здатні призвести до тяжких і потенційно незворотних наслідків у роботі як окремих органів і систем, так і всього організму загалом (Таблиця 1).

Неврологічні захворювання	Хвороба Паркінсона, хвороба Альцгеймера, бічний аміотрофічний склероз (БАС), епілепсія, мігрені, мітохондріальні енцефалопатії (наприклад, синдром MELAS)
Серцево-судинні захворювання	Кардіоміопатії, серцева недостатність, атеросклероз (через окислювальний стрес)
Імунні та запальні захворювання	Аутоімунні захворювання (наприклад, системний червоний вовчак), хронічні запальні стани (через дисфункцію ROS і цитокінових сигналів)
Метаболічні розлади	Цукровий діабет 2-го типу, ожиріння, метаболічний синдром, порушення обміну жирних кислот і лактату
Онкологічні захворювання	При мітохондріальній дисфункції виникає підвищений ризик мутацій і злоякісної трансформації клітин
М'язові захворювання	Мітохондріальні міопатії, хронічна м'язова слабкість і втома
Хвороби органів чуття	Пігментний ретиніт, оптична нейропатія Лебера (спадкова втрата зору)
Генетичні мітохондріальні синдроми	Синдром Лея, синдром Kearns-Sayre, синдром Барта

Таблиця 1. Огляд деяких захворювань, пов'язаних із мітохондріальною дисфункцією

Участь МНП у механізмах передчасного старіння й онкогенезу

Вплив нанопластику може спричиняти передчасне старіння, втручаючись у роботу мітохондрій і порушуючи генетичні програми організму. Пошкодження мітохондрій призводить до надлишкового вироблення реактивних форм кисню, що викликають окислювальний стрес. Це руйнує ДНК, порушує генетичну стабільність, активує запалення та прискорює старіння тканин. Крім того, нанопластик сприяє вкороченню теломер, що обмежує здатність клітин до поділу.



«Ми також змогли продемонструвати, що у людей навіть одна зміна в нуклеотиді мітохондріальної ДНК, пов'язана з погіршенням роботи мітохондрій і дитячими мітохондріальними захворюваннями, може прискорювати процеси старіння», — розповів Таошен Хуан, доктор медицини, доктор філософії, професор і керівник відділу генетики на кафедрі педіатрії в Школі медицини та біомедичних наук Джейкобса в УВ. «Ми виявили, що активні форми кисню через погану функцію мітохондрій призводять до збільшення пошкодження ДНК із плином часу»¹⁹³.

Епігенетичне старіння — це зміни в регуляції генів, які відбуваються на рівні ДНК-модифікацій (включення / виключення генів), але без зміни самої ДНК. Це тонкий «молекулярний таймер», який можна виміряти і який може йти швидше або повільніше за звичайне старіння. Висока активність мітохондріальної ДНК пов'язана з прискореним епігенетичним старінням. У деяких людей уже в 20–30 років біологічний вік клітин може бути значно старшим за хронологічний. Тобто організм старіє швидше, ніж повинен.

У людей із мітохондріальними порушеннями вже в молодому віці часто з'являються вікові хвороби, такі як: деменція, серцево-судинні захворювання, аритмії, серцева недостатність. Шотландські вчені встановили, що чим пізніше людина народилася, тим вищий у неї ризик захворіти до 50 років. Наприклад, у людей, народжених у 1956–1960 роках, у середньому більше хвороб, ніж у тих, хто народився раніше — у 1951–1955 або 1946–1950 роках¹⁹⁴ (рис. 73).

¹⁹³Medindia. Study unravels how mitochondrial dysfunction leads to premature aging. (2022) <https://www.medindia.net/news/study-unravels-how-mitochondrial-dysfunction-leads-to-premature-aging-208364-1.htm> (Дата доступу: 01.05.2025).

¹⁹⁴Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study. European Journal of Public Health 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae062>

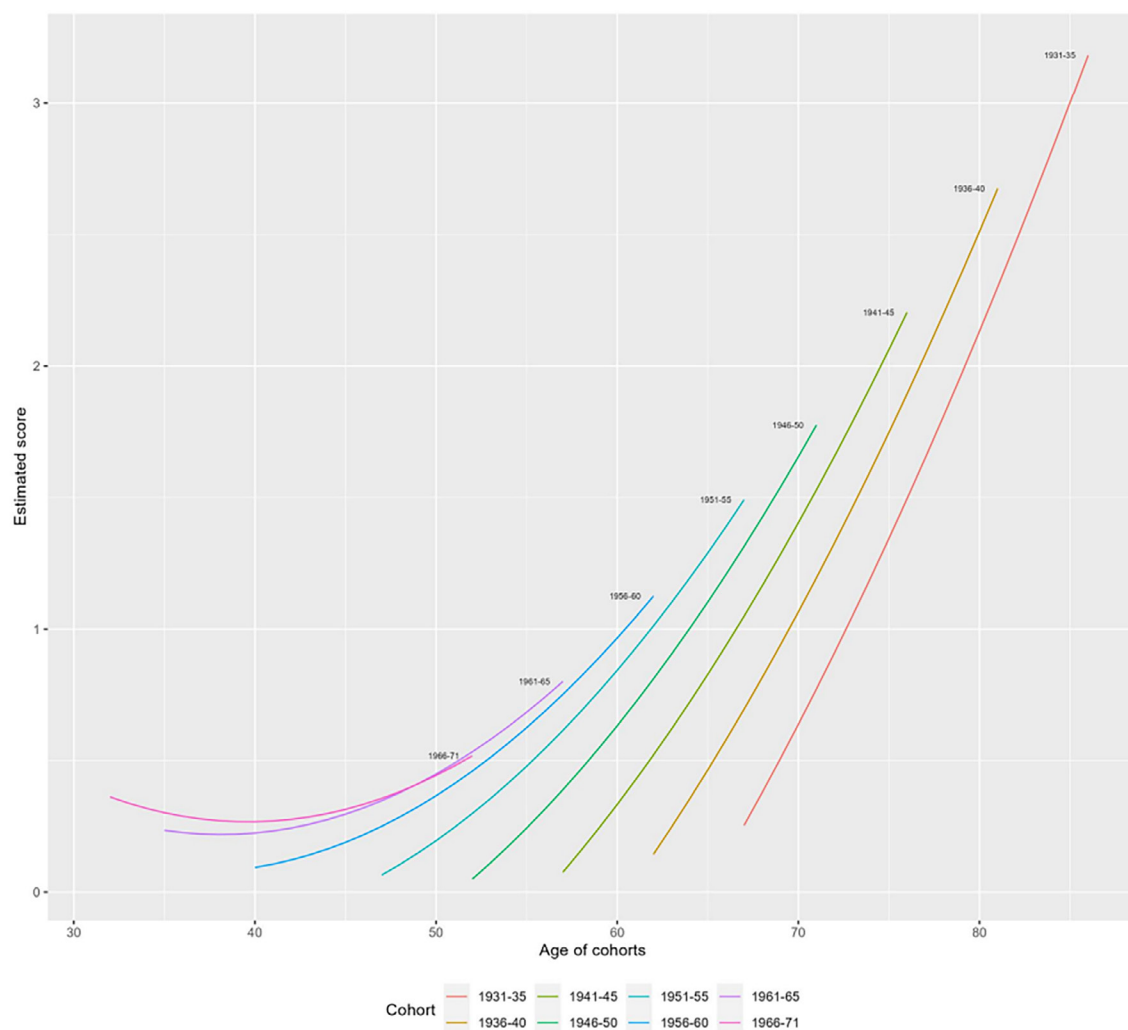


Рисунок 73. Прогнозовані показники мультиморбідності за когортами та віком (на підставі оцінок моделі 1 у Додатковій таблиці S3).

Джерело: Шотландське лонгітюдне дослідження Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study. *European Journal of Public Health* 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae062>

Мутації мітохондріальної ДНК при старінні та раку

Ключові механізми, що лежать в основі старіння та розвитку онкологічних захворювань, багато в чому збігаються. Однією з головних ланок є порушення функції мітохондрій — клітинних органел, що відповідають за вироблення енергії. З віком у тканинах людини накопичуються мутації мітохондріальної ДНК (мтДНК), і схожі зміни давно виявлено за різних форм раку¹⁹⁵.

Коли в клітині відбувається мутація, це може змінити її роботу. Наприклад, клітина починає рости та ділитися швидше, не помирає, навіть коли повинна, стає «невидимою» для імунної системи, краще переносить нестачу кисню або їжі. Такі клітини отримують перевагу перед нормальними клітинами — вони живуть довше, діляться частіше, заповнюють дедалі більше місця й починають домінувати над іншими. Коли таких клітин накопичується багато, може початися розвиток пухлини.

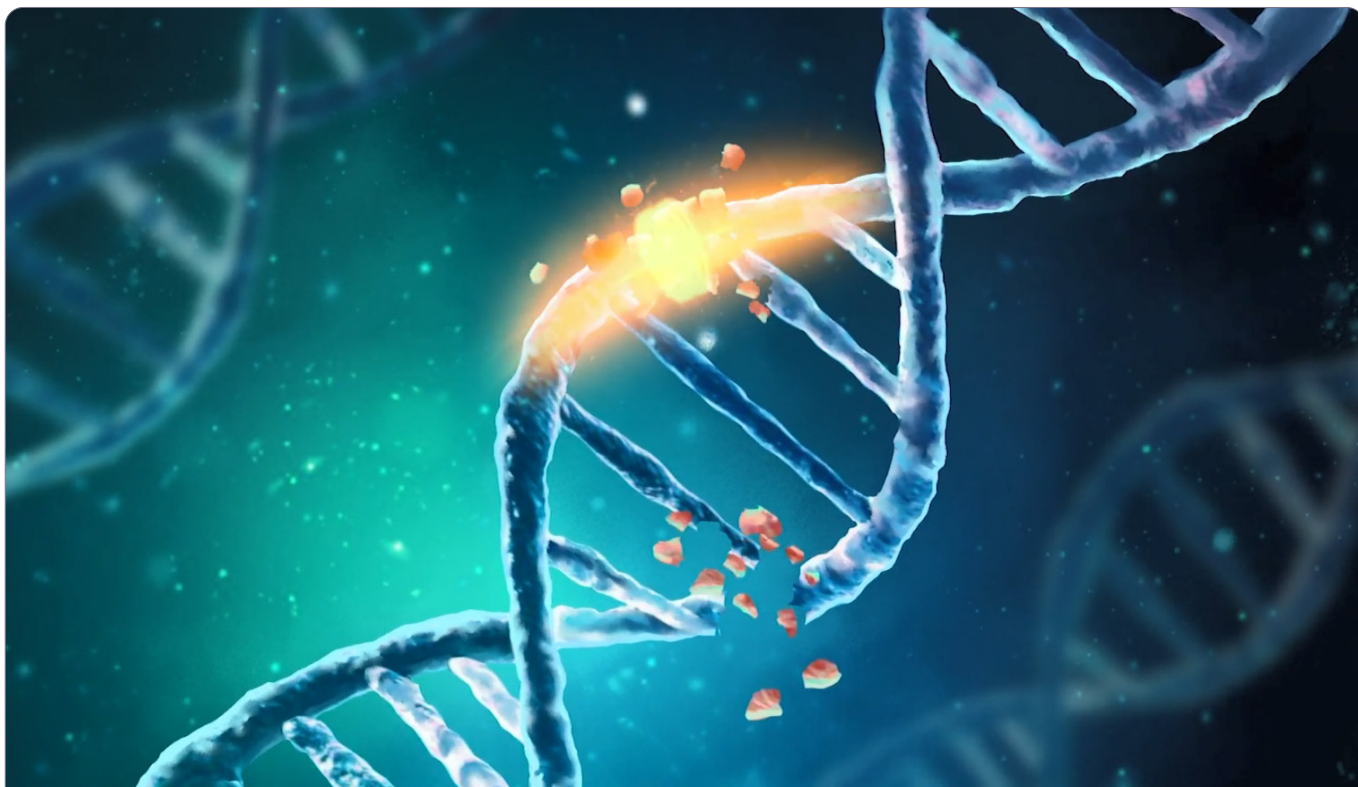


Рисунок 74. Пошкодження ДНК, що призводять до мутацій

Особливо вразливі до мітохондріальних ушкоджень постмітотичні клітини — нейрони, кардіоміоцити та деякі м'язові клітини. Вони не діляться, тому накопичені з віком мутації, особливо в мітохондріальній ДНК (рис. 74), залишаються в клітині протягом усього її життя.

¹⁹⁵Smith, A. L. M., Whitehall, J. C. & Greaves, L. C. Mitochondrial DNA mutations in ageing and cancer. *Molecular Oncology* 16, 3276–3294 (2022).
<https://doi.org/10.1002/1878-0261.13291>

Постмітотичні клітини є дуже активними: нейрони споживають багато енергії для передавання сигналів, а клітини серця постійно качають кров, а отже мітохондрії працюють на межі, виробляючи велику кількість активних форм кисню (АФК). Активні форми кисню пошкоджують мітохондрії, посилюючи вироблення нових АФК і запускаючи замкнене коло руйнувань. Пошкодження накопичуються, що може призвести до запуску патологічних процесів (наприклад, нейродегенеративних, серцево-судинних захворювань, онкології) і навіть смерті.

Можливо, цим пояснюється те, що хвороби серцево-судинної системи, інфаркти, інсульти та онкологічні захворювання є основними причинами смерті серед усіх інших захворювань. А токсична дія нанопластику на організм людини, що багаторазово посилилася за останні 10–20 років, пояснює, чому ці хвороби помолодшали й набули масштабів пандемії, забираючи десятки мільйонів людських життів щороку. Адже нанопластик насамперед руйнує роботу мітохондрій, провокує окислювальний стрес і мутації в мітохондріальній та ядерній ДНК.

Дестабілізація гормональної системи під впливом МНП

Під час виробництва пластмас використовуються хімічні речовини, які порушують роботу ендокринної системи та гормональний баланс. Вони здатні імітувати, блокувати або змінювати дію природних гормонів, що може призводити до різноманітних проблем зі здоров'ям.

В організмі людини виявлено понад 3 тисяч хімічних речовин, що використовуються в упаковці¹⁹⁶. Близько 100 із цих хімікатів класифікуються як такі, що становлять високу небезпеку для здоров'я людини.

БІСФЕНОЛ

Бісфенол А (BPA) — це синтетичний пластифікатор, який широко використовується в полікарбонатному пластику (пляшки, контейнери), епоксидних смолах (покриття консервних банок) і медичних виробках.

Під час нагрівання BPA мігрує в їжу та напої.

¹⁹⁶Geueke, B. et al. Evidence for widespread human exposure to food contact chemicals. J Expo Sci Environ Epidemiol 1–12 (2024).
<https://doi.org/10.1038/s41370-024-00718-2>



«BPA діє як “неконтрольований” гормон, щоб витіснити природний гормон, який зазвичай бере участь у цьому шляху», — зазначив професор Ян Рей, експерт із хімічних речовин довкілля зі Школи хімії Мельбурнського університету¹⁹⁷ (рис. 75).

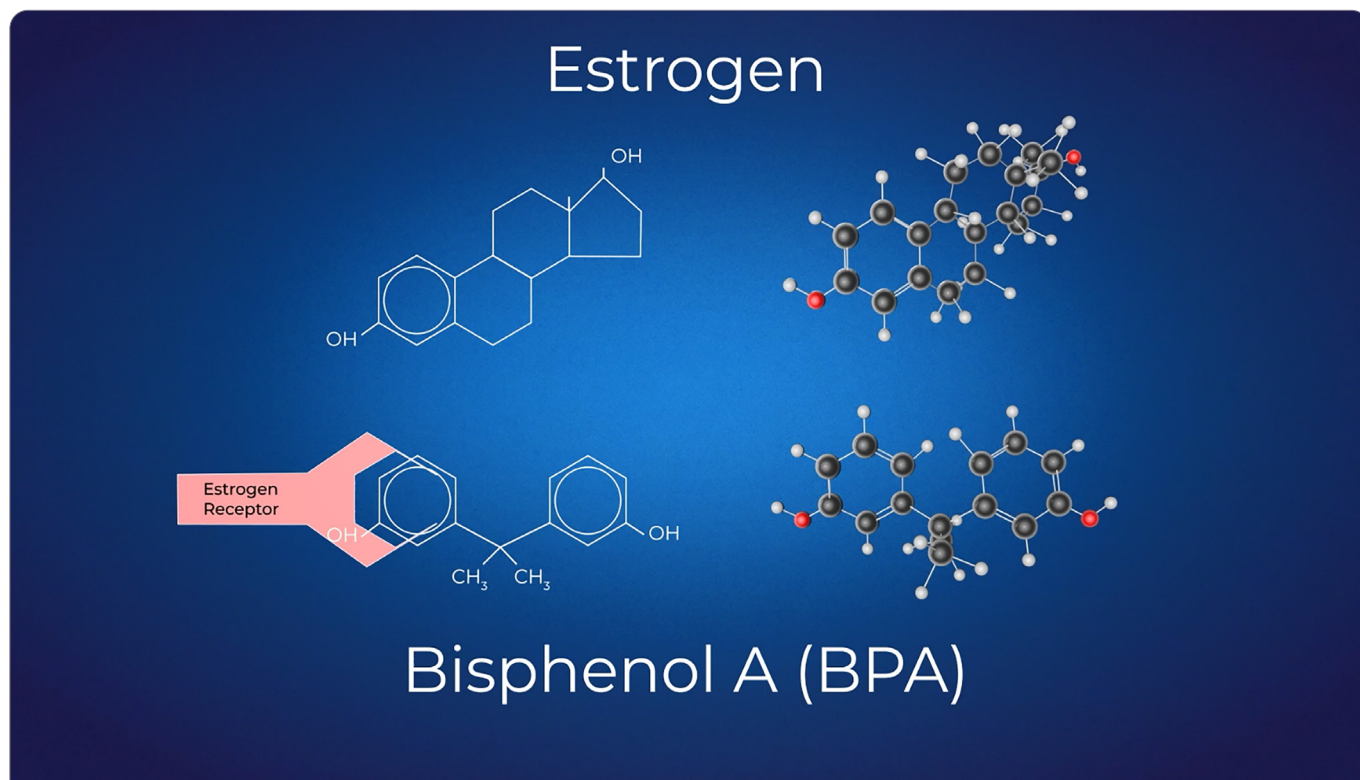


Рисунок 75. Бісфенол А ($C_{15}H_{16}O_2$) чинить руйнівний вплив на ендокринну систему через його структурну схожість із гормоном естрогеном

Щороку в усьому світі виробляється 8 мільйонів тонн бісфенолу А і 100 тонн щорічно викидаються в біосферу¹⁹⁸.

Дослідження демонструють, що BPA і його заміна — бісфенол S (BPS) — порушують координацію збуджувальних і гальмівних сигналів у нервовій системі¹⁹⁹. Обидві сполуки у високих концентраціях індукують подібні патологічні ефекти (рис. 76). Експерименти з клітинами мозку виявили, що навіть низькі дози BPA/BPS під час пливу протягом місяця змінюють хімічну та електричну передачу сигналів через синапси²⁰⁰.

¹⁹⁷New Atlas. Autism in boys linked to common plastic exposure in the womb. (2024) <https://newatlas.com/health-wellbeing/prenatal-bisphenol-a-bpa-autism-boys> (Дата доступу: 01.05.2025).

¹⁹⁸Global Industry Analysts. Bisphenol A: Global strategic business report. Research and Markets. (2025) https://www.researchandmarkets.com/reports/1227819/bisphenol_a_global_strategic_business_report (Дата доступу: 01.05.2025).

¹⁹⁹Glausiusz, J. Toxicology: The plastics puzzle. Nature 508, 306–308 (2014). <https://doi.org/10.1038/508306a>

²⁰⁰News-Medical. Plasticizers can impair important brain functions in humans. (2021) <https://www.news-medical.net/news/20210412/Plasticizers-can-impair-important-brain-functions-in-humans.aspx> (Дата доступу: 01.05.2025).

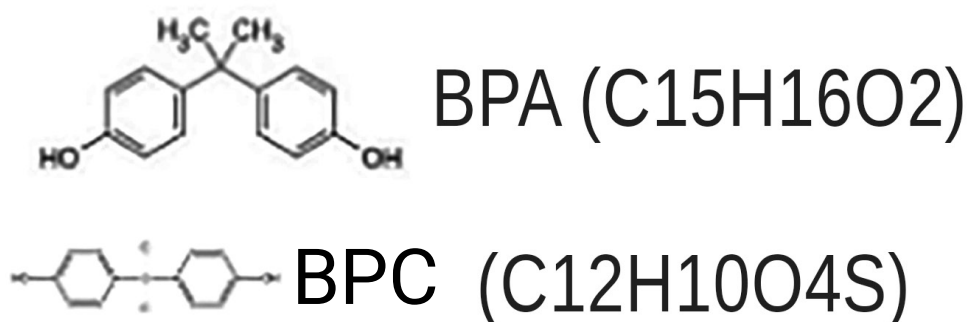


Рисунок 76. Молекулярні структури й хімічні формули бісфенолу А (BPA) та бісфенолу S (BPS)

2023 року під час дослідження було виявлено, що у дітей із синдромом дефіциту уваги та гіперактивності були вищі рівні бісфенолу А і фталату порівняно з дітьми, які не мають цього стану²⁰¹.

Вчені з Інституту неврології та психічного здоров'я Флорі в Мельбурні виявили шестикратне збільшення ризику аутизму до віку 11 років у хлопчиків, чії матері мали високий рівень BPA на пізніх термінах вагітності²⁰².

66

«BPA може порушити гормонально-контрольований розвиток мозку плода чоловічої статі кількома способами, включно з придушенням ключового ферменту ароматази, що контролює нейrogормони та є особливо важливим для розвитку мозку плода чоловічої статі», — сказала професор Понсонбі.

«Схоже, це частина головоломки аутизму»¹⁹⁷.

Пригнічення ферменту ароматази може пояснити статеву диспропорцію при аутизмі: 4–5 хлопчиків на 1 дівчинку²⁰³. Дівчатка на аутизм хворіють рідше, але при цьому вони переносять його у важчій формі²⁰⁴.

Бісфенол А (BPA) також сприяє розвитку діабету 2-го типу, викликаючи гіперглікемію та інсулінорезистентність²⁰⁵. Глобальна смертність від цукрового діабету продовжує неухильно зростати (рис. 77).

²⁰¹EarthDay.org. Babies vs. Plastics Report. (2023) <https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know> (Дата доступу: 01.05.2025)

²⁰²Symeonides, C., Vacy, K., Thomson, S. et al. Male autism spectrum disorder is linked to brain aromatase disruption by prenatal BPA in multimodal investigations and 10HDA ameliorates the related mouse phenotype. Nat Commun 15, 6367 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48897-8>

²⁰³Zeidan, J. et al. Global prevalence of autism: A systematic review update. Autism Research 15, 778–790 (2022). <https://doi.org/10.1002/aur.2696>

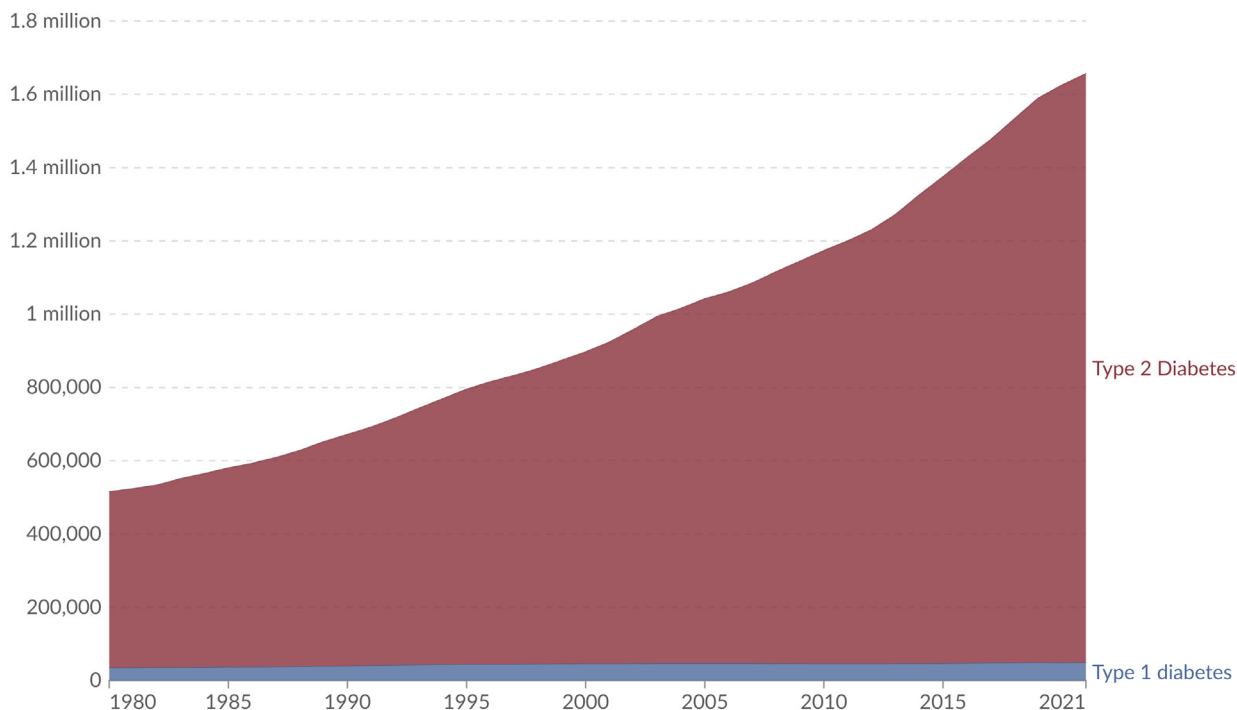
²⁰⁴Frazier, T. W., Georgiades, S., Bishop, S. L. & Hardan, A. Y. Behavioral and Cognitive Characteristics of Females and Males With Autism in the Simons Simplex Collection. Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry 53, 329–340.e3 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2013.12.004>

²⁰⁵Sun, Q. et al. Association of Urinary Concentrations of Bisphenol A and Phthalate Metabolites with Risk of Type 2 Diabetes: A Prospective Investigation in the Nurses' Health Study (NHS) and NHSII Cohorts. Environ Health Perspect 122, 616–623 (2014). <https://doi.org/10.1289/ehp.1307201>

Deaths from diabetes, by type, World, 1980 to 2021

Our World
in Data

Annual deaths from diabetes. Type 1 diabetes is an autoimmune disease, where cells making insulin are destroyed; Type 2 diabetes is insulin resistance. Both types lead to high levels of glucose in blood.



Data source: IHME, Global Burden of Disease (2024)

OurWorldinData.org/causes-of-death | CC BY

Рисунок 77. Смертність від цукрового діабету за типом у світі. 1980–2021 рр.

Джерело: <https://ourworldindata.org/grapher/deaths-from-diabetes-by-type>

Фталати

Фталати — це група хімічних сполук, що використовуються переважно як пластифікатори, тобто речовини, які роблять пластмаси, такі як полівінілхлорид (ПВХ), гнучкішими, м'якшими й довговічнішими.

Фталати широко застосовують у промисловості та побуті, але їхня здатність втручатися в роботу ендокринної системи викликає занепокоєння²⁰⁶.

Молекулярна формула (рис. 78). Фталати не є гормонами, але можуть пригнічувати дію андрогенів (наприклад, тестостерону), що особливо критично для чоловічого розвитку. За їхнього впливу спостерігається зменшення рухливості сперматозоїдів, аномалії розвитку статевих органів (наприклад, крипторхізм у новонароджених). У чоловіків, визнаних безплідними, виявлено вищу концентрацію фталатів.

²⁰⁶Arrigo, F., Impellitteri, F., Piccione, G. & Faggio, C. Phthalates and their effects on human health: Focus on erythrocytes and the reproductive system. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology 270, 109645 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2023.109645>

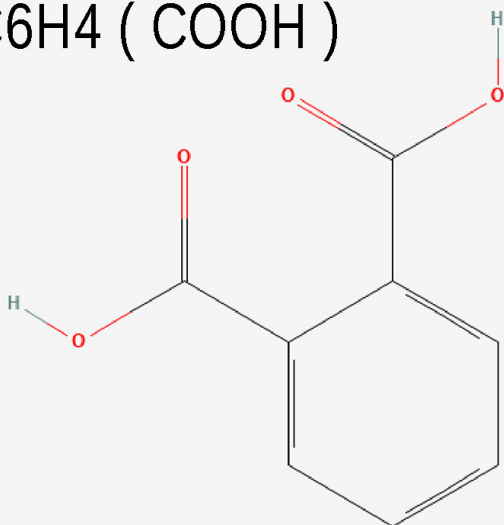
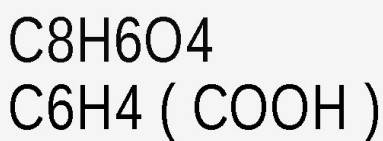


Рисунок 78. Зображення хімічної структури фталату.

Джерело: National Center for Biotechnology Information. Bisphenol A, 2D Structure. PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1017#section=2D-Structure> (Дата доступу: 01.05.2025).

У жінок порушується менструальний цикл, збільшується ризик викиднів і передчасних пологів. Вплив на плід під час вагітності може призвести до затримки розвитку мозку, зниження IQ та проблем із поведінкою²⁰⁷.

Науковці продемонстрували причинно-наслідковий зв'язок між фталатами довкілля (токсичні хімікати, що містяться в повсякденних споживчих товарах) та підвищеним ростом фіброміом матки — найпоширеніших пухлин серед жінок²⁰⁸.

Вплив фталатів, які містяться у пластику, підвищує ризик розвитку дитячих онкозахворювань на 20 %, із триразовим зростанням випадків злоякісних утворень кісток і дворазовим збільшенням захворюваності на лімфому²⁰⁹.

Дослідження за участю понад 5000 американських матерів показало, що фталати пов'язані з ризиком народження дітей із низькою вагою та раніше терміну²¹⁰. Ці фактори помірно підвищують імовірність смерті немовлят, а також можуть впливати на успішність дітей у навчанні та збільшувати ризик серцевих захворювань і діабету, а також психічних розладів, таких як аутизм і СДУГ²¹¹ у дітей.

²⁰⁷ Welch, B. M. et al. Associations Between Prenatal Urinary Biomarkers of Phthalate Exposure and Preterm Birth: A Pooled Study of 16 US Cohorts. *JAMA Pediatrics* 176, 895–905 (2022). <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2022.2252>

²⁰⁸ Iizuka, T. et al. Mono-(2-ethyl-5-hydroxyhexyl) phthalate promotes uterine leiomyoma cell survival through tryptophan-kynurenine-AHR pathway activation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119, e2208886119 (2022). <https://doi.org/10.1073/pnas.2208886119>

²⁰⁹ Ahern, T. P. et al. Medication-Associated Phthalate Exposure and Childhood Cancer Incidence. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute* 114, 885–894 (2022). <https://doi.org/10.1093/jnci/djac045>

²¹⁰ Trasande, L. et al. Prenatal phthalate exposure and adverse birth outcomes in the USA: a prospective analysis of births and estimates of attributable burden and costs. *The Lancet Planetary Health* Volume 8, Issue 2, e74–e85 (2024). [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00270-X](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00270-X)

²¹¹ Baker, B. H. et al. Ultra-processed and fast food consumption, exposure to phthalates during pregnancy, and socioeconomic disparities in phthalate exposures. *Environment International* 183, 108427 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108427>

Хімічні добавки у пластиках сприяють розвитку ожиріння²¹². Згідно з даними ВООЗ, у період 1990–2020 рр. в усьому світі рівень ожиріння серед дорослих збільшився більш ніж удвічі, а серед підлітків — учетверо²¹³.

Тенденції ожиріння серед дорослих і молоді у США (рис. 79, 80)

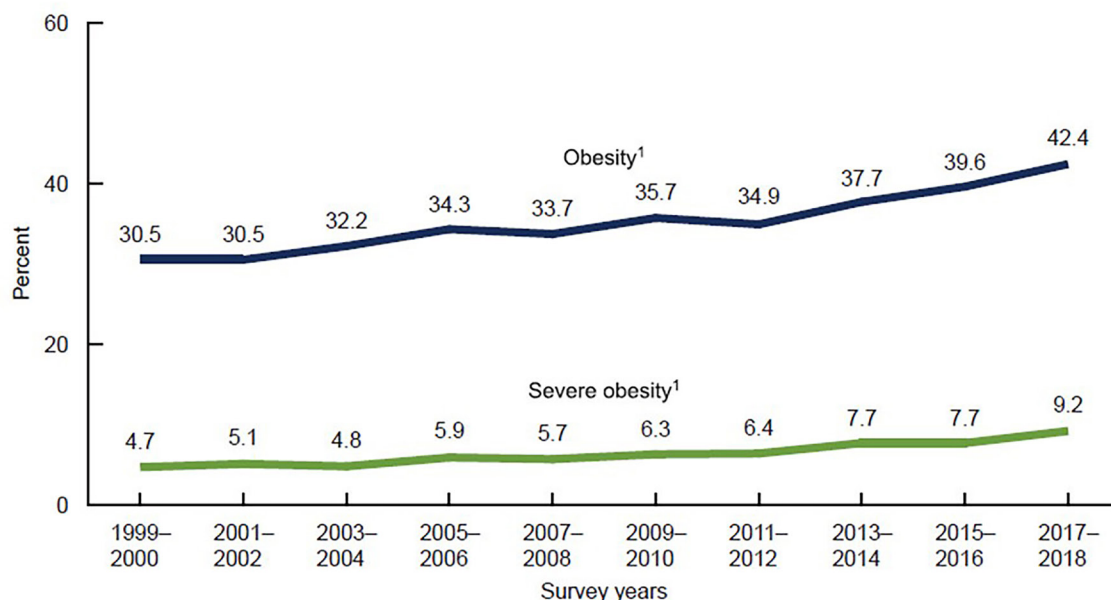


Рисунок 79. Тенденції поширеності ожиріння й тяжкої форми ожиріння серед дорослих віком 20 років і старше з поправкою на вік: Сполучені Штати, з 1999–2000 до 2017–2018 рр.

Джерело: National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. Overweight & obesity statistics. NIDDK. (2021) <https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity> (Дата доступу: 01.05.2025).

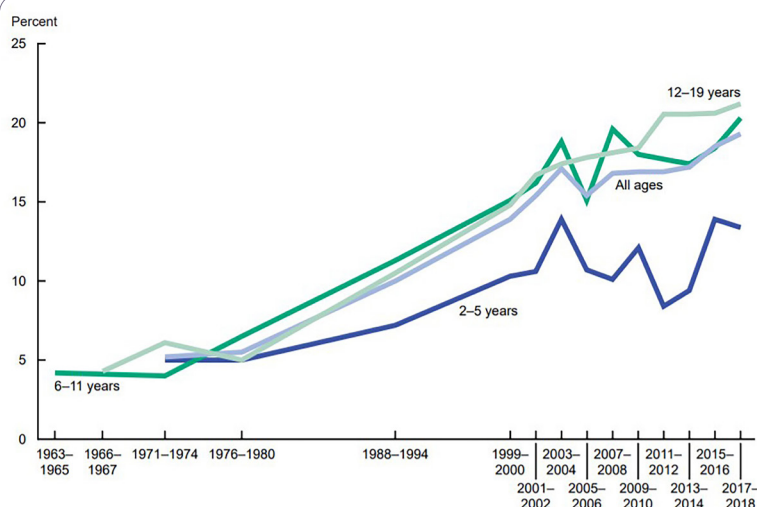


Рисунок 80. Тенденції ожиріння серед дітей і підлітків віком 2–19 років, за віком: США, з 1963–1965 до 2017–2018 рр.

Джерело: National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. Overweight & obesity statistics. NIDDK. (2021) <https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity> (Дата доступу: 01.05.2025)

²¹²Völker, J., Ashcroft, F., Vedø, Å., Zimmermann, L. & Wagner, M. Adipogenic Activity of Chemicals Used in Plastic Consumer Products. Environ. Sci. Technol. 56, 2487–2496 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06316>

²¹³World Health Organization. Obesity and overweight. WHO Fact Sheets. (2025) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight> (Дата доступу: 10.05.2025).

Електростатичний заряд нанопластику як ключовий фактор його підвищеної токсичності для організму людини

Організм людини постійно виробляє біоелектричну енергію. Усі фізіологічні процеси — від серцевої діяльності та сенсорного сприйняття до вищих когнітивних функцій — зумовлені хімічними реакціями, ініційованими переміщенням електричних зарядів. Внутрішньоклітинні та позаклітинні рідини, в яких містяться білки, складаються переважно з води, що має електрополярні властивості. У зв'язку з цим електростатичні взаємодії, зокрема водневі зв'язки, іонні зв'язки та гідрофобне пакування, відіграють ключову роль у формуванні структур клітинних білків, необхідних для їхнього функціонування і, як наслідок, для підтримання життєдіяльності організму²¹⁴.

Біоелектрика відіграє безпосередню роль у функціонуванні клітин через взаємодію іонних каналів і мембранних потенціалів. Кожна клітина підтримує різницю електричних потенціалів між своїм внутрішнім і зовнішнім середовищем — мембранний потенціал спокою, що забезпечується різницею в концентрації іонів усередині та зовні клітини (рис. 81). Основні типи іонних каналів, присутніх в організмі людини, включають натрієві, калієві, кальцієві та хлоридні канали. Ці канали, спільно з мембранним потенціалом, забезпечують ключові функції різних типів клітин (рис. 82, 83).

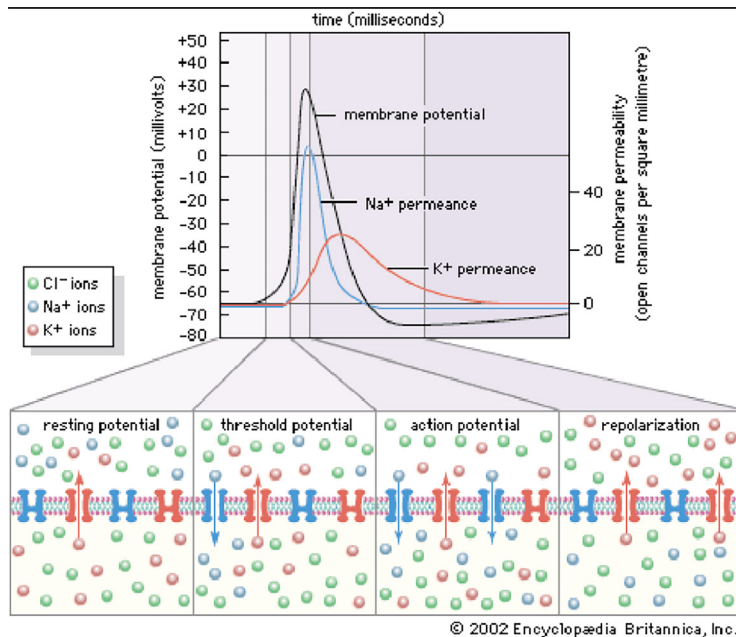


Рисунок 81. Іонна проникність і потенціал дії.

Зміни іонної проникності, що лежать в основі потенціалу дії. Електричний потенціал градується зліва в мілівольтах, іонна проникність — справа у відкритих каналах на квадратний міліметр. За потенціалу спокою мембранний потенціал близький до ЕК, рівноважного потенціалу К⁺. Коли натрієві канали відкриваються, мембрана деполяризується. Коли деполяризація досягає порогового потенціалу, вона запускає потенціал дії. Генерація потенціалу дії наближає мембранний потенціал до ЕNa, рівноважного потенціалу Na⁺. Коли натрієві канали закриваються, знижуючи проникність Na⁺, а калієві канали відкриваються, підвищуючи проникність К⁺, мембрана реполяризується.

Джерело: Encyclopædia Britannica, Inc.

<https://www.britannica.com/science/neuron>

(Дата доступу: 01.05.2025)

²¹⁴Azim Premji University. The Biology of Electricity: How electricity is critical to the functioning of the human body. (2022) <https://azimpremjiuniversity.edu.in/news/2022/the-biology-of-electricity> (Дата доступу: 01.05.2025).

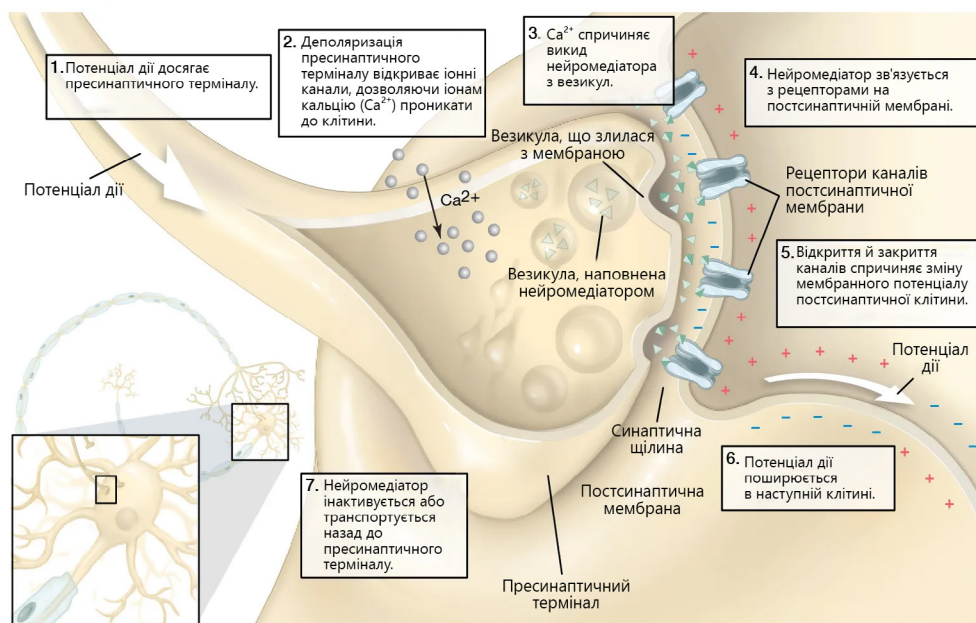


Рисунок 82. Синапс: Хімічна передача нервового імпульсу в синапсі.

Надходження нервового імпульсу до пресинаптичного закінчення стимулює вивільнення нейромедіаторів у синаптичну щілину. Зв'язування нейромедіаторів з рецепторами на постсинаптичній мембрані стимулює регенерацію потенціалу дії в постсинаптичному нейроні.

Джерело: Encyclopædia Britannica, Inc. <https://www.britannica.com/science/neuron> (Дата доступу: 01.05.2025)

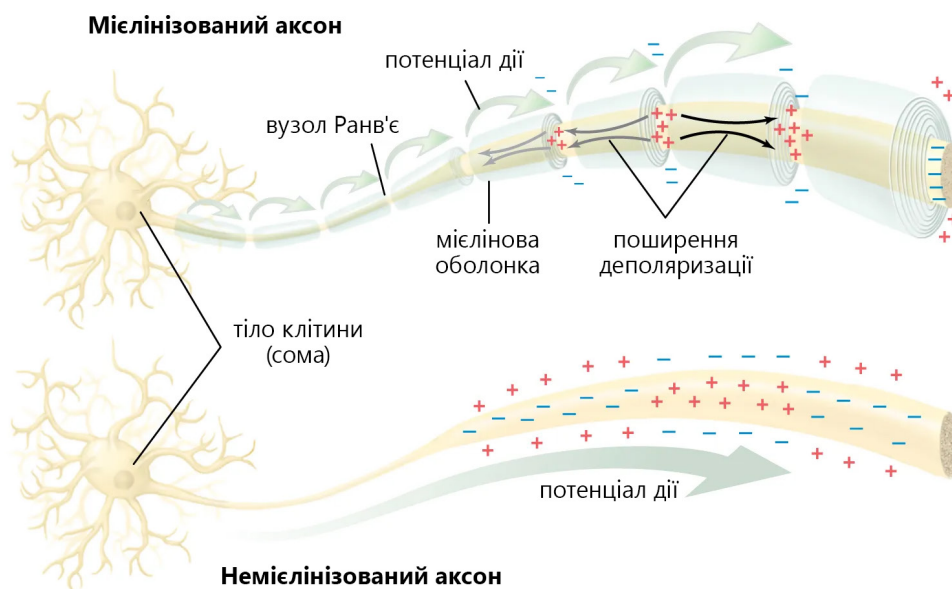


Рисунок 83. Нейрон: проведення потенціалу дії.

У мієлінізованому аксоні мієлінова оболонка перешкоджає локальному заряду (маленькі чорні стрілки) протікати через мембрану. Це змушує заряд переміщатися вниз по нервовому волокну до немієлінізованих вузлів Ранв'є, які мають високу концентрацію іонних каналів. При стимуляції ці іонні канали поширюють потенціал дії (великі зелені стрілки) до наступного вузла. Таким чином, потенціал дії стрибає вздовж волокна, оскільки він регенерується в кожному вузлі — це процес, який називають стрибкоподібною провідністю. У немієлінізованому аксоні потенціал дії поширюється вздовж усієї мембрани, затухаючи в міру того, як він дифундує назад через мембрану до вихідної деполаризованої ділянки.

Джерело: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025) <https://www.britannica.com/science/neuron> (Дата доступу: 01.05.2025)

Біоелектрика, що виникає в організмі людини (наприклад, під час роботи м'язів або передачі нервових імпульсів), не шкодить людині, бо є природною частиною фізіологічних процесів. Але мікро- й нанопластик, потрапляючи до організму, приносить із собою електростатичний заряд, який він здатний утримувати протягом тривалого часу. І саме цей заряд може нашкодити здоров'ю, втручаючись в усі біологічні процеси.

Нанопластик — це частинки пластику розміром менше 1 мікрометра, які завдяки своїй унікальній структурі мають здатність накопичувати електростатичні заряди, що робить їх об'єктом пильної уваги вчених.

Коли частинки мікро- й нанопластику електризуються внаслідок трибоелектричного ефекту (під час контакту й тертя з іншими поверхнями), вони набувають електростатичного заряду — позитивного або негативного. Цей заряд впливає на те, як частинки поведуться в організмі та навколишньому середовищі.

Унікальна структура частинок нанопластику дає їм змогу адсорбувати забруднювальні речовини, іони та органічні молекули, що посилює їхню роль як переносників токсинів в екосистемах^{215 216}.

Хімічний склад нанопластику відіграє ключову роль у формуванні його електростатичних властивостей: такі полімери, як полістирол (PS), поліетилен (PE) або поліпропілен (PP), часто містять функціональні групи — карбоксильні (-COOH), сульфатні (-SO₃H) або аміногрупи (-NH₂) — які можуть іонізуватися залежно від умов середовища. Наприклад, дослідження, опубліковане в журналі *Langmuir*, показало, що полістирольні наночастинки з карбоксильними групами (PS-COOH) мають негативний зета-потенціал, а з аміногрупами (PS-NH₂) — позитивний, що підтверджує вплив функціональних груп на заряд нанопластику²¹⁷.

Процес накопичення зарядів не обмежується лише хімічними властивостями. Під час виробництва або механічного впливу, такого як тертя, нанопластик може набувати заряду через контактну електризацію. Дослідження, проведене на пластикових контейнерах, виявило, що полістирол здатний накопичувати заряд до -10 кВ, який зберігається тривалий час і притягує протилежно заряджені частинки, зокрема пил або спори бактерій²¹⁸. Крім того, варіації в структурі полімеру — наприклад, наявність полярних груп — дають змогу нанопластику виявляти як позитивний, так і негативний заряд залежно від pH середовища. У кислому середовищі аміногрупи можуть надавати частинкам позитивний заряд, тоді як у лужному середовищі переважають негативні заряди за рахунок карбоксильних груп, що підтверджено дослідженнями на рослинах *Arabidopsis thaliana*²¹⁹.

²¹⁵Rai, P. K., Sonne, C., Brown, R. J. C., Younis, S. A. & Kim, K.-H. Adsorption of environmental contaminants on micro- and nano-scale plastic polymers and the influence of weathering processes on their adsorptive attributes. *Journal of Hazardous Materials* 427, 127903 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127903>

²¹⁶Zhang, W. et al. The mechanism for adsorption of Cr(VI) ions by PE microplastics in ternary system of natural water environment. *Environmental Pollution* 257, 113440 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113440>

²¹⁷Perini, D. A. et al. Surface-Functionalized Polystyrene Nanoparticles Alter the Transmembrane Potential via Ion-Selective Pores Maintaining Global Bilayer Integrity. *Langmuir* 38, 14837–14849 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c02487>

²¹⁸Baribo, L. E., Avens, J. S. & O'Neill, R. D. Effect of Electrostatic Charge on the Contamination of Plastic Food Containers by Airborne Bacterial Spores. *Applied Microbiology* 14, 905–913 (1966). <https://doi.org/10.1128/am.14.6.905-913.1966>

²¹⁹Sun, XD., Yuan, XZ., Jia, Y. et al. Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Nat. Nanotechnol.* 15, 755–760 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0707-4>

Таким чином, розуміння структури нанопластику та його електростатичних характеристик не лише розкриває його фізичну природу, але й закладає підґрунтя для аналізу того, як ці частинки можуть впливати на екосистеми та організми, що буде розглянуто далі в контексті їхніх патогенних механізмів.

Завдяки високій діелектричній проникності (здатності утримувати електричний заряд) нанопластик, потрапляючи всередину організму, продовжує накопичувати нові шкідливі заряди, які в нормі нейтралізуються або розсіюються через природні провідні системи організму. Це порушує процеси саморегуляції організму, створюючи ризик для клітинних структур через тривалий вплив аномальної електростатичної енергії.

Щоб оцінити масштаб загрози нанопластику, який потрапляє до організму, можна знову звернутися до біоелектричних систем організму — складних механізмів, де електричні імпульси слугують мовою міжклітинної комунікації.

Кожен рух і думка можливі завдяки невидимим сигналам, що передають команди клітинам. Нейрони обмінюються інформацією через електричні імпульси, м'язи скорочуються у відповідь на ці сигнали, а мозок обробляє дані через комбінацію біоелектричних і хімічних процесів. Навіть дихання, рефлекс, зір і слух залежать від крихітних електричних розрядів, що регулюють роботу органів.

Ці невидимі струми, відточені мільйонами років еволюції, перетворюють біоелектричні імпульси на мову життя. Але їхню гармонію порушують чужі елементи — мікроскопічні частинки нанопластику.

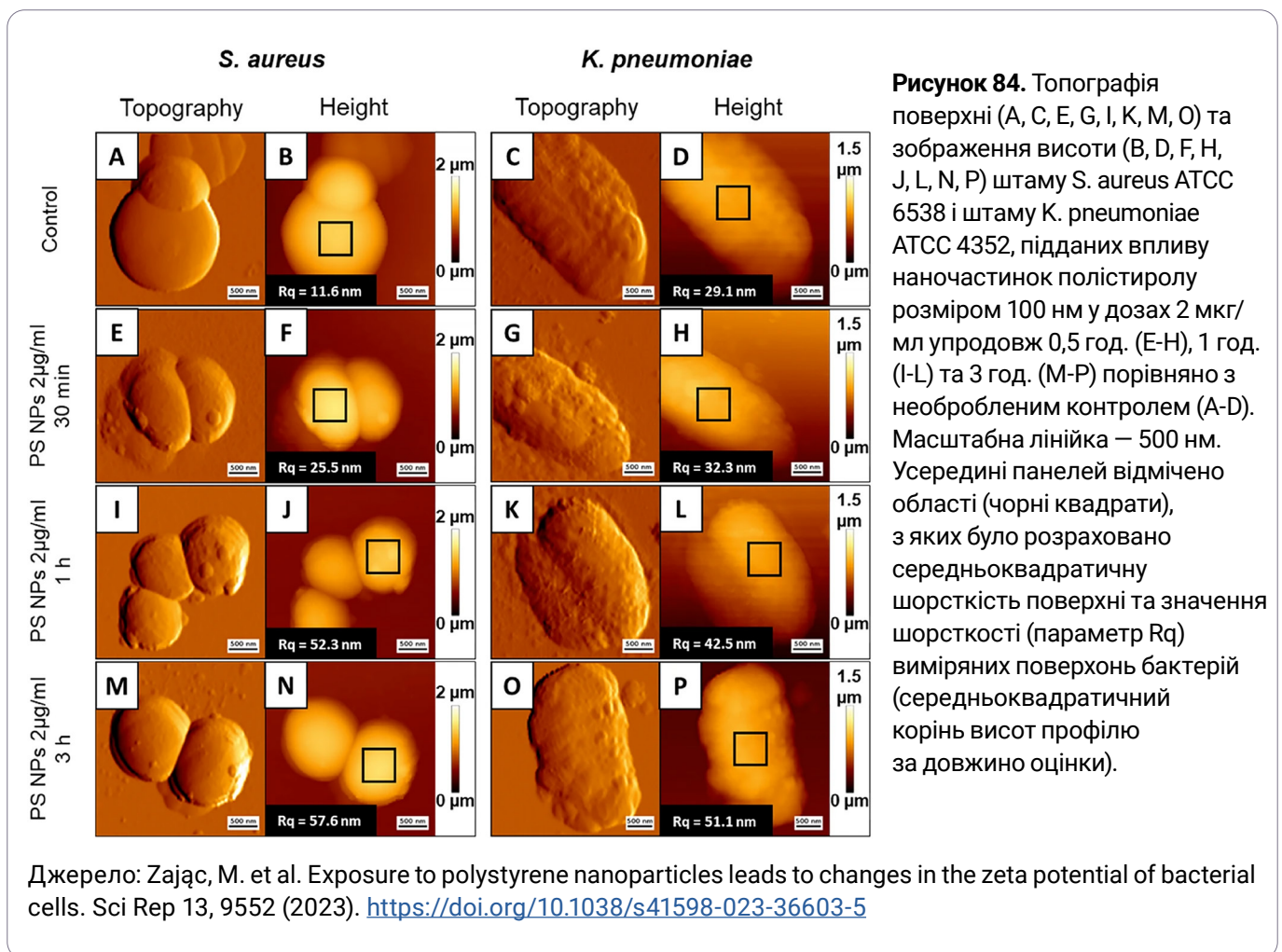
Потрапляючи до організму, нанопластик здатен адсорбувати іони та формувати зони з аномальною електропровідністю, порушуючи природний іонний баланс і процеси нейтралізації локальних зарядів, які регулюються міжклітинною рідиною. Адсорбція іонів на поверхні нанопластику призводить до накопичення електростатичного заряду на цих частинках. Це явище може провокувати окислювальний стрес за рахунок генерації активних форм кисню (АФК), а також порушувати електрохімічну комунікацію між клітинами, що негативно впливає на їхні функції.

Це підтверджується дослідженням²²⁰, де частинки полістиролу розміром 100 нм, навіть у присутності іонів натрію (Na^+), зберігали стабільність і адсорбувалися на поверхні бактерій, незважаючи на їхній негативний заряд. Наприклад, експерименти зі *Staphylococcus aureus* і *Klebsiella pneumoniae* показали, що нанопластик значно змінює зета-потенціал клітин, роблячи їхню поверхню більш негативною, що порушує природний електростатичний баланс.

²²⁰Zajac, M. et al. Exposure to polystyrene nanoparticles leads to changes in the zeta potential of bacterial cells. Sci Rep 13, 9552 (2023).
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-36603-5>

Заряджені частинки нанопластику можуть впливати на електричні поля навколо клітин, спотворюючи передачу сигналів. Це схоже на перешкоди в радіозв'язку: замість чітких команд — хаотичний шум, який заважає клітинам обмінюватися інформацією. Хоча прямий вплив на нервові клітини в дослідженні не вивчався, а висновки щодо впливу на людину мають попередній характер і потребують додаткових досліджень, але зміна поверхневого заряду бактерій вказує на те, що нанопластик здатний модифікувати електрохімічні властивості мембран. Наприклад, за концентрацій, вищих за 64 мікрограми на міліметр, частинки полістиролу спричиняли значні зрушення зета-потенціалу, що потенційно може порушувати роботу іонних каналів або рецепторів, критичних для міжклітинної комунікації.

Здатність наночастинок «прилипати» до поверхонь, як показали знімки атомно-силової мікроскопії у вищезгаданому дослідженні (рис. 84), створює ризик довготривалого впливу. Осідаючи в тканинах, частинки можуть формувати стійкі електростатичні аномалії, які іони натрію та калію не можуть повністю нейтралізувати, особливо якщо нанопластик проникає всередину клітин, минаючи захисні механізми міжклітинної рідини.



Також небезпека патогенного заряду, накопиченого на нанопластику, полягає в тому, що він може створювати навколо імунних клітин електричні перешкоди, що підтверджується дослідженням²²¹, де показано, що позитивно заряджений нанопластик (PS-NH₂) значно знижує життєздатність імунних клітин і стабільність лізосомальних мембран порівняно до негативно зарядженого нанопластику (PS-COOH), що вказує на важливість заряду в його взаємодії з клітинами.

Електростатично заряджені частинки МНП мають підвищену здатність адсорбуватися на клітинних мембранах, тканинах та інших біологічних поверхнях, буквально прилипаючи до них, що підвищує ризик механічних і хімічних ушкоджень клітин, порушуючи їхню структуру та функції.

Електростатичний заряд може полегшити проникнення частинок МНП через такі складні біологічні бар'єри, як гематоенцефалічний або гематоплацентарний. Як наслідок, токсини можуть досягати головного мозку або плода, що підвищує ризик нейротоксичних ефектів і порушень внутрішньоутробного розвитку.

Електростатичний вплив нанопластику може порушувати структуру й функціонування білків, іонних каналів, клітинних рецепторів, що, своєю чергою, спричинятиме збої в передачі сигналів між клітинами, запускати окислювальний стрес і послаблюватиме імунний захист організму.

Ці зміни можуть ініціювати каскад патологічних процесів, зокрема хронічне запалення, нейродегенеративні розлади, розвиток злоякісних пухлин і системну дисфункцію організму, істотно підвищуючи ризик важких захворювань.

Таким чином, накопичення електростатичного заряду на нанопластику — це не просто фізичне явище, а механізм, що посилює небезпеку МНП. Особливо з огляду на той факт, що на МНП електростатичний заряд здатний утримуватися дуже тривалий час, а самі частинки мікро- й нанопластику практично не виводяться з організму.

Вивчення цього феномену наразі є вкрай важливим, оскільки веде до розуміння того, як заряди патогенної електрики, накопичені на нанопластику, можуть стати макроскопічною загрозою для життя людського виду як такого.

Донедавна вважалося, що основа клітинної енергетики — перенесення протонів — визначається винятково хімією: протони нібито «перестрибують» від однієї молекули води до іншої. Однак нове дослідження, опубліковане в *Proceedings of the National Academy of Sciences*, радикально змінює це уявлення. Виявилось, що транспорт протонів у живих організмах залежить не лише від хімічних властивостей, а й від квантових — зокрема, від спіну електронів і хіральності біологічних молекул (рис. 85).

²²¹Murano, C., Bergami, E., Liberatori, G., Palumbo, A. & Corsi, I. Interplay Between Nanoplastics and the Immune System of the Mediterranean Sea Urchin *Paracentrotus lividus*. *Front. Mar. Sci.* 8, 647394 (2021). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.647394>

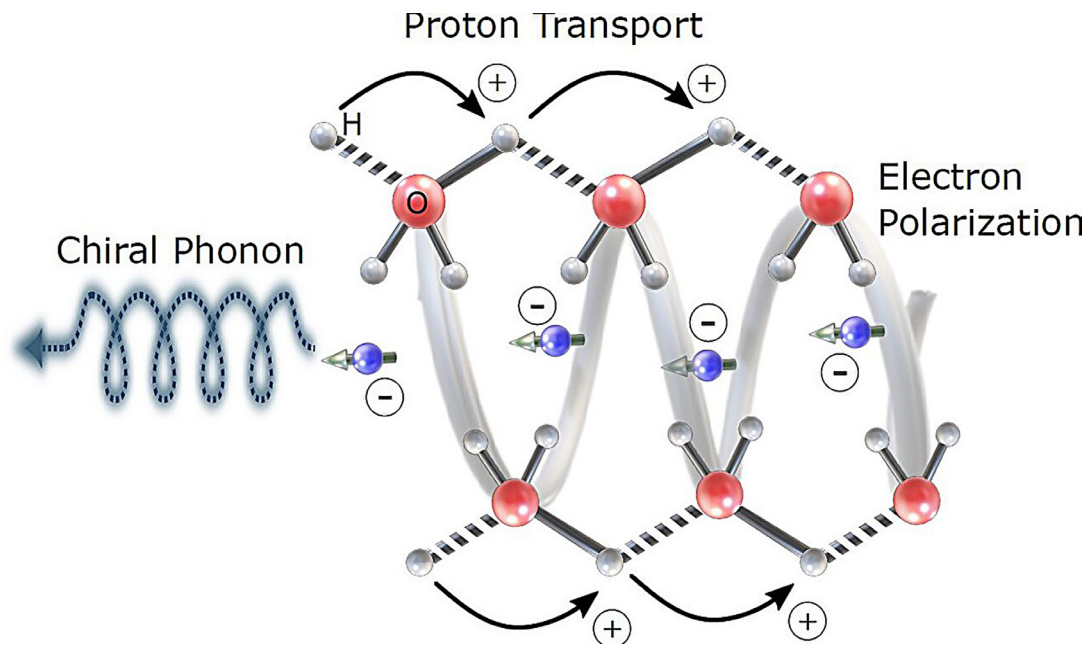


Рисунок 85. Схематична іграшкова модель.

Транспорт протонів супроводжується електронною поляризацією в хіральних середовищах. Через ефект CISS ця електрична поляризація продукує спінову поляризацію. Збереження кутового моменту генерує хіральні фонони, які посилюють перенесення протонів.

Джерело: Goren, N. et al. Coupling between electrons' spin and proton transfer in chiral biological crystals. PNAS 122, e2500584122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2500584122>

Дослідження, проведене ізраїльськими вченими з Єврейського університету, продемонструвало: у білках, таких як лізоцим, перенесення протонів істотно прискорюється при введенні електронів із «правильним» спіном і, навпаки, сповільнюється за протилежного спіну. Це пов'язано з тим, що в живих системах протони та електрони поведуться як злагоджений квантовий механізм. Навіть мінімальні зміни в їхній спіновій орієнтації можуть вплинути на фундаментальні процеси — вироблення енергії, обмін речовин і регуляцію всередині клітини.



Як зазначив керівник дослідження Наам Горен: *«Наші результати показують, що спосіб переміщення протонів у біологічних системах стосується не лише хімії, але й квантової фізики»*. А отже, навіть найменші збої в електричному заряді або магнітній орієнтації здатні вплинути на метаболізм клітин, вироблення енергії та загальний стан здоров'я²²².

²²²[Phys.org](https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html). Quantum effects in proteins: How tiny particles coordinate energy transfer inside cells. (2025)
<https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html> (Дата доступу: 10.05.2025).

Системний вплив МНП на органи та функціональні системи людини

Після потрапляння до організму людини МНП з кровотоком проникає до всіх органів і тканин (рис. 86). Пластикові частинки було виявлено у крові людини, серцевій і кістковій тканині, мозку, плаценті, легенях, печінці та інших органах²²³.

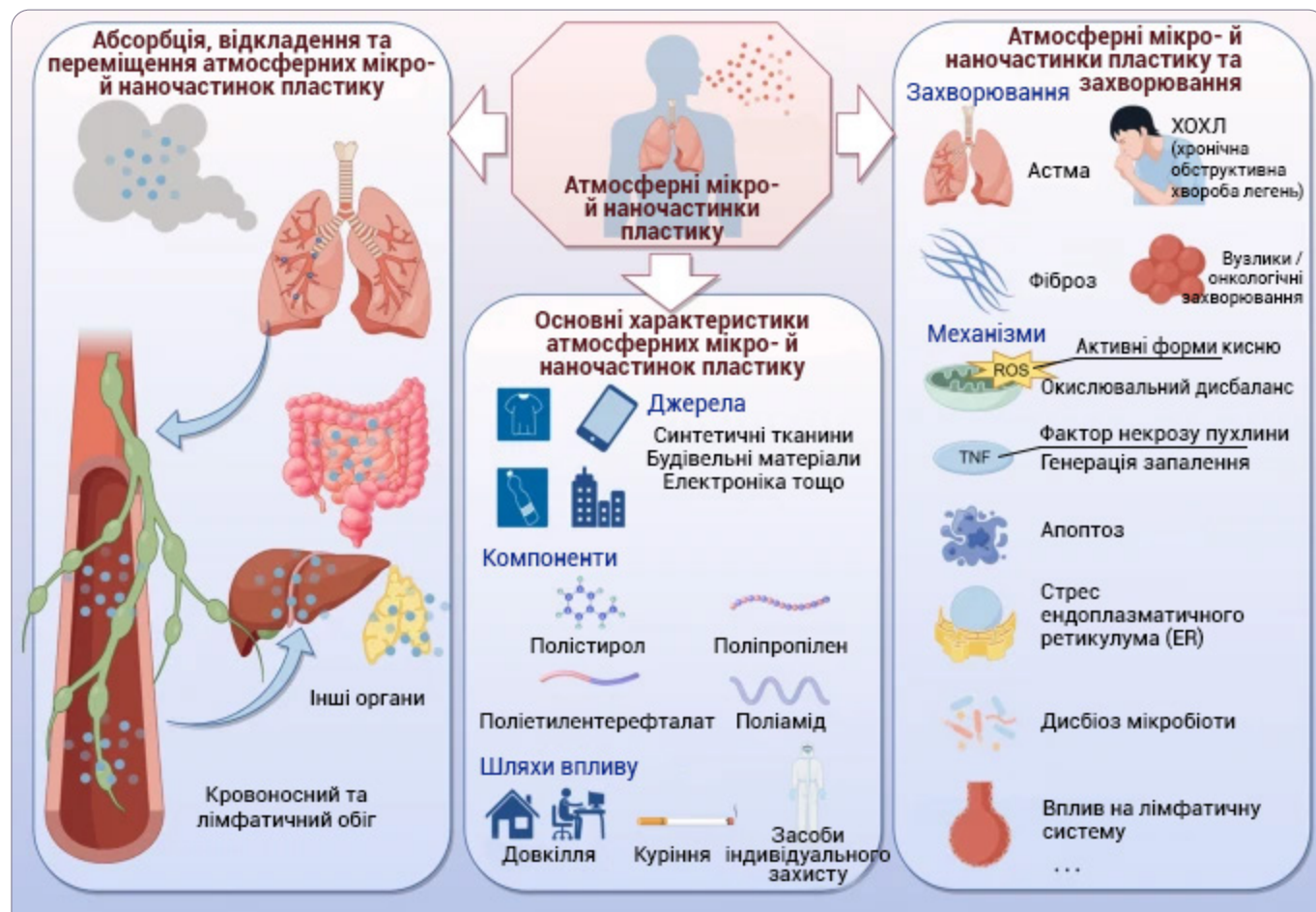


Рисунок 86. Потрапляння МНП до організму людини з диханням і його токсичні ефекти.

Джерело: Gou, Z., Wu, H., Li, S., Liu, Z. & Zhang, Y. Airborne micro and nanoplastics: emerging causes of respiratory diseases. Particle and Fibre Toxicology 21, 50 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00613-6>

²²³Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. iScience 26, 106061 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>

Механізми ураження дихальної системи при вдиханні МНП

Один з основних шляхів потрапляння МНП до організму людини — це дихання. Результати дослідження китайських учених²²⁴ показали, що за дві години активного проведення часу на відкритому повітрі дорослі вдихають близько 106 000 частинок мікропластику, а діти — близько 73 700.

Частинки з розміром менше 0,1 мкм, завдяки своїм термодинамічним властивостям, можуть ефективно осідати по всьому дихальному шляху (від верхніх дихальних шляхів до альвеол)²²⁵.

Легені мають велику альвеолярну поверхню (близько 150 м²) і тонкий тканинний бар'єр (менш як 1 мкм), що дає змогу НП легко проникати до кровотоку (рис. 87).

У 13 із 20 зразків легеневої тканини людини виявлено мікропластик²²⁶.

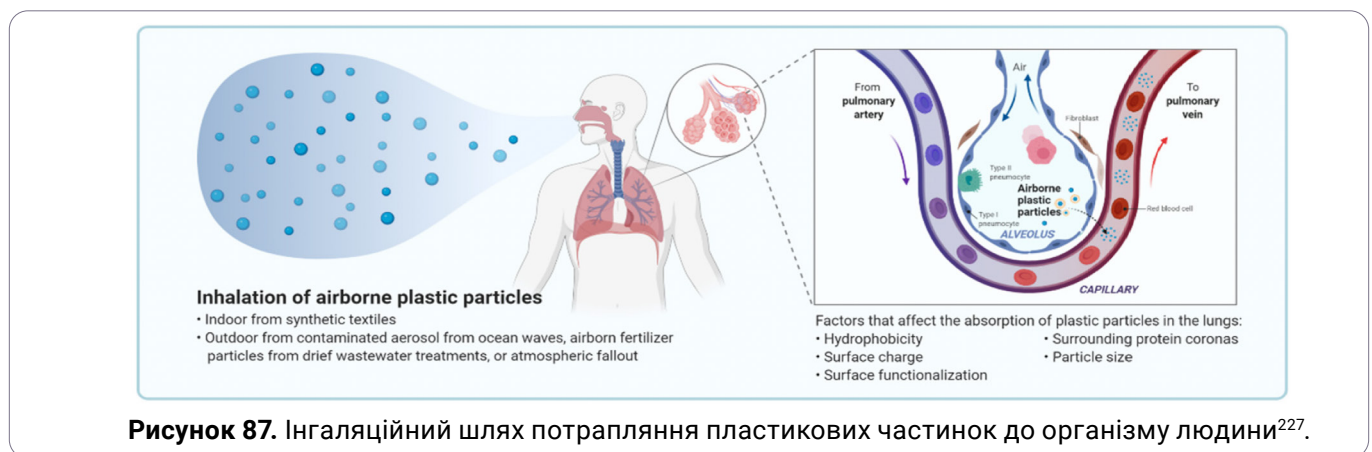


Рисунок 87. Інгаляційний шлях потрапляння пластикових частинок до організму людини²²⁷.

За даними дослідження у 22 пацієнтів із захворюваннями легень, в усіх зразках мокротиння виявлено мікропластик²²⁸: від 18,75 до 91,75 часток/10 мл²²⁹. Також встановлено зв'язок між алергічним ринітом і мікропластиком²³⁰.

МНП тісно пов'язаний із виникненням і розвитком різних респіраторних захворювань, зокрема астми, фіброзу легень, хронічних обструктивних хвороб легень і пухлин²²⁹. Дослідження показало, що 97 % зразків злоякісних пухлин легень містили волокна мікропластику²³¹.

²²⁴Peking University Center for Environmental Science and Engineering. Prof. Yi Huang's team made new progress in atmospheric microplastic distribution and its human health risk. CESE. (2022) <https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm> (Дата доступу: 01.05.2025).

²²⁵Gou, Z., Wu, H., Li, S., Liu, Z. & Zhang, Y. Airborne micro- and nanoplastics: emerging causes of respiratory diseases. Particle and Fibre Toxicology 21, 50 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00613-6>

²²⁶Amato-Lourenço, L. F. et al. Presence of airborne microplastics in human lung tissue. Journal of Hazardous Materials 416, 126124 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126124>

²²⁷Yee, M. S.-L. et al. Impact of Microplastics and Nanoplastics on Human Health. Nanomaterials 11, 496 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11020496>

²²⁸Huang, S. et al. Detection and Analysis of Microplastics in Human Sputum. Environ. Sci. Technol. 56, 2476–2486 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03859>

²²⁹Xu, M. et al. Internalization and toxicity: A preliminary study of effects of nanoplastic particles on human lung epithelial cell. Science of The Total Environment 694, 133794 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133794>

²³⁰Tuna, A., Taş, B. M., Başaran Kankılıç, G. et al. Detection of microplastics in patients with allergic rhinitis. Eur Arch Otorhinolaryngol 280, 5363–5367 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00405-023-08105-7>

²³¹Dris, R. et al. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. Environmental Pollution 221, 453–458 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>

Можливі механізми містять окислювальний стрес, запалення та дисбаланс мікробіоти легенів. МНП можуть призводити до виникнення запалення легенів²³².

Згідно зі звітом ВООЗ, наразі інфекції нижніх дихальних шляхів залишаються найсмертоноснішим інфекційним захворюванням у світі та посідають п'яте місце серед усіх причин смерті²³³. А кількість смертей від раку трахеї, бронхів і легенів зросла й посідає шосте місце серед провідних причин смертності.

Нейротоксична дія МНП.

Ураження центральної та периферичної нервової системи

Дослідження підтверджують, що неврологічні розлади є основною причиною фізичної та когнітивної інвалідності в усьому світі: наразі вони зачіпають близько 3,4 млрд. осіб. Абсолютна кількість пацієнтів значно зросла за останні 30 років²³⁴. На додаток очікується, що тягар хронічних нейродегенеративних захворювань як мінімум подвоїться протягом наступних двох десятиліть. Згідно з даними ВООЗ, кожна восьма людина у світі страждає на психічний розлад²³⁵.

Захворюваність на біполярний розлад серед підлітків і молодих людей в усьому світі збільшилася з 79,21 на 100 000 населення в 1990 році до 84,97 на 100 000 населення в 2019 році²³⁶. За останні три десятиліття спостерігалось зростання захворюваності як серед чоловіків, так і серед жінок (рис. 88).

Дослідження показують збільшення психічних розладів серед дітей і підлітків в останні роки. Згідно зі звітом 2022 року про національну якість і відмінності в охороні здоров'я, з 2016 до 2019 року кількість звернень до відділень невідкладної допомоги з причин, пов'язаних із психічним здоров'ям, серед дітей 0–17 років зросла з 784,1 до 869,3 на 100 000. Крім того, з 2008 до 2020 року рівень смертності від суїцидів серед осіб 12 років і старше збільшився на 16 % — з 14,0 до 16,3 на 100 000²³⁷.

За даними звіту медичної страхової компанії Blue Cross Blue Shield, з 2013 року кількість діагнозів клінічної депресії, також відомої як велика депресія, зросла на 33 %. Деякі джерела вже починають прогнозувати, що до 2030 року депресія стане основною причиною втрати довголіття або життя. Жінки й чоловіки, які страждають на депресію, в середньому можуть втратити до 9,6 років здорового життя, йдеться у звіті²³⁸.

²³²Bengalli, R. et al. Characterization of microparticles derived from waste plastics and their bio-interaction with human lung A549 cells. *Journal of Applied Toxicology* 42, 2030–2044 (2022). <https://doi.org/10.1002/jat.4372>

²³³World Health Organization. The top 10 causes of death. WHO Fact Sheets. (2024) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death> (Дата доступу: 01.05.2025).

²³⁴Van Schependom, J. & D'haeseleer, M. Advances in Neurodegenerative Diseases. *Journal of Clinical Medicine* 12, 1709 (2023). <https://doi.org/10.3390/jcm12051709>

²³⁵World Health Organization. Mental disorders. WHO Fact Sheets. (2022) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders> (Дата доступу: 01.05.2025).

²³⁶Zhong, Y. et al. Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019. *Gen Psych* 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>

²³⁷U.S. Department Of Health And Human Services. 2022 National Healthcare Quality and Disparities Report. Rockville, MD: Agency for Healthcare Research and Quality. (2022) <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK587174> (Дата доступу: 01.05.2025).

²³⁸Lépine, J.-P. & Briley, M. The increasing burden of depression. *NDT* 7, 3–7 (2011). <https://doi.org/10.2147/NDT.S19617>

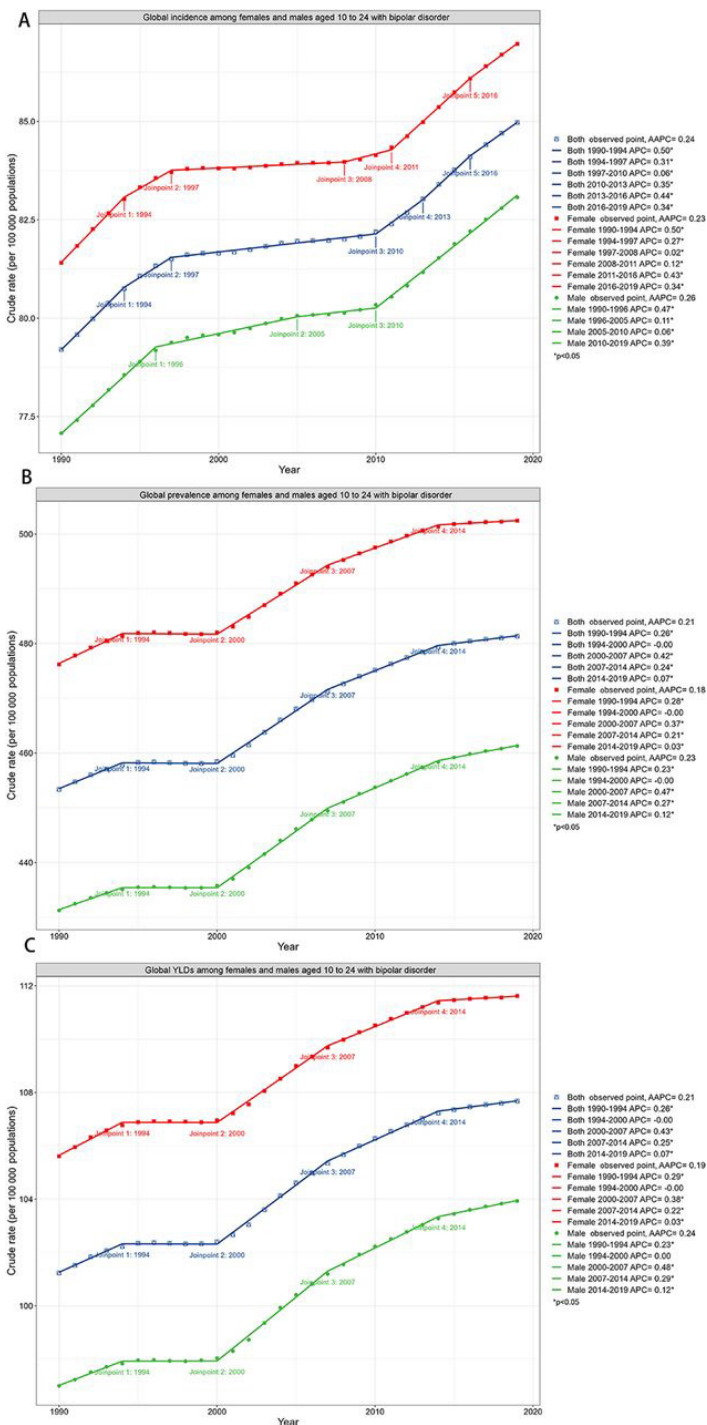


Рисунок 88.

Регресійний аналіз точок з'єднання глобальної захворюваності на біполярний розлад, поширеності та років, прожитих з інвалідністю (YLDs), серед усіх підлітків і молодих людей у віці 10–24 років з 1990 до 2019 року. * $p < 0,05$; AAPC – середньорічна відсоткова зміна; APC – річна відсоткова зміна; YLDs – роки, прожиті з інвалідністю.

Джерело: Zhong, Y. et al. Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019. *Gen Psych* 37, e101255 (2024).

<https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>

За останні десятиліття кількість діагнозів синдрому дефіциту уваги та гіперактивності (СДУГ) неухильно зростає. Національні опитування населення США відображають зростання поширеності з 6,1 % до 10,2 % за 20-річний період з 1997 до 2016 року²³⁹ (рис. 89).

Огляд 2023 року, який охопив 31 країну, виявив, що рівень грамотності та навичок рахування скорочується²⁴⁰ (рис. 90).

²³⁹Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. Twenty-Year Trends in Diagnosed Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Among US Children and Adolescents, 1997-2016. *JAMA Network Open* 1, e181471 (2018). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471>

²⁴⁰Organisation for Economic Co-operation and Development. Do adults have the skills they need to thrive in a changing world? OECD Publications. (2024) https://www.oecd.org/en/publications/do-adults-have-the-skills-they-need-to-thrive-in-a-changing-world_b263dc5d-en.html (Дата доступу: 01.05.2025).

Відсоток дітей із діагнозом СДУГ, який встановлено за повідомленням батьків

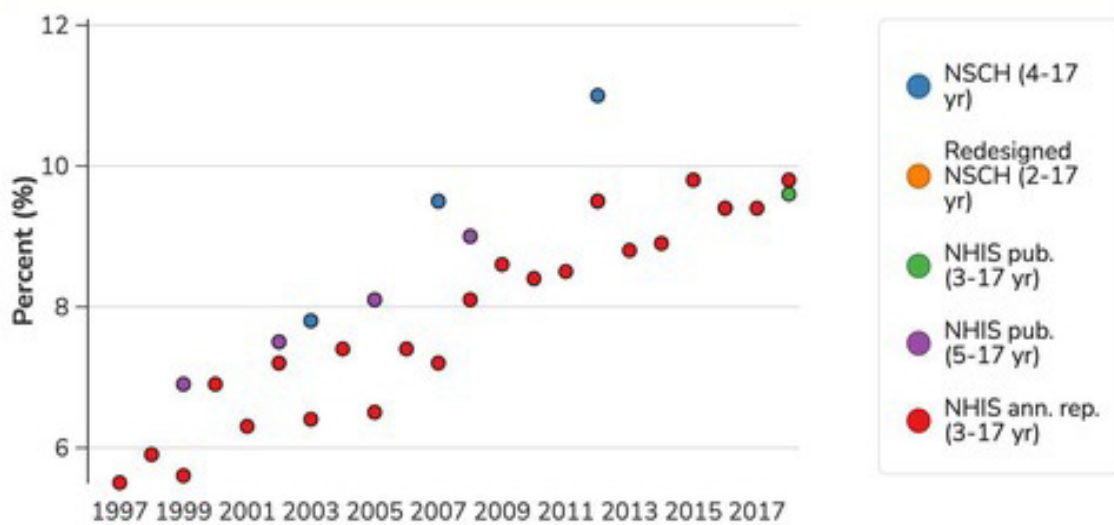
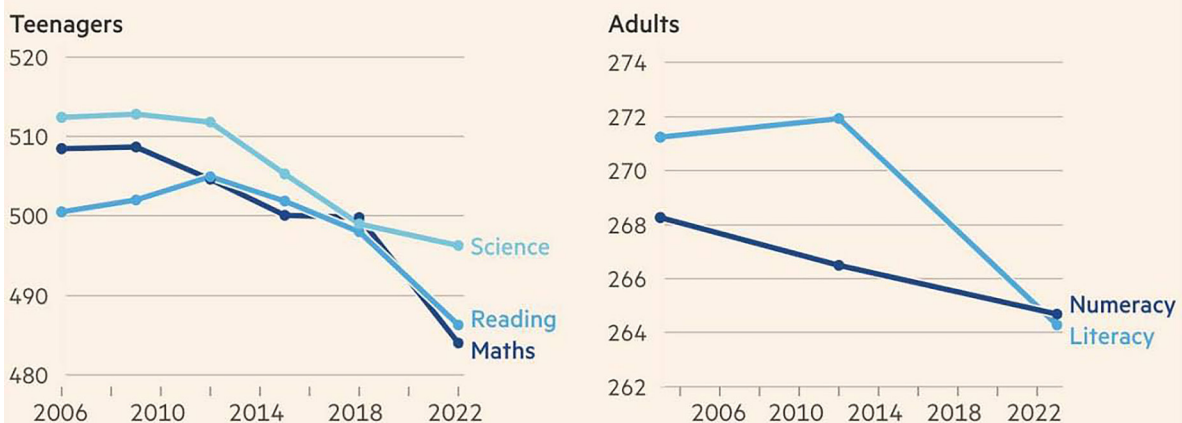


Рисунок 89. Графік зростання СДУГ, 1997–2016 рр.

Джерело: Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. Twenty-Year Trends in Diagnosed Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Among US Children and Adolescents, 1997–2016. JAMA Network Open 1, e181471 (2018). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471>

Performance in reasoning and problem-solving tests is declining

Average scores on assessments across different domains in high-income countries (teen and adult scores use different scales)



Source: OECD PISA, PIAAC and Adult Literacy and Lifeskills Survey
FT graphic: John Burn-Murdoch / @jburnmurdoch
©FT

Рисунок 90. Продуктивність у тестах на логіку та вирішення задач знижується.

Джерело: OECD PISA, PIAAC and Adult Literacy and Lifeskills Survey
FT graphic: John-Murdoch / @jburnmurdoch

Тенденції зростання нейродегенеративних і нейропсихічних захворювань явно корелюють із тенденцією збільшення обсягів пластику в навколишньому середовищі (рис. 96, 97).

Найвищі концентрації НП було виявлено в тканинах головного мозку людини — у 7–30 разів вищі, ніж концентрації в печінці або нирках, а зразки мозкової тканини людей, у яких було діагностовано деменцію, показали ще більшу наявність МНЧ — до 10 разів більшу, ніж у мозковій тканині людей без деменції²⁴¹ (рис. 91). Домінуючими частинками в мозку виявилися крихітні уламки або лусочки поліетилену — одного з найпопулярніших пластиків, що використовуються в упаковці.

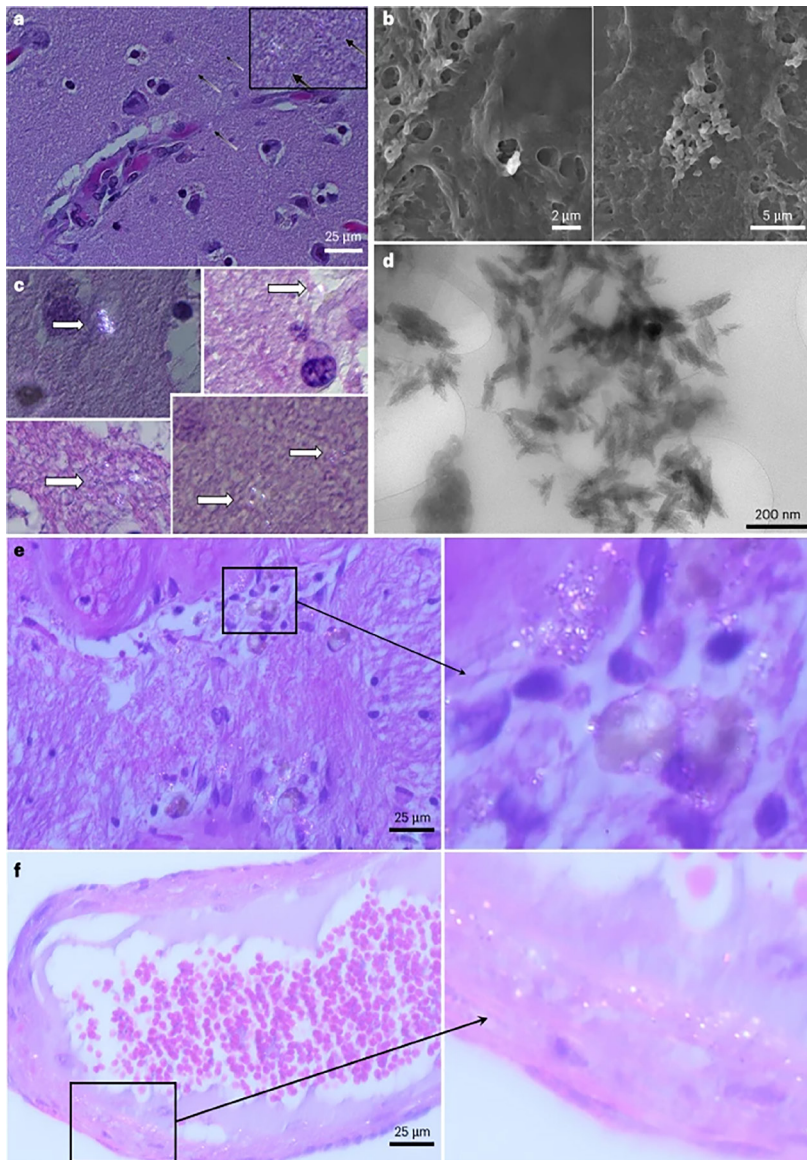


Рисунок 91.

Мікроскопія з поляризаційною хвилею (а — чорні стрілки вказують на тугоплавкі включення; вставка є цифровим збільшенням для наочності) та СЕМ (b — поля зору мають ширину 15,4 та 20,1 мкм) використовувалися для сканування зрізів мозку зі зразків померлих людей. c — великі (> 1 мкм) включення не спостерігалися; виділено додаткові приклади поляризаційної хвилі (білі стрілки вказують на субмікронні тугоплавкі включення). Обмеження роздільної здатності цих технологій призвели до використання ПЕМ для дослідження екстрактів із гранул, що використовуються для Py-GC/MS. d — приклад зображень ПЕМ дозволив виявити незліченні тверді частинки у вигляді уламків або лусочок після дисперсії, з розмірами здебільшого <200 нм завдовжки та <40 нм завширшки. e, f — мікроскопія з поляризаційною хвилею виявляє значно більшу кількість рефрактерних включень у випадках деменції, особливо в ділянках із супутнім накопиченням імунних клітин (e) та уздовж стінок судин (f). Всі зображення було отримано у невеликої підгрупи учасників (n = 10 для нормального мозку; n = 3 для випадків деменції) для надання візуальних доказів на підтримку аналітичної хімії.

Джерело: Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. Nat Med 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

²⁴¹Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. Nat Med 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

Нові дані підтверджують, що з 2016 до 2014 року, тобто за 8 років, вміст пластику в мозку збільшився на 50 %²⁴¹.



«У здорових людей віком від 45 до 50 років ми виявили в середньому 4900 мікрограмів пластикових частинок на грам мозкової тканини. (...) Ціла пластикова ложка. Приблизно стільки мікропластику знаходиться в нашому мозку. Це означає, що наш мозок сьогодні на 99,5 % складається з мозку, а решта — із пластику», — розповів провідний дослідник Метью Кемпен з Університету Нью-Мексико²⁴².

З огляду на прогресію вмісту пластикових частинок в атмосфері, воді та їжі, можна з упевненістю сказати, що кількість нанопластику в нашому організмі дедалі зростатиме. Якщо ця тенденція продовжиться, то через 4 роки рівень пластику в мозку збільшиться ще на 50 %.

МНП потрапляє до мозку через кров, долаючи гематоенцефалічний бар'єр (ГЕБ), і через вдих нюховими нервами (рис. 92).

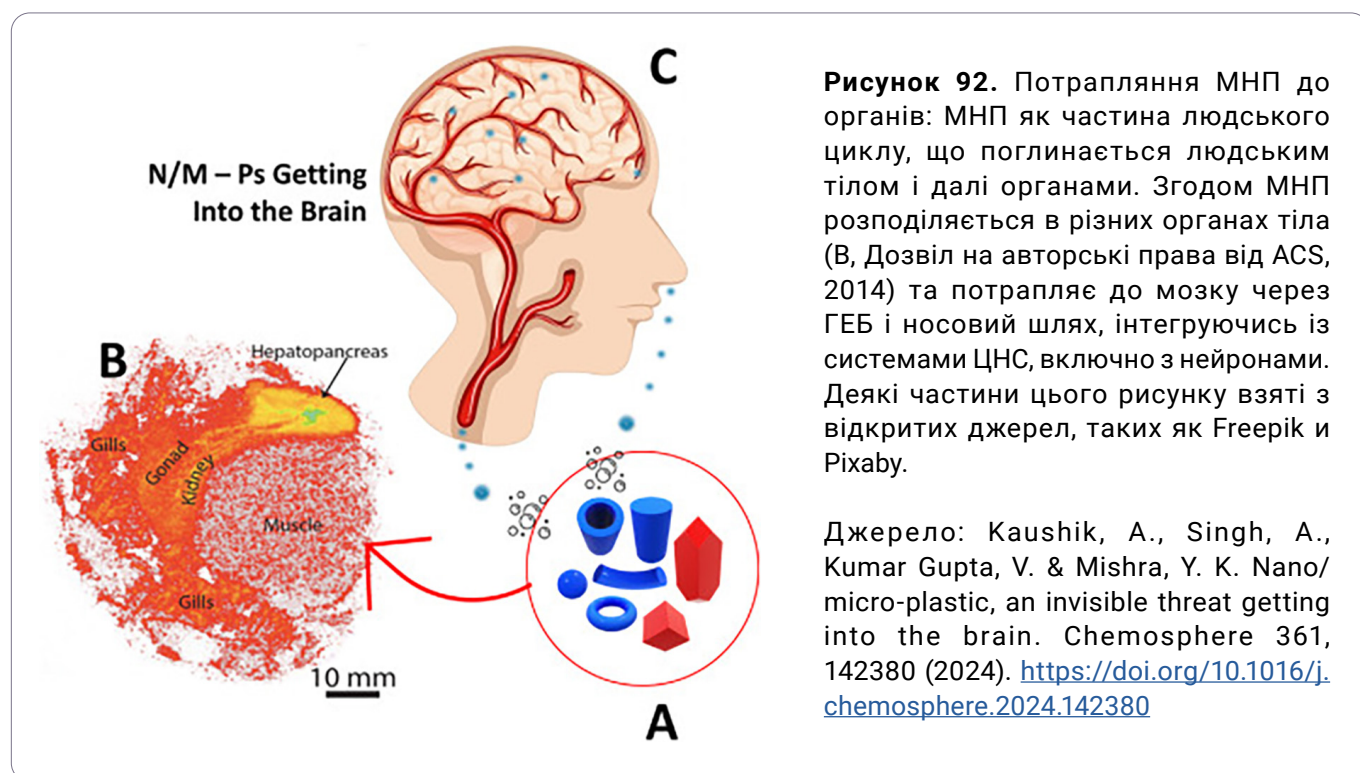


Рисунок 92. Потрапляння МНП до органів: МНП як частина людського циклу, що поглинається людським тілом і далі органами. Згодом МНП розподіляється в різних органах тіла (В, Дозвіл на авторські права від ACS, 2014) та потрапляє до мозку через ГЕБ і носовий шлях, інтегруючись із системами ЦНС, включно з нейронами. Деякі частини цього рисунку взяті з відкритих джерел, таких як Freepik и Pixaby.

Джерело: Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. Chemosphere 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

²⁴¹Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. Nat Med 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

²⁴²VRT NWS. Brain contains “full plastic spoonful” of microplastics. (2025) <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2025/02/04/microplastics-in-de-hersenen> (Дата доступу: 01.05.2025).

Гематоенцефалічний бар'єр є спеціалізованою фізіологічною системою, що регулює перенесення речовин із кровотоку до центральної нервової системи (рис. 93). Він вибірково пропускає поживні речовини та кисень, блокуючи проникнення токсинів і патогенів (рис. 94). Цей механізм забезпечує критичний захист головного мозку, підтримуючи гомеостаз нейронного середовища.

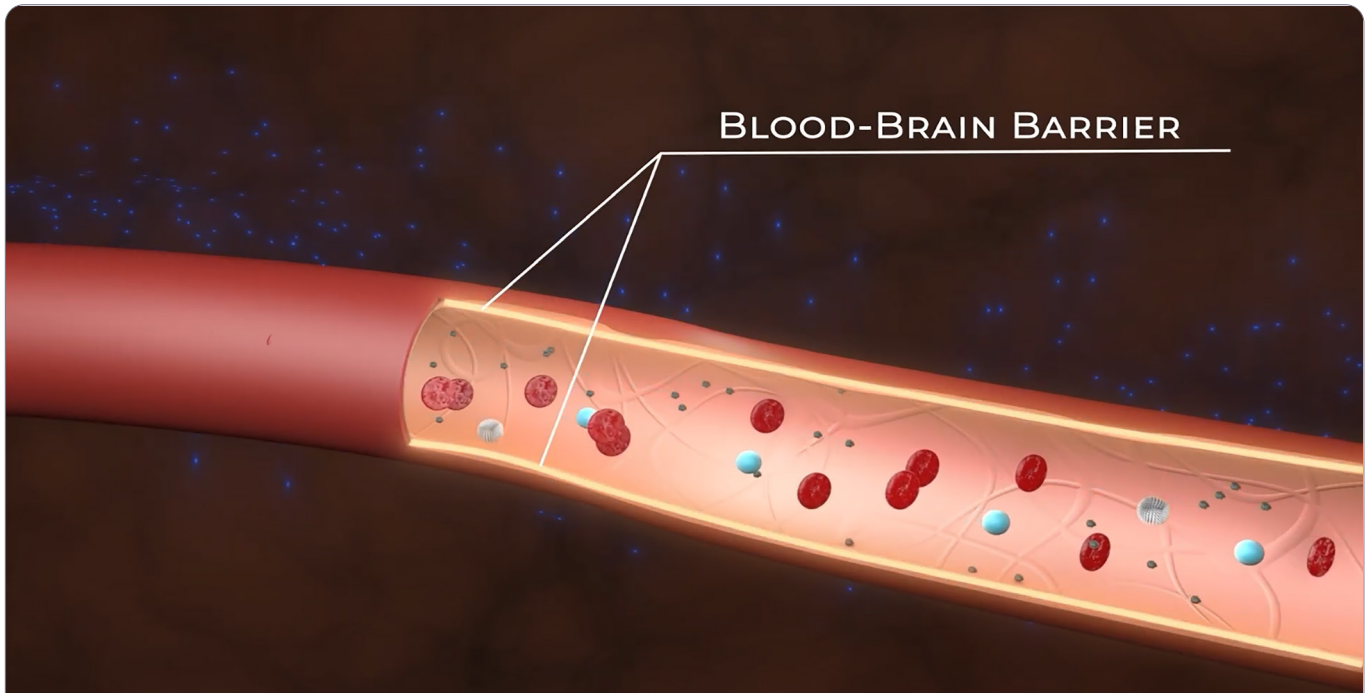


Рисунок 93. Схематичне зображення кровоносної судини головного мозку

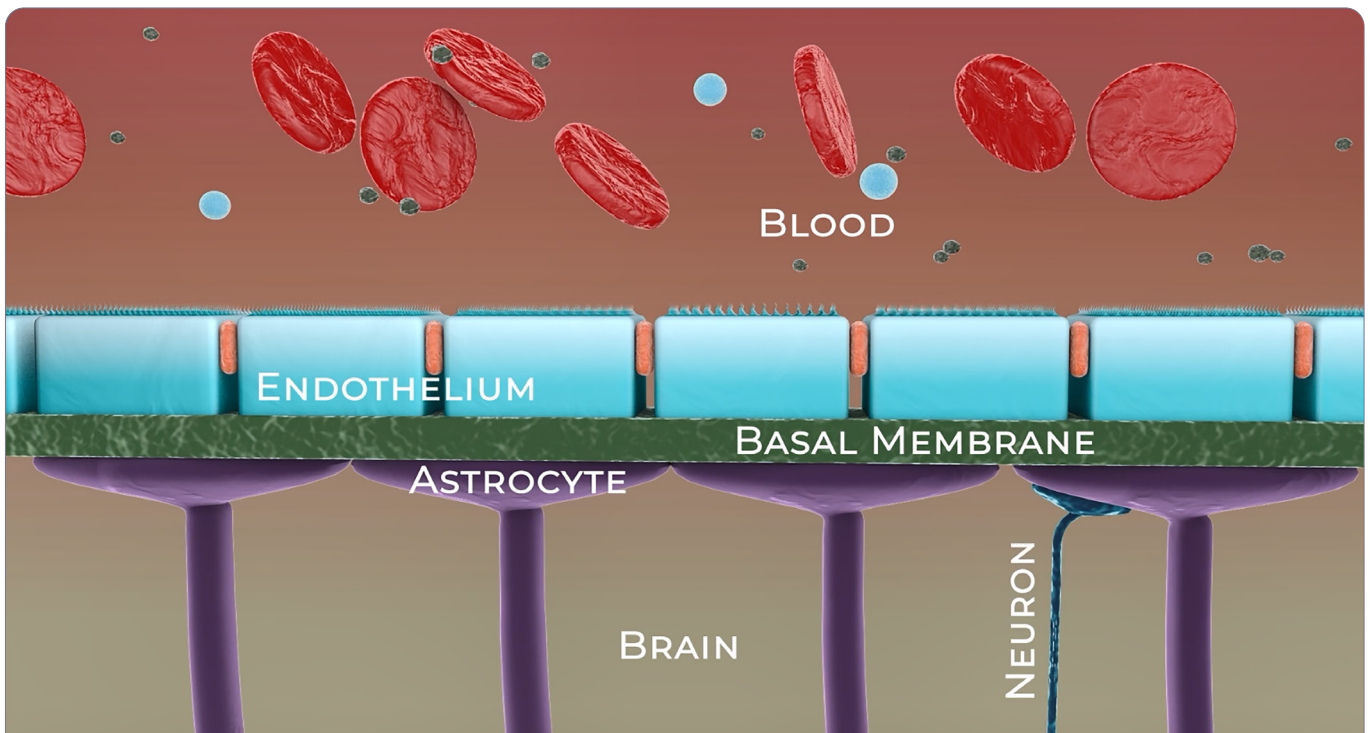


Рисунок 94. Схематичне зображення гематоенцефалічного бар'єру

Наночастинки пластику, завдяки своїм субмікронним розмірам і фізико-хімічним властивостям, проникають до мозку вже через 2 години після потрапляння в організм²⁴³.

Під час вдиху наночастинки пластику через нюхові нерви потрапляють прямо в ділянку мозку, що відповідає за сприйняття запахів²⁴⁴ (рис. 95). Як результат, вони проходять більш короткий і пряміший шлях до мозку, ніж до інших органів.



Рисунок 95. Проникнення НП через нюхові нерви в мозок

Проникнувши в мозок, нанопластик порушує роботу клітин мозку — нейронів. Виявлено, що поверхня наночастинок та їхній електричний заряд можуть суттєво впливати на взаємодію з нейронами та передачу нервових імпульсів.

Електростатичний заряд дає змогу нанопластику безперешкодно порушувати роботу кожної клітини організму людини, проникаючи до неї, спричиняючи окислювальний стрес і хронічне запалення, порушуючи роботу мітохондрій, аж до їхнього повного руйнування та загибелі самої клітини.

Дослідження²⁴⁵ показало, що негативно заряджені наночастинки здатні викликати деполяризацію мембрани нейронів, що призводить до зміни їхньої електричної активності.

²⁴³Kopatz, V. et al. Micro- and Nanoplastics Breach the Blood–Brain Barrier (BBB): Biomolecular Corona’s Role Revealed. *Nanomaterials* 13, 1404 (2023). <https://doi.org/10.3390/nano13081404>

²⁴⁴Amato-Lourenço, L. F. et al. Microplastics in the Olfactory Bulb of the Human Brain. *JAMA Netw Open* 7, e2440018 (2024). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.40018>

²⁴⁵Dante, S. et al. Selective Targeting of Neurons with Inorganic Nanoparticles: Revealing the Crucial Role of Nanoparticle Surface Charge. *ACS Nano* 11, 6630–6640 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.nano.7b00397>

У результаті експерименту було виявлено, що негативно заряджені частинки нанопластику вибірково зв'язувалися з нейронами, які беруть активну участь у передачі нервового імпульсу. Вони прилипали до тіл нейронів, аксонів, дендритів і синаптичних щілин, тоді як гліальні клітини, що не мають електричної активності, не вступали з ними у взаємодію.

Тобто, електрична активність нейронів є основним пусковим механізмом для зв'язування негативно зарядженого нанопластику з клітинною мембраною.

Згідно з дослідженнями, мікро- й нанопластик схильний накопичуватися в мієліновій оболонці мозку, багатій на ліпіди, що оточує нейрони та забезпечує проведення нервових сигналів²⁴⁶. Нанопластик провокує руйнування мієлінової оболонки аксонів^{247 248}, що порушує передачу нервових імпульсів між нейронами.

Вплив нанопластику на нейрони

Вплив нанопластику на нейрони може здійснюватися через такі точки прикладання:

1. Вплив на мембранний потенціал нейронів

Нейрони функціонують завдяки різниці потенціалів на мембрані (близько -70 мВ у стані спокою), що створюється завдяки іонним градієнтам (Na^+ , K^+ , Cl^- тощо) і активності іонних каналів. Якщо поруч із мембраною нейрона опиняється частинка нанопластику з електричним зарядом, вона може змінити електричне поле й дестабілізувати мембранний потенціал. Це може призвести до деполяризації або гіперполяризації, а в гіршому випадку — до спонтанної активації нейрона або блокування сигналу.

2. Електростатична взаємодія з іонними каналами

Іонні канали в мембрані нейрона містять заряджені амінокислоти, особливо у «воротах» каналу. Частинка із сильним негативним або позитивним зарядом може електростатично взаємодіяти з цими ділянками, що змінює конфігурацію каналу. Це може спричинити його блокування або неправильну активацію, порушуючи нормальну роботу нейрона.

3. Порушення роботи синапсів

Синапси залежать від точної роботи іонів Ca^{2+} , Na^+ та нейромедіаторів²⁴⁹. Електростатично заряджені частинки нанопластику можуть порушити вивільнення нейромедіаторів або створити хибний сигнал, що може призвести до збоїв у передачі нервових імпульсів.

²⁴⁶Peking University Center for Environmental Science and Engineering. Prof. Yi Huang's team made new progress in atmospheric microplastic distribution and its human health risk. CESE. (2022) <https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm> (Дата доступу: 01.05.2025).

²⁴⁷Kim, D. Y. et al. Effects of Microplastic Accumulation on Neuronal Death After Global Cerebral Ischemia. *Cells* 14, 241 (2025). <https://doi.org/10.3390/cells14040241>

²⁴⁸Zhang, Y. et al. Selective bioaccumulation of polystyrene nanoplastics in fetal rat brain and damage to myelin development. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 278, 116393 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116393>

²⁴⁹Moiniafshari, K. et al. A perspective on the potential impact of microplastics and nanoplastics on the human central nervous system. *Environmental Science: Nano* 12, 1809–1820 (2025). <https://doi.org/10.1039/D4EN01017E>

4. Окислювальний стрес і запалення

Заряджені нанопластики здатні викликати підвищення рівня активних форм кисню, що призводить до окислювального стресу. Окислювальний стрес у нейронах виникає, коли рівень активних форм кисню перевищує здатність клітини їх нейтралізувати. Це призводить до пошкодження ДНК, клітинних структур, таких як мембрани, білки та мітохондрії, що порушує нормальне функціонування нейронів. Як наслідок, клітина втрачає здатність ефективно передавати нервові імпульси, що спричиняє її деградацію та, зрештою, загибель. Оскільки нейрони мають обмежену здатність до відновлення, ушкодження, спричинені окислювальним стресом, часто стають незворотними й можуть призводити до прогресуючого погіршення пам'яті, уваги та інших когнітивних функцій.

5. Вплив на мітохондріальну функцію

Проникаючи всередину клітини, нанопластик, що має електростатичний позитивний заряд, може накопичуватися в мітохондріях, порушуючи їхній мембранний потенціал. Як наслідок, порушується робота дихального ланцюга та відбуваються витоки електронів, які взаємодіють із киснем і утворюють активні форми кисню, зокрема супероксид-аніони. Їхнє надмірне накопичення посилює окислювальний стрес і може призвести до пошкодження клітинних структур.

6. Мітохондріальні мутації

Наночастинки пластику здатні спричиняти пошкодження мітохондріальної ДНК, що порушує нормальну роботу мітохондрій. Це впливає на ключові клітинні процеси — виробництво енергії, контроль окислювального стресу, програмовану клітинну смерть і метаболізм. Порушення в цих системах можуть створити умови, що сприяють розвитку захворювань.

7. Реактивні властивості поверхні нанопластику

Висока питома поверхня нанопластику — один із головних чинників, що обумовлюють його високу хімічну активність і здатність спричиняти утворення активних форм кисню. Порівняно з мікропластиком, наночастинки мають у десятки і навіть сотні разів більшу поверхню на одиницю маси, що значно посилює їхню взаємодію з біомолекулами та навколишнім середовищем.

Електростатичний заряд на частинках пластику може порушувати роботу нейронів, блокуючи або спотворюючи передачу нервових імпульсів. Це призводить до збоїв у роботі нервової системи й може спричиняти широкий спектр патологічних станів в організмі. Це проявляється в різних неврологічних, вегетативних, когнітивних і психічних розладах (Таблиця 2).

Вплив нанопластику на нервові клітини призводить до широкого спектра захворювань: розсіяний і бічний аміотрофічний склероз, хвороби Альцгеймера та Паркінсона, аутоімунні захворювання, епілепсія, ішемічний і геморагічний інсульт, депресія, тривожні та когнітивні розлади, шизофренія, біполярний розлад, аутизм тощо.

Категорія	Прояв	Причина / Механізм
Рухові порушення	Параліч	Порушення передачі рухових імпульсів від ЦНС до м'язів
	Судомні стани	Дисбаланс між збуджувальними та гальмівними нейросигналами
	Втрата чутливості	Збій у функціонуванні сенсорних нейронних ланцюгів, що передають інформацію від рецепторів до мозку
	Порушення координації рухів	Пошкодження провідних шляхів мозочка або спинного мозку
Сенсорні порушення	Розлади мовлення, зору та слуху	Ураження нервових шляхів, пов'язаних із сенсорними та моторними центрами головного мозку
Вегетативні порушення	Дисфункції дихання, серцебиття й травлення	Порушення роботи автономної (вегетативної) нервової системи
	Збої в терморегуляції та порушення роботи внутрішніх органів	Дисфункція вегетативних регуляторних центрів
Когнітивні розлади	Порушення пам'яті та уваги	Структурні або функціональні зміни в корі головного мозку
	Порушення свідомості, кома	Пошкодження ретикулярної формації мозку, що відіграє ключову роль у регуляції бадьорості та рівня свідомості
Психоемоційні розлади	Тривожність, депресія, порушення настрою	Дисбаланс нейромедіаторів, ураження емоційних центрів мозку

Таблиця 2. Спектр патологічних станів, спричинених впливом нанопластику на нейрони

Мікро- й нанопластик як фактор ризику розладів аутистичного спектра

Поряд зі збільшенням забруднення навколишнього середовища пластиком спостерігається зростання поширеності розладів аутистичного спектра (РАС) (рис. 96–97).

The Rising Prevalence of Autism in the U.S. from 1970 to 2023

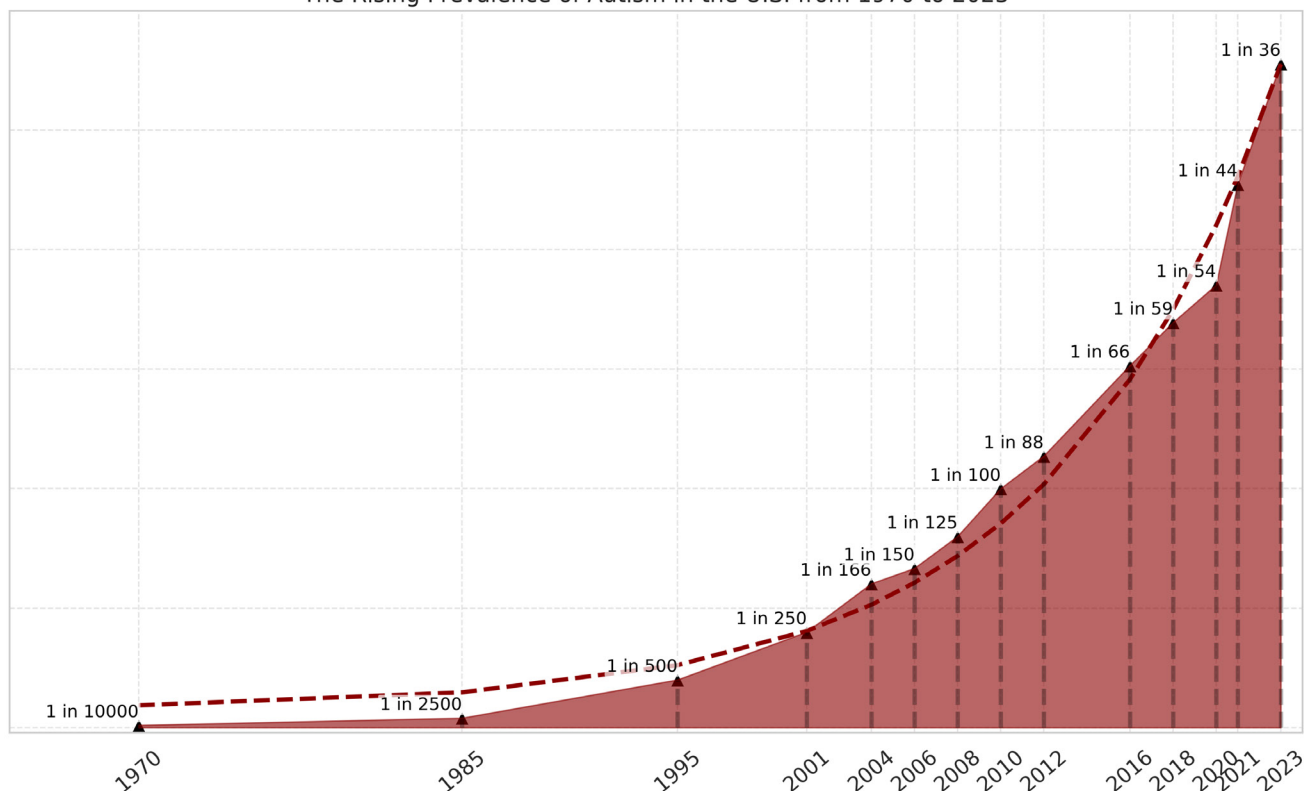


Рисунок 96. Зростання поширеності аутизму в США з 1970 до 2023 р.

Джерело: Rogers, T. The political economy of autism. Substack.

<https://tobyrogers.substack.com/p/the-political-economy-of-autism> (Дата доступу: 01.05.2025)

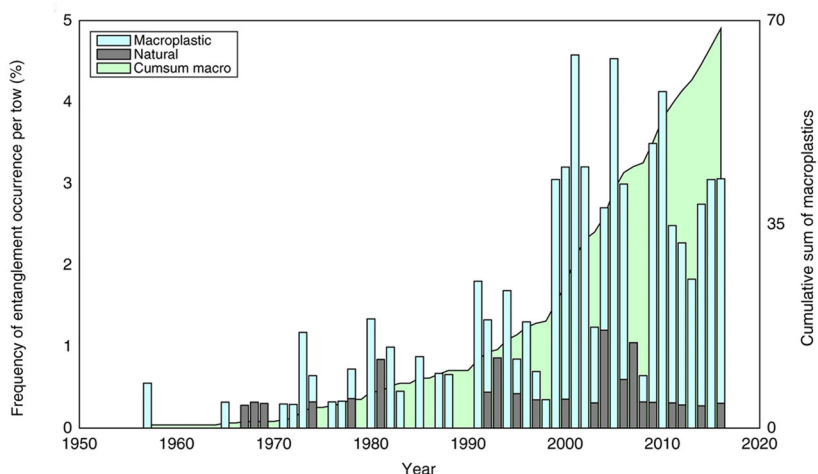


Рисунок 97. Зростання кількості пластику в океані з 1957 до 2020 р.

Джерело: Ostle, C. et al. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. Nat Commun 10, 1622 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>

За оцінками Мережі моніторингу аутизму та порушень розвитку (ADDM) CDC, в 1 з 36 дітей у США було виявлено РАС. За даними 2020 року, кількість випадків аутизму зросла на 317 % порівняно з 2000 роком^{250 251}.

Починаючи з ембріонального періоду та в перші роки життя формується нервова система людини. Дослідження вказують на потенційний зв'язок між впливом мікро- й нанопластику та розвитком РАС. Експериментальні дані, отримані корейськими вченими, демонструють, що пренатальний і постнатальний вплив МНП може сприяти виникненню порушень нейророзвитку²⁵².

Дослідження молекулярних ефектів полістирольних нанопластиків на нервові стовбурові клітини людини продемонструвало, що вплив нанопластику може призвести до пошкодження тканин і захворювань, пов'язаних із неврологічним розвитком²⁵³.

Дослідження на гризунах²⁵⁴ показали, що вплив мікро- й нанопластику на матір під час вагітності та лактації може порушувати нейрогенез у гіпокампі потомства, а також призводити до зменшення об'єму структур мозку, зокрема моторної кори, гіпокампа, гіпоталамуса, довгастого мозку та нюхової цибулини.

Відомо, що зміна структури й функціонування білків нервових тканин мають особливе значення в розвитку багатьох захворювань, зокрема аутизму²⁵⁵.

Нещодавні дослідження показали, що нанопластик взаємодіє з білками переважно завдяки слабким зв'язкам, таким як гідрофобні взаємодії, водневі зв'язки, сили Ван-дер-Ваальса та електростатичні сили²⁵⁶. Це призводить до структурних деформацій білкових молекул, порушуючи їхню функціональність. З огляду на роль білків у формуванні нейронних мереж і синаптичної передачі, такі зміни можуть спричиняти розвиток РАС.

²⁵⁰Autism Parenting Magazine. Autism Statistics You Need To Know in 2024. (2025) <https://www.autismparentingmagazine.com/autism-statistics> (Дата доступу: 01.05.2025).

²⁵¹Centers for Disease Control and Prevention. Autism Prevalence Higher, According to Data from 11 ADDM Communities. <https://www.cdc.gov/media/releases/2023/p0323-autism.html> (Дата доступу: 01.05.2025).

²⁵²Zaheer, J. et al. Pre/post-natal exposure to microplastic as a potential risk factor for autism spectrum disorder. *Environment International* 161, 107121 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107121>

²⁵³Martin-Folgar, R. et al. Molecular effects of polystyrene nanoplastics on human neural stem cells. *PLOS ONE* 19, e0295816 (2024). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295816>

²⁵⁴Kim, N.-H., Choo, H.-I. & Lee, Y.-A. Effect of nanoplastic intake on the dopamine system during the development of male mice. *Neuroscience* 555, 11–22 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2024.07.018>

²⁵⁵Panisi, C. & Marini, M. Dynamic and Systemic Perspective in Autism Spectrum Disorders: A Change of Gaze in Research Opens to A New Landscape of Needs and Solutions. *Brain Sciences* 12, 250 (2022). <https://doi.org/10.3390/brainsci12020250>

²⁵⁶Windheim, J. et al. Micro- and Nanoplastics' Effects on Protein Folding and Amyloidosis. *International Journal of Molecular Sciences* 23, 10329 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijms231810329>

Участь МНП у патогенезі серцево-судинних захворювань

Частинки пластику здатні не тільки циркулювати в кровотоці, але й осідати на судинних стінках, запускаючи каскад патологічних змін. Особливо тривожним є виявлення мікропластику в атеросклеротичних бляшках²⁵⁷. Нещодавнє дослідження показало, що в пацієнтів із мікропластиком у сонних артеріях ризик інфаркту міокарда, інсульту та смерті був у 4,5 раза вищим. Це свідчить про активну участь пластикових фрагментів у формуванні й дестабілізації атеросклеротичних бляшок, провокуючи їхній розрив і тромбоутворення²⁵⁸. МНП також порушує цілісність ендотелію — ключового шару клітин, що вистилає внутрішню поверхню судин і відповідає за регуляцію судинного тону, запобігання тромбоутворенню та запальним реакціям. Пошкодження ендотелію під впливом частинок пластику призводить до хронічного запалення та підвищення ризику тромбоутворення, що особливо небезпечно в артеріях, які живлять серце й мозок²⁵⁹.

Мікропластик взаємодіє з форменими елементами крові, такими як тромбоцити та еритроцити. Він сприяє агрегації тромбоцитів, запускаючи процес утворення тромбів. Крім того, поверхня мікропластику може спричиняти механічне пошкодження клітин і активувати каскади згортання крові, що в довгостроковій перспективі може призвести до хронічної гіперкоагуляції та мікросудинних порушень.

Імунні клітини здатні поглинати мікрочастинки пластику, проте вони не володіють механізмами для їх повного розщеплення. Це призводить до деформації клітин і збільшення їхнього розміру. Скупчення таких змінених клітин у дрібних судинах головного мозку сприяє формуванню мікротромбів, що порушує кровопостачання мозку та збільшує ризик інсульту, включно з випадками в молодому віці²⁶⁰.

Хронічне зменшення постачання до мозку кисню (гіпоксія) призводить до загибелі нейронів і розвитку нейродегенеративних змін, зокрема атрофії мозкової тканини²⁶¹. За тривалого впливу ці процеси можуть спричиняти зменшення об'єму окремих структур мозку.

Завдяки електростатичному заряду, МНП активно взаємодіє з клітинними мембранами, порушуючи їхній електричний потенціал. Це, своєю чергою, впливає на скоротливість судин, передачу сигналів у міоцитах і серцевий ритм. Смертність від серцево-судинних захворювань в усьому світі неухильно зростає (рис. 98). Особливу увагу слід приділити синдрому раптової серцевої смерті серед молодих людей 25–44 років²⁶² (рис. 99). У США він визнаний основною причиною смерті. За останні два десятиліття кількість випадків різко зросла. З огляду на повсюдне поширення МНП, не можна відкидати його потенційну роль у цих трагічних подіях.

²⁵⁷Liu, S. et al. Microplastics in three types of human arteries detected by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (Py-GC/MS). *Journal of Hazardous Materials* 469, 133855 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133855>

²⁵⁸Marfella, R. et al. Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events. *N Engl J Med* 390, 900–910 (2024). <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2309822>

²⁵⁹Rajendran, D. & Chandrasekaran, N. Journey of micronanoplastics with blood components. *RSC Adv.* 13, 31435–31459 (2023). <https://doi.org/10.1039/D3RA05620A>

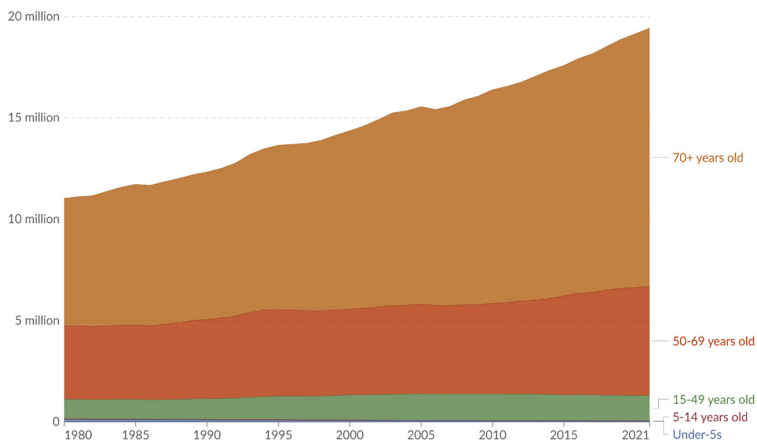
²⁶⁰Huang, H. et al. Microplastics in the bloodstream can induce cerebral thrombosis by causing cell obstruction and lead to neurobehavioral abnormalities. *Sci. Adv.* 11, eadr8243 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adr8243>

²⁶¹Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. *Chemosphere* 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>

²⁶²Zuin, M. et al. Trends in Sudden Cardiac Death Among Adults Aged 25 to 44 Years in the United States: An Analysis of 2 Large US Databases. *JAHA* 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.035722>

Number of deaths from cardiovascular diseases by age, World

Estimated annual number of deaths from cardiovascular diseases¹ in each age group. Estimates come with wide uncertainties especially for countries with poor vital registration².



- Cardiovascular disease:** Cardiovascular diseases cover all diseases of the heart and blood vessels – including heart attacks and strokes, atherosclerosis, ischemic heart disease, hypertensive diseases, cardiomyopathy, rheumatic heart disease, and more. They tend to develop gradually with age, especially when people have risk factors like high blood pressure, smoking, alcohol use, poor diet, and air pollution.
- Civil Registration and Vital Statistics system:** A Civil Registration and Vital Statistics system (CRVS) is an administrative system in a country that manages information on births, marriages, deaths and divorces. It generates and stores 'vital records' and legal documents such as birth certificates and death certificates. You can read more about how deaths are registered around the world in our article: [How are causes of death registered around the world?](#)

Рисунок 98. Кількість смертей від серцево-судинних захворювань за віком у світі.

Джерело: Our World in Data
<https://ourworldindata.org/grapher/cardiovascular-disease-deaths-by-age>

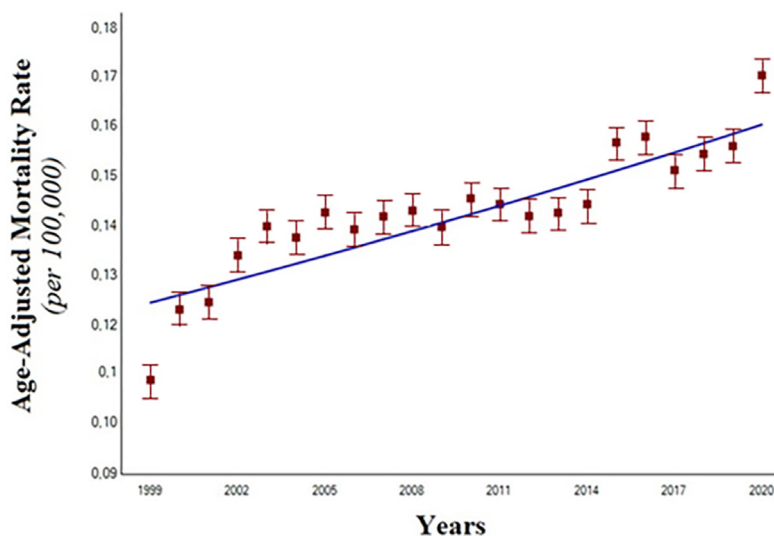


Рисунок 99. Тенденції у скоригованих за віком показниках смертності внаслідок раптової серцевої смерті, з відповідними 95 % ДІ, серед молодих дорослих у США у віці від 25 до 44 років, з 1999 до 2020 року.

Джерело: Zuin, M. et al. Trends in Sudden Cardiac Death Among Adults Aged 25 to 44 Years in the United States: An Analysis of 2 Large US Databases. *JAMA* 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAMA.124.035722>

Ще однією серйозною проблемою є зростання раптової дитячої смертності (СРДС). Лише у США показник цього синдрому зріс на 15 % з 2019 до 2020 року, перемістившись з четвертого на третє місце серед причин смертності дітей²⁶³. Незважаючи на те, що причини СРДС остаточно не встановлено, чимало вчених припускають, що ключову роль можуть відігравати фактори, які порушують регуляцію серцевого ритму та судинного тонуусу у немовлят. Нанопластик, здатний проникати через плаценту й накопичуватися в тканинах організму, що розвивається, є одним із ймовірних факторів ризику. Дедалі більше вчених сходяться на думці, що нанопластик — один із ключових кандидатів на роль «невидимого вбивці».

²⁶³Shapiro-Mendoza, C. K. et al. Sudden Unexpected Infant Deaths: 2015–2020. *Pediatrics* 151, e2022058820 (2023). <https://doi.org/10.1542/peds.2022-058820>

Серце, як один із найбільш енерговитратних органів, критично залежить від ефективної роботи мітохондрій, які забезпечують його енергією. Вплив мікропластикових частинок порушує мітохондріальні процеси, що може призводити до енергетичного дефіциту в міокарді і, як наслідок, до порушення серцевої функції.

Порушення функцій шлунково-кишкового тракту, спричинене МНП

Кишківник є найбільшим імунним органом людини. У ньому зосереджено близько 70 % усіх імунних клітин, приблизно 500 мільйонів нейронів і понад 100 трильйонів мікроорганізмів²⁶⁴. Кишкова мікробіота відіграє ключову роль у підтримці імунної системи. Дисбаланс мікробіоти може послабити імунітет і сприяти виникненню різноманітних захворювань.

Кишківник часто називають «другим мозком» через щільну мережу нейронів і його здатність взаємодіяти з центральною нервовою системою²⁶⁵. Обмін складними біохімічними сигналами між мозком і кишківником дістав назву «вісь мозок–кишківник» і відіграє важливу роль у регуляції як фізичного, так і психоемоційного стану (рис. 100).

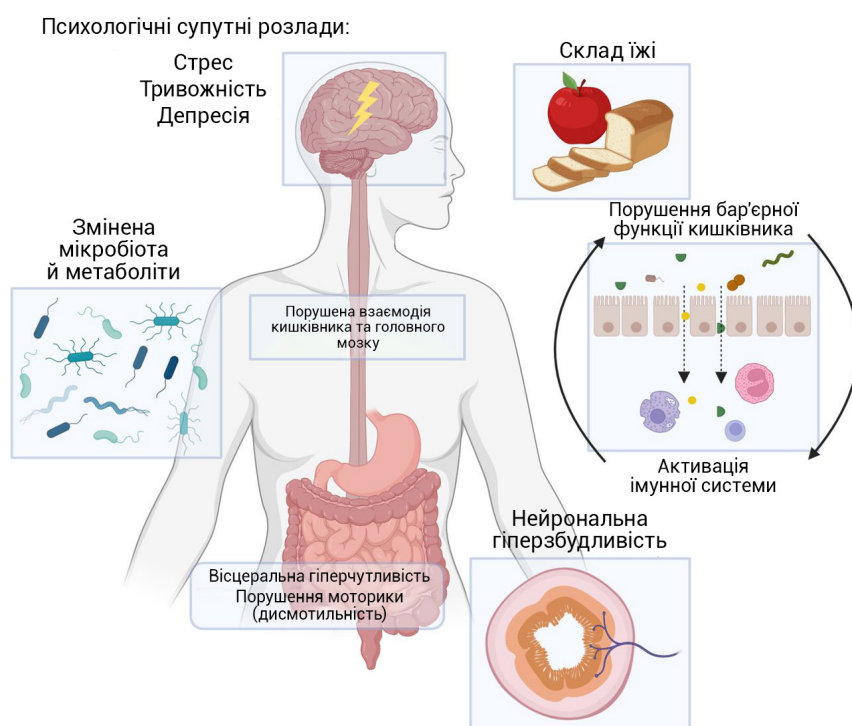


Рисунок 100. Патолофізіологічні механізми в разі порушень взаємодії кишківника та мозку.

Джерело: Vanuytsel, T., Bercik, P. & Boeckxstaens, G. Understanding neuroimmune interactions in disorders of gut–brain interaction: from functional to immune-mediated disorders. *Gut* 72, 787–798 (2023).

<https://doi.org/10.1136/gutjnl-2020-320633>

²⁶⁴Sofield, C. E., Anderton, R. S. & Gorecki, A. M. Mind over Microplastics: Exploring Microplastic-Induced Gut Disruption and Gut-Brain-Axis Consequences. *Current Issues in Molecular Biology* 46, 4186–4202 (2024). <https://doi.org/10.3390/cimb46050256>

²⁶⁵Jiefang Daily. Intestine is the second brain? It can also communicate with multiple organs in both directions | New People - Health News. (2025) <https://www.jfdaily.com/staticsg/res/html/web/newsDetail.html?id=866347> (Дата доступу: 01.05.2025).

Здоровий кишковий бар'єр запобігає проникненню мікробів і чужорідних частинок із просвіту кишківника до кровотоку²⁶⁵. Мікро- й нанопластик порушує цей захист, підвищуючи проникність стінок кишківника. Як наслідок, розвивається запалення як у самому кишківнику, так і в інших органах, що сприяє послабленню імунітету²⁶⁶. Одночасно МНП впливає на склад кишкової мікробіоти, спричиняючи дисбаланс між корисними та патогенними мікроорганізмами. Це порушує процеси травлення, знижує здатність організму розщеплювати харчові алергени та підвищує ризик розвитку харчової алергії²⁶⁷.

Таким чином, виникає замкнене коло: пластик порушує мікробіоту, посилює запалення й проникність стінок кишківника, через них у кров починають проникати токсини, бактерії та сам пластик. Проникнення цих речовин у кров запускає імунну відповідь, яка призводить до хронічного запалення по всьому організму. З крові токсини, бактерії та нанопластик через гематоенцефалічний бар'єр потрапляють до мозку, що провокує запальні реакції в головному мозку. Ці процеси, своєю чергою, ще більше порушують регуляцію імунної відповіді, посилюють стресову реакцію організму і можуть негативно впливати на стан мікробіоти через нейроендокринні механізми, у такий спосіб замикаючи замкнене коло на осі «кишківник — мозок».

Порушення взаємодії між кишковим мікробіомом і центральною нервовою системою безпосередньо пов'язане з неврологічними розладами. Так, у дітей із розладами аутистичного спектра виявлено виражений дисбаланс мікробіоти, що підтверджується як мікробіологічним аналізом, так і оцінкою функцій травної системи²⁶⁸.

Дослідження пацієнтів із запальним захворюванням кишківника показують позитивну кореляцію між тяжкістю захворювання та концентрацією мікропластику у фекаліях. У пацієнтів із запальними захворюваннями кишківника вона вища (41,8 шт./г) порівняно зі здоровими людьми (28,0 шт./г). Також у таких пацієнтів виявили значне накопичення мікропластику у виразкових ураженнях слизової оболонки прямої кишки²⁶⁹.

Крім того, мікропластик, що залишається в кишківнику, продовжує чинити шкідливий вплив навіть через тривалий час після первинного потраплення до організму.

²⁶⁴Sofield, C. E., Anderton, R. S. & Gorecki, A. M. Mind over Microplastics: Exploring Microplastic-Induced Gut Disruption and Gut-Brain-Axis Consequences. *Current Issues in Molecular Biology* 46, 4186–4202 (2024). <https://doi.org/10.3390/cimb46050256>

²⁶⁶Winiarska, E., Jutel, M. & Zemelka-Wiacek, M. The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks. *Environmental Research* 251, 118535 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>

²⁶⁷ScienceDirect. Food allergy. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/food-allergy> (Дата доступу: 01.05.2025).

²⁶⁸Su, Q., Wong, O.W.H., Lu, W. et al. Multikingdom and functional gut microbiota markers for autism spectrum disorder. *Nat Microbiol* 9, 2344–2355 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41564-024-01739-1>

²⁶⁹ScienceDirect. Inflammatory bowel disease. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/inflammatory-bowel-disease> (Дата доступу: 01.05.2025).

Вплив МНП на імунну систему

МНП порушує імунну відповідь в організмі, створюючи умови для розмноження патогенів.

Заряджені частинки МНП легше притягують до себе інші молекули — наприклад, токсини, солі важких металів, бактерії та віруси (рис. 101). Це робить їх своєрідною «транспортною платформою» для токсичних сполук, посилюючи їхню біологічну активність і токсичність. Електростатичний заряд нанопластику є своєрідним підживленням або «підзарядкою», завдяки якій бактерії та віруси довше зберігають свою життєздатність.

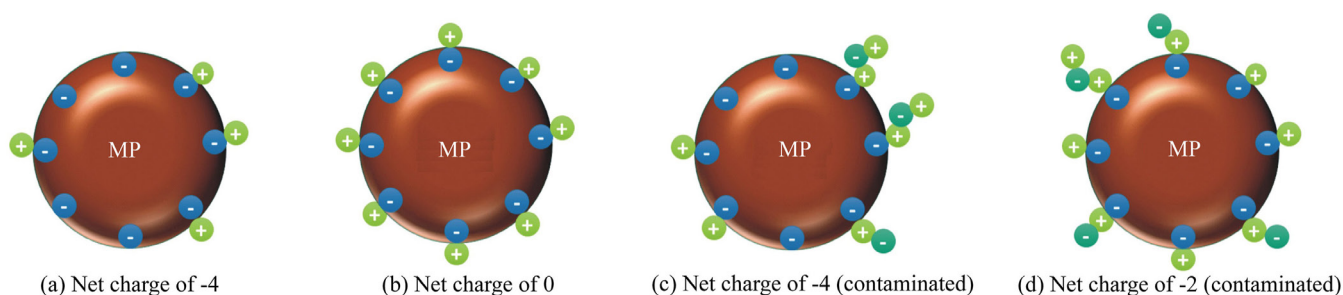


Рисунок 101. Ілюстрація ефекту поверхневих зарядів мікропластику, викликаних забруднюючими речовинами води.

Джерело: Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024).

<https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

І нарешті, заряджені частинки мікро- й нанопластику можуть довше зберігатися у воді та повітрі, легше підніматися в аерозолі та потрапляти до дихальних шляхів, що підвищує ризик їхнього проникнення до організму людини.

Сукупний вплив МНП на мікробіом, патогени та імунну систему формує комплексні ризики для здоров'я. Імунні клітини, що контактують з мікропластиком, гинуть приблизно втричі швидше, ніж ті, які з ним не стикаються²⁷⁰.

Частинки мікропластику здатні адсорбувати на своїй поверхні віруси завдяки електростатичним і гідрофобним взаємодіям, у такий спосіб подовжуючи їхню життєздатність²⁷¹.

²⁷⁰Plastics News. Study highlights health hazards of microplastics. (2019) <https://www.plasticsnews.com/news/study-highlights-health-hazards-microplastics> (Дата доступу: 01.05.2025).

²⁷¹Moresco, V. et al. Binding, recovery, and infectiousness of enveloped and non-enveloped viruses associated with plastic pollution in surface water. *Environmental Pollution* 308, 119594 (2022).

Віруси на поверхні мікропластику залишаються активними до трьох днів — цього достатньо, щоб подолати шлях, наприклад, від очисних споруд до пляжів²⁷².

Мікропластик полегшує поширення патогенів і може сприяти їхній генетичній рекомбінації. Дослідження показало, що частинки пластику не лише погіршують дію ліків, але й можуть сприяти розвитку бактерій, стійких до антибіотиків²⁷³.

Заряджені частинки МНП слугують платформою для колонізації мікроорганізмів²⁷⁴. Бактерії та гриби, використовуючи електростатичні поля нанопластику, демонструють прискорений ріст. Дослідження на дафніях виявили, що вплив нанопластику спричиняє окислювальний стрес і підвищує рівень грибкових інфекцій в 11 разів (вид *Metschnikowia*)²⁷⁵. Це відповідає глобальному розширенню ареалу та стійкості грибкових захворювань, що відзначено ВООЗ як зростаючу загрозу громадському здоров'ю.



«Вийшовши з тіні пандемії стійкості бактерій до протимікробних препаратів, грибкові інфекції поширюються і стають дедалі стійкішими до лікування, перетворюючись на проблему громадської охорони здоров'я в усьому світі», — зазначив доктор Ханан Балхі, помічник Генерального директора ВООЗ зі стійкості до протимікробних препаратів²⁷⁶.

Грибкові метаболіти, що виділяються в присутності МНП, асоційовані з ростом пухлин²⁷⁷ і хронічним запаленням. ДНК грибів виявлено в окремих типах раку, що вказує на потенційну роль МНП в онкогенезі²⁷⁸.

²⁷²University of Stirling. Hitch-hiking viruses can survive on microplastics in freshwater, new study finds. (2022) <https://www.stir.ac.uk/news/2022/june-2022-news/hitch-hiking-viruses-can-survive-on-microplastics-in-freshwater-new-study-finds> (Дата доступу: 01.05.2025).

²⁷³Dick, L. et al. The adsorption of drugs on nanoplastics has severe biological impact. Sci Rep 14, 25853 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75785-4>

²⁷⁴Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. Water Science and Engineering 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

²⁷⁵Manzi, F., Schlösser, P., Owczarz, A. & Wolinska, J. Polystyrene nanoplastics differentially influence the outcome of infection by two microparasites of the host *Daphnia magna*. Phil. Trans. R. Soc. B 378, 20220013 (2023). <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0013>

²⁷⁶World Health Organization. WHO releases first-ever list of health-threatening fungi. (2022) <https://www.who.int/news/item/25-10-2022-who-releases-first-ever-list-of-health-threatening-fungi> (Дата доступу: 01.05.2025).

²⁷⁷Aykut, B., Pushalkar, S., Chen, R. et al. The fungal mycobiome promotes pancreatic oncogenesis via activation of MBL. Nature 574, 264–267 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1608-2>

²⁷⁸Dohlman, A. B. et al. A pan-cancer mycobiome analysis reveals fungal involvement in gastrointestinal and lung tumors. Cell 185, 3807–3822.e12 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cell.2022.09.015>

Онкогенна дія МНП.

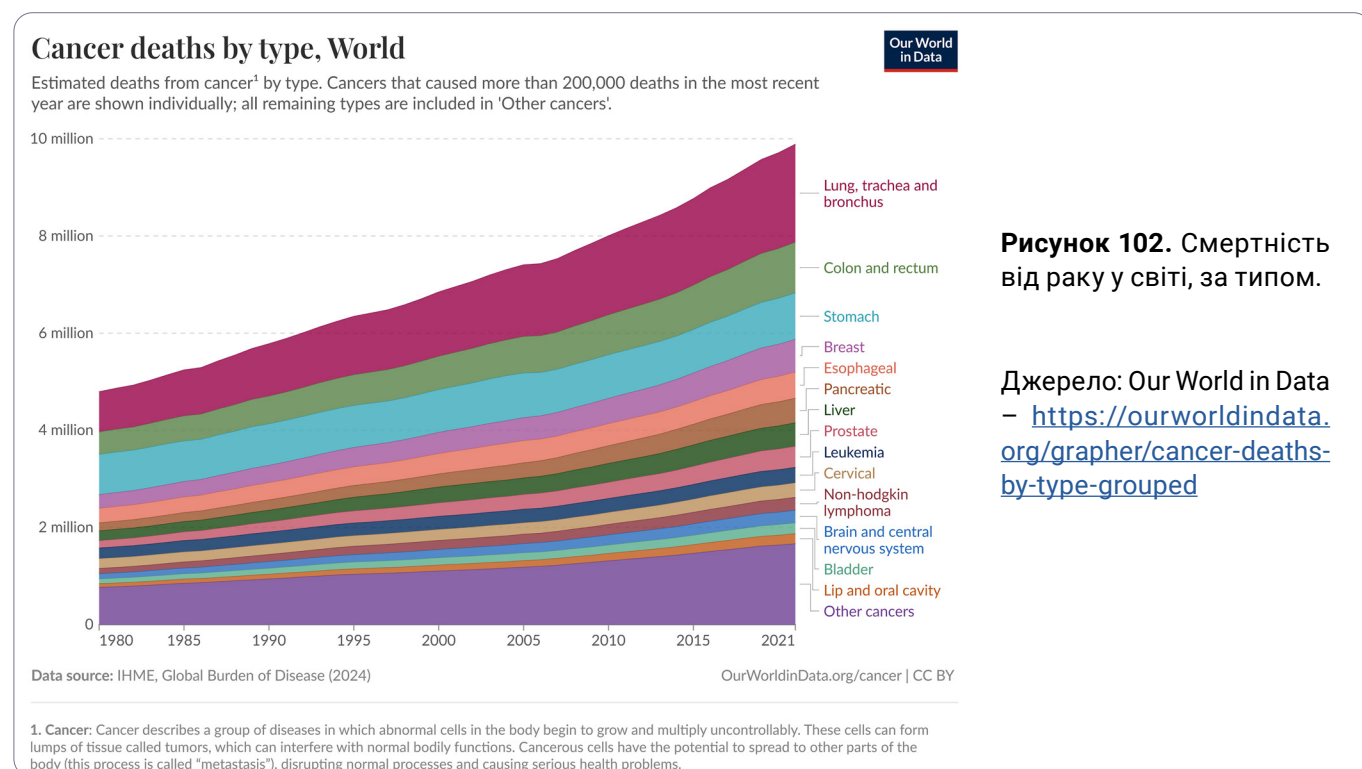
Механізми мутацій і розвитку метастазів

Згідно з інформацією, викладеною вище, мікро- й нанопластик є значущим фактором у розвитку злоякісних утворень з огляду на його негативний вплив на клітинному та системному рівні.

Дослідження свідчать, що мікропластик і нанопластик може відігравати роль прихованих каталізаторів розвитку раку, посилюючи міграцію клітин і сприяючи метастазуванню²⁷⁹. Також виявлено, що частинки МНП можуть зберігатися всередині клітин протягом тривалого часу та передаватися дочірнім клітинам під час поділу.

Наразі смертність від онкологічних захворювань у світі продовжує зростати (рис. 102).

За прогнозами, до 2050 року кількість нових випадків раку зросте на 77 %²⁸⁰.



²⁷⁹Brynzak-Schreiber, E. et al. Microplastics role in cell migration and distribution during cancer cell division. Chemosphere 353, 141463 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141463>

²⁸⁰World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024) <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing-amidst-mounting-need-for-services> (Дата доступу: 01.05.2025).

Вплив МНП на обмін кальцію та структуру кісток

Частинки пластику здатні проникати навіть до опорно-рухового апарату — основи фізичного функціонування людини (рис. 103). Там, де панує точний баланс між руйнуванням і будівництвом, де кістки щодня оновлюються, суглоби гасять тертя, а м'язи підтримують рух і тепло, мікропластик — зокрема завдяки своєму електростатичному заряду — здатний підміняти собою будівельні молекули та запускати повільні руйнівні процеси.

Дослідження свідчать, що мікропластик здатний проникати до кісткової тканини, де його молекулярна структура дозволяє йому імітувати кальцій та інші мінерали, необхідні для кісткового метаболізму. Як результат, пластик може помилково сприйматися організмом як будівельний матеріал для кісток. Організм у буквальному сенсі починає «будувати» кістки з пластику.

Це порушення молекулярного розпізнавання пов'язане з низкою негативних наслідків: мікропластик здатний порушувати функції остеобластів і остеокластів та обмін кальцію і фосфору, у такий спосіб сприяючи розвитку остеопорозу. Запускаються запальні каскади, експресія генів порушується, а кісткова тканина втрачає щільність і міцність. Крім того, присутність нанопластику може спричиняти хронічне запалення, яке пошкоджує суглобовий хрящ і кісткову тканину, що пов'язано з підвищеним ризиком остеоартриту, больового синдрому та скутості рухів^{281 282}.

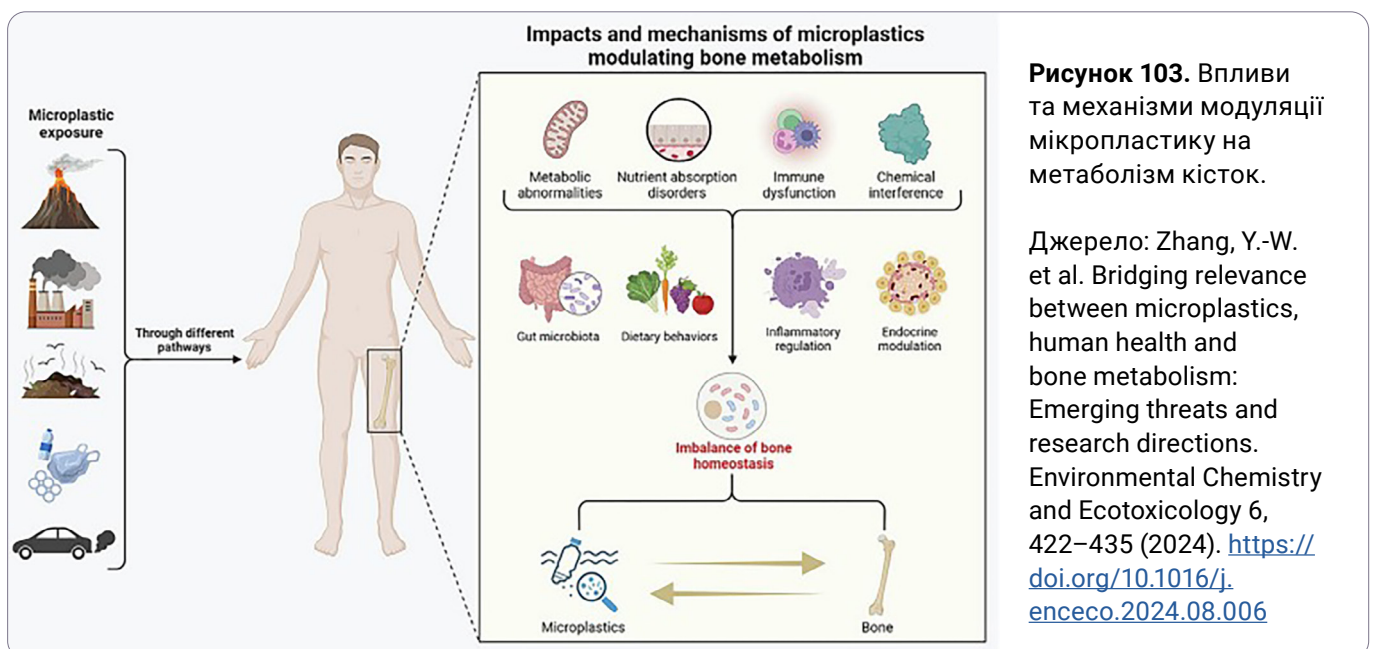


Рисунок 103. Впливи та механізми модуляції мікропластику на метаболізм кісток.

Джерело: Zhang, Y.-W. et al. Bridging relevance between microplastics, human health and bone metabolism: Emerging threats and research directions. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 6, 422–435 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.08.006>

²⁸¹Zhang, Y.-W. et al. Bridging relevance between microplastics, human health and bone metabolism: Emerging threats and research directions. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 6, 422–435 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.08.006>

²⁸²China Environment News. Microplastics "secretly attack" the human body, how much damage can they cause? (2025) <https://cenews.com.cn/news.html?aid=1205048> (Дата доступу: 01.05.2025).

Дослідження на гризунах довело, що кількість остеобластів значно зменшилася у мишей, які отримували полістирольний мікропластик²⁸⁰.

Не меншу загрозу пластик становить і для скелетної мускулатури. Дослідження показують, що нанопластик здатен проникати до м'язових клітин, порушуючи роботу мітохондрій. Виникає дефіцит енергії, активуються агресивні форми активного кисню, що прискорює старіння клітин, порушує відновлення м'язів після навантажень і сприяє їхній атрофії. Особливо вразливими стають люди похилого віку та пацієнти з хронічними захворюваннями.

Мікро- й нанопластик накопичується в кістковому мозку²⁸³, порушуючи утворення стовбурових клітин (гемопоетичних і мезенхімальних)²⁸⁴, з яких формуються еритроцити, лейкоцити, тромбоцити, остеоцити, хондроцити та адипоцити. Їхня дисфункція спричиняє системні ушкодження організму.

Репродуктивні розлади, асоційовані з впливом МНП. Безпліддя та еректильна дисфункція

Зниження фертильності

Згідно з прогнозами, до 2045 року світ стане повністю безплідним²⁸⁵.

Ще 2018 року група провідних лікарів і вчених на **XIII Міжнародному симпозиумі зі сперматології** у Стокгольмі закликала уряди визнати зниження чоловічої фертильності як серйозну проблему охорони громадського здоров'я та визнати важливість чоловічого репродуктивного здоров'я для виживання людського виду²⁸⁵.

Всупереч поширеній думці, репродуктивне здоров'я визначається не тільки гормональним балансом, спадковістю та способом життя. Дедалі більше наукових досліджень відзначають критичну роль мітохондрій у процесах зачаття та розвитку ембріона. Ці найдрібніші органели, відповідальні за вироблення енергії, необхідної для всіх життєвих процесів, відіграють вирішальну роль у фертильності як чоловіків, так і жінок, а їхнє значення для репродуктивної функції людини є набагато глибшим.

Порушення в роботі мітохондрій можуть бути причиною безпліддя як у жінок, так і в чоловіків. У чоловіків мітохондрії, що знаходяться в хвостовій частині сперматозоїда, відповідають за рухливість, необхідну для запліднення. Збої в їхній роботі знижують рухливість сперматозоїдів і можуть спричиняти аномалії.

²⁸⁰World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024)

<https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services> (Дата доступу: 01.05.2025).

²⁸³Guo, X. et al. Discovery and analysis of microplastics in human bone marrow. Journal of Hazardous Materials 477, 135266 (2024).

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135266>

²⁸⁴Sun, R. et al. Preliminary study on impacts of polystyrene microplastics on the hematological system and gene expression in bone marrow cells of mice. Ecotoxicology and Environmental Safety 218, 112296 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112296>

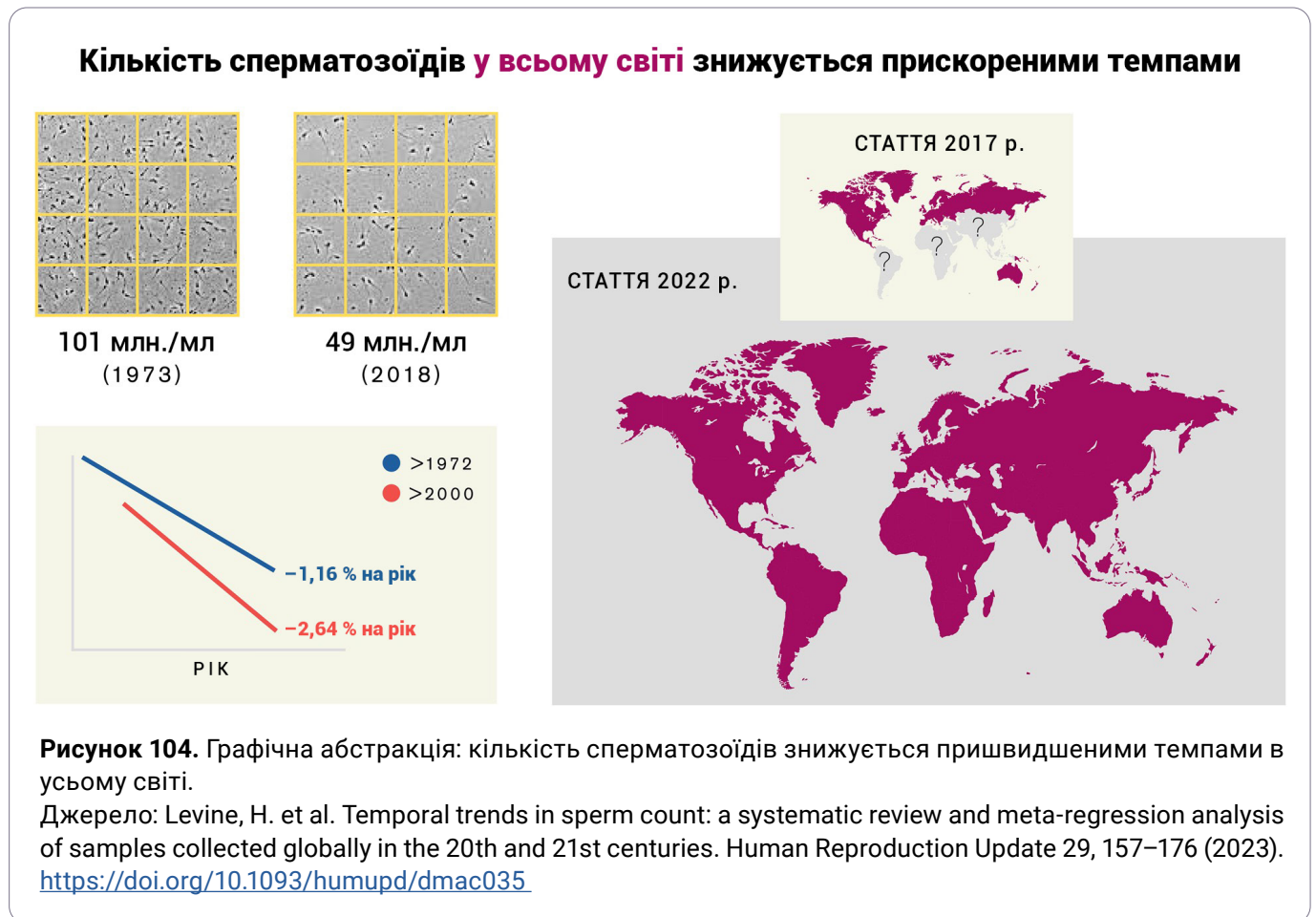
²⁸⁵The Guardian. Shanna Swan: 'Most couples may have to use assisted reproduction by 2045'. (2021)

<https://www.theguardian.com/society/2021/mar/28/shanna-swan-fertility-reproduction-count-down> (Дата доступу: 01.05.2025).

²⁸⁶Levine, H. et al. Male reproductive health statement (XIIIth international symposium on Spermatology, May 9th–12th 2018, Stockholm, Sweden. Basic Clin. Androl. 28, 13 (2018). <https://doi.org/10.1186/s12610-018-0077-z>

У дослідженнях, проведених китайськими вченими, мікропластик було виявлено в усіх зразках сперми — в середньому по дві частинки розміром до 7 мкм, найчастіше полістирол²⁸⁷. Його присутність пов'язана з морфологічними порушеннями сперматозоїдів і вкороченням теломер. Завдяки мікроскопічним розмірам і заряду нанопластик здатний долати гематотестикулярний бар'єр і проникати до статевих органів, порушуючи їхні функції.

Особливу тривогу викликає спостережувана тенденція до зниження загальної кількості сперматозоїдів у чоловіків на 62,3 % з 1973 до 2018 року²⁸⁸ (рис. 104).

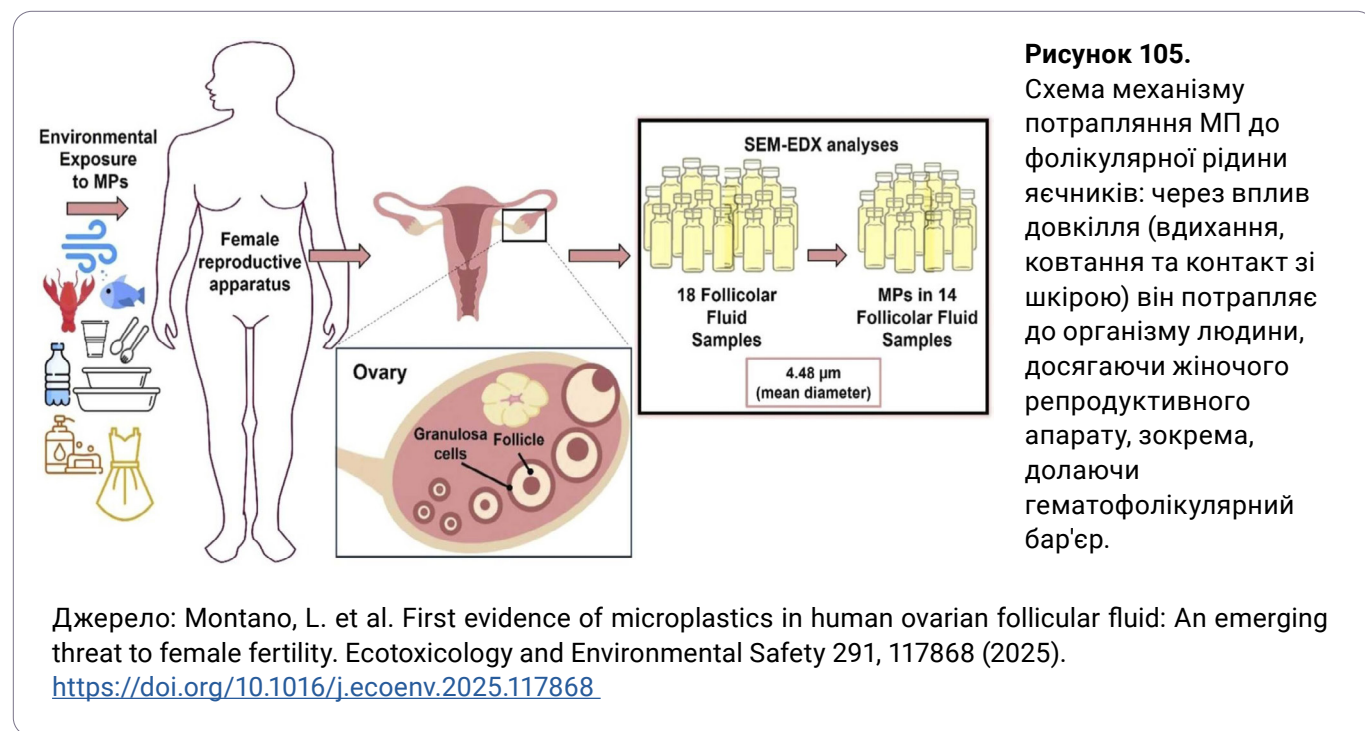


Незважаючи на те, що на фертильність впливає безліч факторів, дедалі більше вчених схилиються до думки, що хімічні сполуки, які містяться в пластику, відіграють у цьому процесі одну з ключових ролей. Фталати, які використовуються для надання пластику гнучкості, порушують гормональний фон, знижують лібідо й можуть сприяти передчасному статевому дозріванню та порушенню функції яєчок.

²⁸⁷Li, N. et al. Prevalence and implications of microplastic contaminants in general human seminal fluid: A Raman spectroscopic study. Science of The Total Environment 937, 173522 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173522>

²⁸⁸Levine, H. et al. Temporal trends in sperm count: a systematic review and meta-regression analysis of samples collected globally in the 20th and 21st centuries. Human Reproduction Update 29, 157–176 (2023). <https://doi.org/10.1093/humupd/dmac035>

Не менш тривожна ситуація складається і з жіночою фертильністю. Дослідження 2025 року виявило наявність частинок мікропластику у фолікулярній рідині яєчників у 14 із 18 жінок, у середньому понад 2000 частинок на мілілітр, більшість із яких мали діаметр менше ніж 5 мкм²⁸⁹ (рис. 105).



Ці дані свідчать про здатність пластикових частинок долати гематофолікулярний бар'єр у яєчниках. На клітинному рівні мікро- й нанопластик може пошкоджувати ДНК, порушувати поділ клітин і викликати запалення. Показано їхнє втручання в гормональну регуляцію, порушення функцій плаценти, вплив на ангіогенез і зв'язок із розвитком міоми матки.

Еректильна дисфункція

Результати національного дослідження в Японії засвідчили, що еректильна функція та сексуальна активність знижуються у молодого покоління²⁹⁰. Оцінка на основі EHS виявила поширеність еректильної дисфункції (ЕД) у 30,9 %, яка зачепила приблизно 14 мільйонів чоловіків, і що сексуальне бажання, жорсткість ерекції, оргазми та задоволення були нижчими, ніж очікувалося, у молодих японських чоловіків, особливо у віці від 20 до 24 років, хоча ці фактори мали тенденцію погіршуватися з віком. Фактично рівень поширеності ЕД у віковій групі 20–24 роки становив 26,6 %, що майже дорівнює показнику серед вікової групи 50–54 роки (27,8 %) (рис. 106, 107).

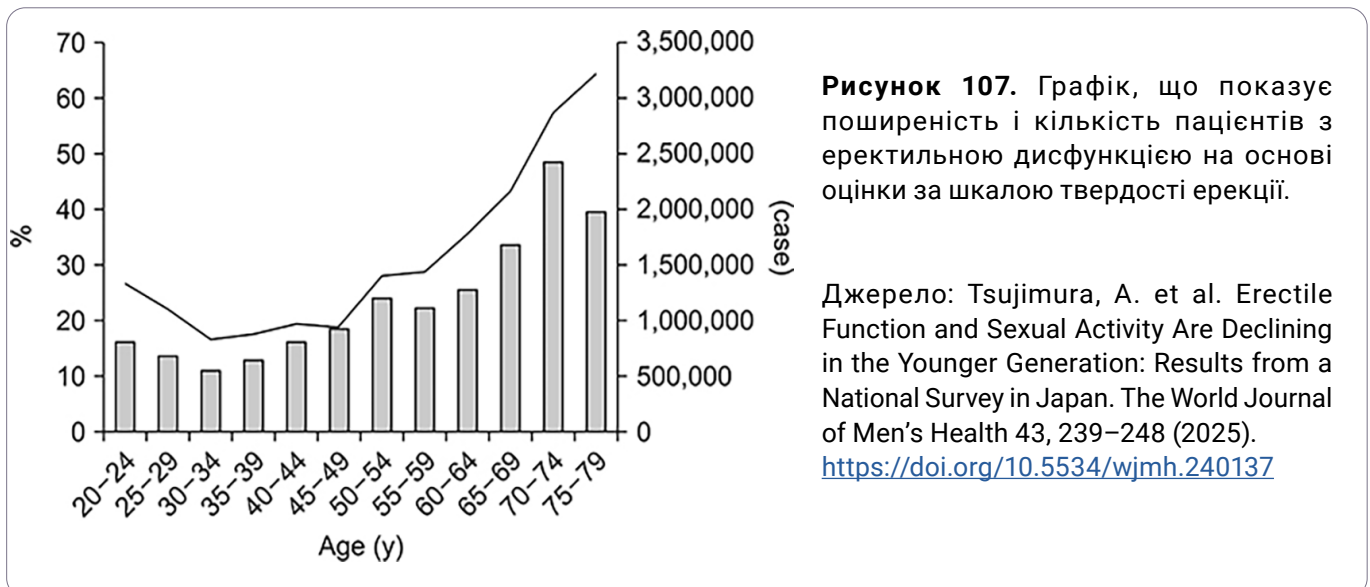
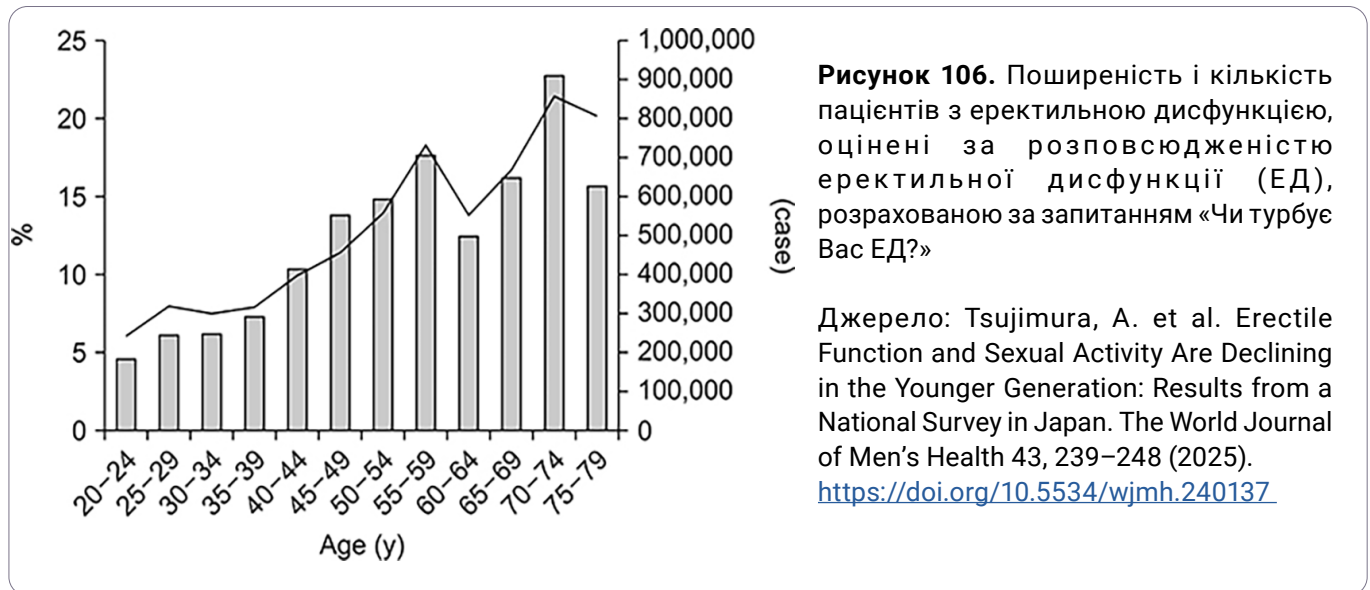
²⁸⁹Montano, L. et al. First evidence of microplastics in human ovarian follicular fluid: An emerging threat to female fertility. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 291, 117868 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117868>

²⁹⁰Tsujimura, A. et al. Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan. *The World Journal of Men's Health* 43, 239–248 (2025). <https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>

Крім того, в іншому дослідженні, проведеному в усьому світі, повідомляється, що у трьох чоловіків із чотирьох спостерігаються симптоми ЕД, а це свідчить про те, що ЕД не є рідкістю й може розвинутися в будь-якого чоловіка.

Перше офіційне національне дослідження сексуальної функції в Японії, проведене 1998 року, підрахувало, що там налічується близько 11,3 мільйона пацієнтів із помірною або повною ЕД. Крім того, національні дослідження чоловічого безпліддя в Японії, проведені в 1996 та 2015 роках, виявили вражаючі дані. У дослідженні 2015 року 13,5 % чоловіків зіткнулися з чоловічим безпліддям через ЕД як основну причину, що майже вчетверо більше, ніж у 1996 році.

Сукупність сучасних наукових даних вказує на те, що мікро- й нанопластик в організмі є однією з прихованих, але значущих причин погіршення репродуктивного здоров'я. Ці частинки проникають до статевих органів, порушують функції мітохондрій, спричиняють запалення, гормональні збої та пошкодження ДНК, знижують рухливість і морфологічну якість сперматозоїдів. Їх знаходять у спермі та фолікулярній рідині, що свідчить про подолання біологічних бар'єрів і глибокий системний вплив. Усе це ставить під загрозу не лише індивідуальне здоров'я, але й майбутнє репродуктивної спроможності людства загалом.



Проникнення МНП через плацентарний бар'єр і його вплив на організм, що розвивається

Пренатальний вплив мікро- й нанопластику на плід

Вагітні жінки демонструють особливу вразливість до впливу мікропластику²⁹¹. Проникаючи до організму матері, пластикові частинки здатні досягати плода через плаценту, втручатися в секрецію гормонів, що регулюють вагітність, і підвищувати ризик передчасних пологів, викиднів і порушень розвитку плода (рис. 108). За оцінками, у 2020 році 13,4 млн дітей (1 із 10) народилися передчасно (<37 тижнів), що залишається провідною причиною дитячої смертності. Діти, які вижили, мають підвищений ризик серйозних захворювань і хронічних станів²⁹².

Ендокринна система, що розвивається у дітей, також украй чутлива до хімічних речовин, які містяться в пластику та можуть імітувати або блокувати гормони²⁹³ (рис. 109). Вплив на немовлят може відбуватися навіть через грудне молоко. Крім того, нанопластик може чинити відкладений вплив, порушуючи процеси формування статевих клітин у дитячому та підлітковому віці й знижуючи фертильність у дорослому стані.

Гематоплацентарний бар'єр (ГПБ) відіграє ключову роль у регуляції обміну речовин між матір'ю та плодом, захищаючи його від шкідливих речовин. Однак дослідження свідчать, що мікро- й нанопластик може проникати через ГПБ.

У 2020 році дослідження під керівництвом Антоніо Рагуза з використанням раманівської мікроспектроскопії (методу, заснованого на аналізі розсіювання світла для визначення хімічного складу матеріалів) виявило присутність мікропластику в плаценті чотирьох із шести обстежених жінок із нормальним перебігом вагітності. У зразках виявлено по 12 частинок розміром 5–10 мкм, зокрема з поліпропіленом і пігментами, що застосовуються в косметичі, фарбах, клеях і засобах гігієни²⁹⁴.

²⁹¹Dugershaw-Kurzer, B. et al. Nanoparticles Dysregulate the Human Placental Secretome with Consequences on Angiogenesis and Vascularization. *Advanced Science* 11, 2401060 (2024). <https://doi.org/10.1002/adv.202401060>

²⁹²World Health Organization. 1 in 10 babies worldwide are born early, with major impacts on health and survival. (2023) <https://www.who.int/news/item/06-10-2023-1-in-10-babies-worldwide-are-born-early--with-major-impacts-on-health-and-survival> (Дата доступу: 01.05.2025).

²⁹³Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. *Cureus* 16, e60712 (2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.60712>

²⁹⁴Ragusa, A. et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International* 146, 106274 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>

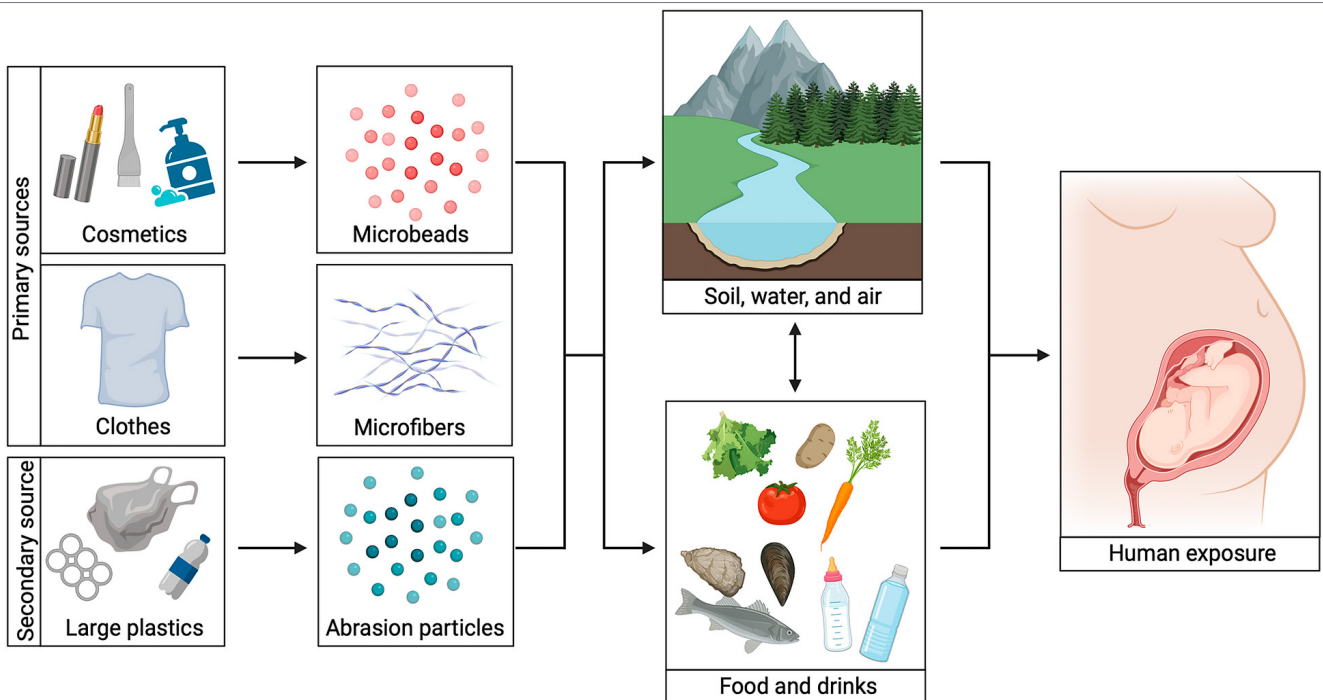


Рисунок 108. Потрапляння МП до організму матері.

Джерело: Hofstede, L. T., Vasse, G. F. & Melgert, B. N. Microplastics: A threat for developing and repairing organs? Cambridge Prisms: Plastics 1, e19 (2023). <https://doi.org/10.1017/plc.2023.19>

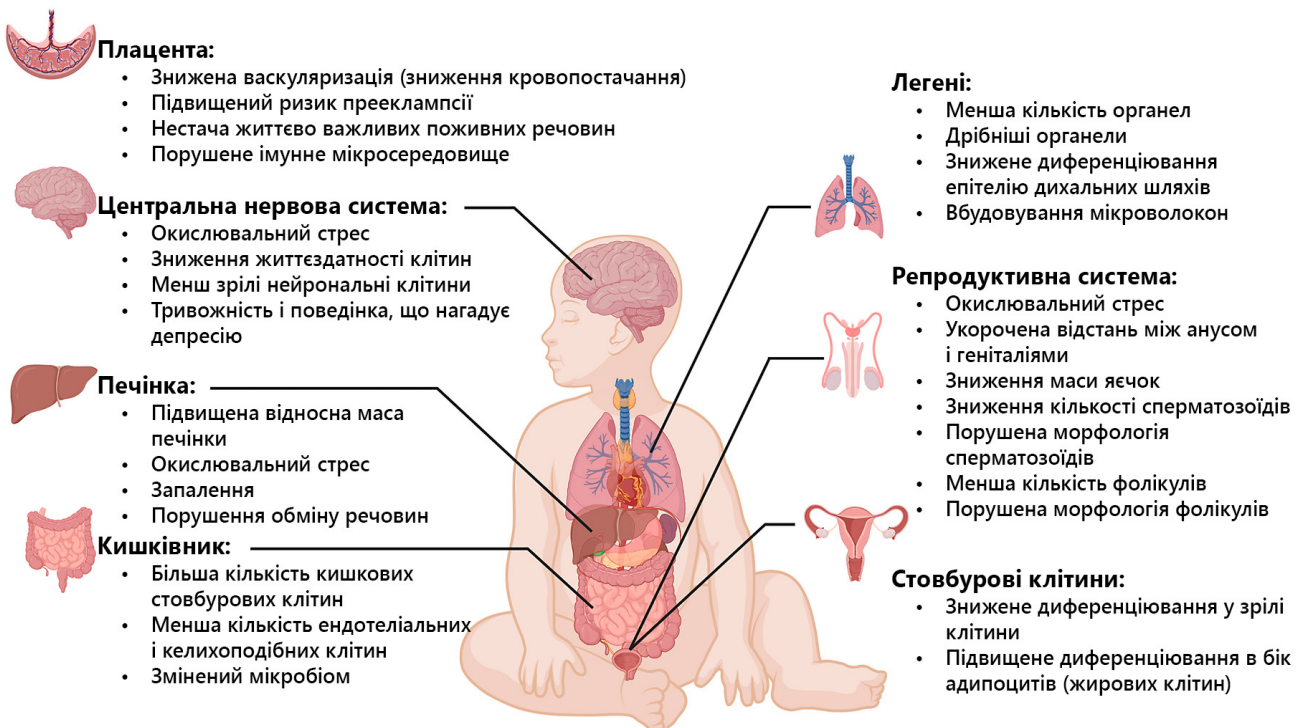


Рисунок 109. Вплив МП на різні органи й тканини плоду, що розвивається.

Джерело: Hofstede, L. T., Vasse, G. F. & Melgert, B. N. Microplastics: A threat for developing and repairing organs? Cambridge Prisms: Plastics 1, e19 (2023). <https://doi.org/10.1017/plc.2023.19>

Дослідження, проведене Університетом Нью-Мексико, засвідчило, що концентрація мікро- й нанопластику в плаценті недоношених дітей вища, ніж у доношених. Аналіз 158 плацент із застосуванням мас-спектрометрії виявив, що у жінок, які народили раніше терміну, накопичення пластикових частинок відбувалося в більшому обсязі²⁹⁵.



«Наночастинки, напевно, мають непрямий вплив на дитину в утробі матері, пригнічуючи утворення кровоносних судин через речовини-посередники»,
— каже біологиня Тіна Бюркі²⁹⁶.

Нанорозмірні частинки полістиролу можуть спричиняти порушення розвитку мозку плода, особливо когнітивні дефіцити²⁹⁷.

Згідно з дослідженнями, вплив МП під час вагітності та в перші місяці життя може призвести до незворотних змін репродуктивної та центральної нервової системи у потомства різних видів²⁹⁸.

Постнатальний вплив мікро- й нанопластику на немовлят

Новонароджені стикаються з безперервним надходженням МНП із зовнішнього середовища.

Згідно з дослідженням 2020 року²⁹⁹, немовлята можуть проковтувати до 4,5 мільйона пластикових частинок на день, тільки лише під час годування з поліпропіленових пляшечок. А це більша частина всіх дитячих пляшечок, використовуваних у світі.

Немовлята також можуть проковтувати мікропластик із молоком матері. У 2022 році аналіз грудного молока 34 здорових жінок виявив мікропластик у 76 % зразків³⁰⁰ (рис. 110). МНП може чинити відкладений вплив, порушуючи процеси формування статевих клітин у дитячому та підлітковому віці й знижуючи фертильність у дорослому стані.

²⁹⁵ Jochum, M. et al. Elevated Micro- and Nanoplastics Detected in Preterm Human Placentae. Preprint (2025). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5903715/v1>

²⁹⁶ Federal Office of Public Health. Impact of pollution on embryonic development - Nanoparticles: Risk for babies in the womb. FOPH. (2024). <https://www.bit.admin.ch/en/nsb?id=101285> (Дата доступу: 01.05.2025).

²⁹⁷ Jeong, B. et al. Maternal exposure to polystyrene nanoplastics causes brain abnormalities in progeny. Journal of Hazardous Materials 426, 127815 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127815>

²⁹⁸ Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. Cureus 16, e60712 (2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.60712>

²⁹⁹ Li, D., Shi, Y., Yang, L. et al. Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation. Nat Food 1, 746–754 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00171-y>

³⁰⁰ Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. Polymers 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>

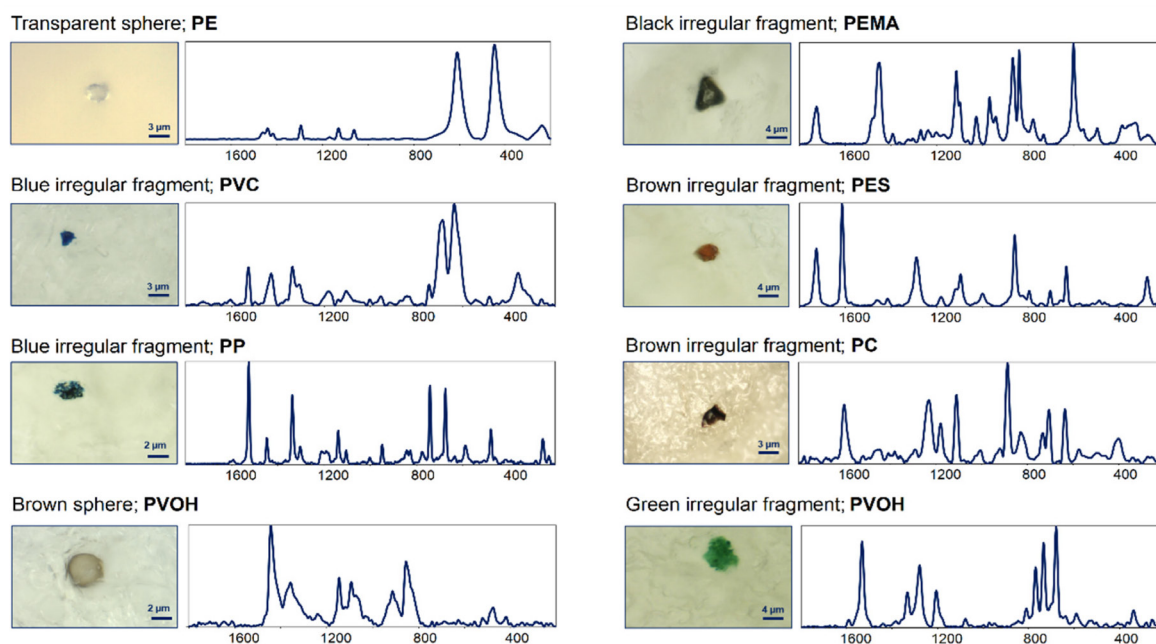


Рисунок 110. Мікрофотографії та спектри комбінаційного розсіювання (хвильові числа, cm^{-1}) деяких обраних МП, виявлених у проаналізованих зразках грудного молока. ПЕ — поліетилен; ПВХ — полівінілхлорид; ПП — поліпропілен; ПВС — полівініловий спирт; ПЕВА — полі(етилен-со-вінілацетат); ПЕМА — полі(етилметакрилат); ПЕМ — поліестер і ПК — полікарбонат.

Джерело: Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. *Polymers* 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>

Додаткові дані свідчать, що рівень МНП у калі немовлят у 14 разів перевищує аналогічні показники у дорослих³⁰¹.

Нанопластики та хімічні речовини, пов'язані з ними, порушують молекулярні структури та функціональність грудного молока. Ці сполуки можуть змінювати білки, що містяться в грудному молоці людини та дитячих сумішах, що може призвести до проблем із розвитком у подальшому^{302 303}.

Високі концентрації МНП чинять кумулятивний токсичний вплив на організм, що розвивається. Проникаючи до клітин, нанопластик може спричиняти структурні пошкодження ДНК і порушувати метаболічні процеси. Ці ефекти підвищують ризики генетичних мутацій і довгострокових патологій, що створює загрозу для здоров'я майбутніх поколінь.

³⁰¹Zhang, J., Wang, L., Trasande, L. & Kannan, K. Occurrence of Polyethylene Terephthalate and Polycarbonate Microplastics in Infant and Adult Feces. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 8, 989–994 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00559>

³⁰²Yadav, A., Vuković, L. & Narayan, M. An Atomic and Molecular Insight into How PFOA Reduces α -Helicity, Compromises Substrate Binding, and Creates Binding Pockets in a Model Globular Protein. *J. Am. Chem. Soc.* 146, 12766–12777 (2024). <https://doi.org/10.1021/jacs.4c02934>

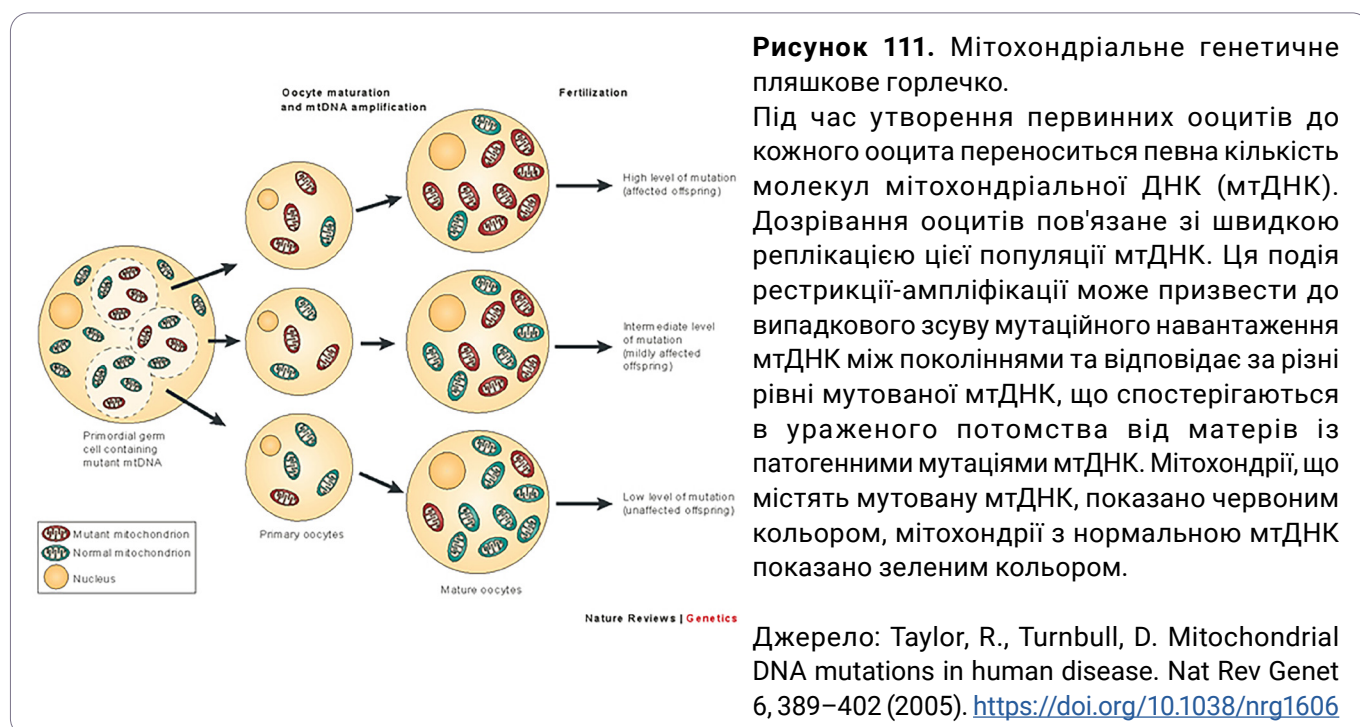
³⁰³Karim, A. et al. Interfacial Interactions between Nanoplastics and Biological Systems: toward an Atomic and Molecular Understanding of Plastics-Driven Biological Dyshomeostasis. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 16, 25740–25756 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsami.4c03008>

Наслідки впливу МНП і його зв'язок із вродженими аномаліями

Окрім своєї властивості з легкістю проникати до тканин і клітин, МНП має ще одну досить небезпечну здатність — передаватися «у спадок» майбутнім поколінням. Під час поділу клітини фрагменти мікро- й нанопластику переходять від клітини до клітини. Крім усього іншого, вони, завдяки своїм малим розмірам і наявності статичного заряду електрики, легко долають гемато-плацентарний бар'єр і проникають до тканин і клітин плода, завдаючи згубного впливу на організм, що розвивається. І насамперед, як уже неодноразово підкреслювалося в доповіді, мікро- й нанопластик спричиняє мітохондріальну дисфункцію.

Нещодавнє менделівське рандомізоване дослідження надало переконливі докази причинного зв'язку між експресією мітохондріальних білків і ризиком вроджених аномалій. У дослідженні використовували генетичні варіанти як інструментальні змінні для мінімізації зміщень, характерних для спостережних даних. Серед 66 ознак мітохондріальних білків вагомі асоціації виявлено з вадами серця, вуха, нервової системи, сечостатевої системи та кінцівок. Це підтверджує гіпотезу про ключову роль мітохондріальної активності в ембріональному морфогенезі³⁰⁴.

Мутації мітохондріальної ДНК (мтДНК), як успадковані, так і *de novo*, спричиняють широкий спектр клінічних синдромів: MELAS, MERRF, NARP, синдром Лея тощо. Вони вражають переважно органи з високим енергетичним споживанням — серце, мозок, м'язи та очі. Передача відбувається виключно по материнській лінії, що зумовлено мітохондріальним походженням ооцита (рис. 111). Такі розлади часто проявляються вже у ранньому віці та характеризуються важкими неврологічними й метаболічними порушеннями.



Джерело: Taylor, R., Turnbull, D. Mitochondrial DNA mutations in human disease. *Nat Rev Genet* 6, 389–402 (2005). <https://doi.org/10.1038/nrg1606>

³⁰⁴Li, X. et al. Mitochondrial proteins and congenital birth defect risk: a mendelian randomization study. *BMC Pregnancy Childbirth* 25, 444 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12884-025-07562-8>

Діти з мітохондріальними розладами нерідко стикаються із затримками розвитку, м'язовою слабкістю, когнітивними порушеннями та порушенням координації. Синдром Кернса-Сейра, синдром Барта, хвороба Альперса та інші захворювання можуть призводити до тяжких наслідків аж до інвалідизації або летального результату.

За останні два десятиліття лікарі фіксують тривожне зростання кількості вроджених вад розвитку у новонароджених. Лише в Китаї частота таких дефектів збільшилася майже втричі — з 99,15 на 10 000 народжень у 2005 році до 290,27 на 10 000 у 2022-му³⁰⁵ (рис. 112). Аналогічна динаміка спостерігається й в інших країнах. Причини цього сплеску багатofакторні, але дедалі більше наукових даних вказують на нову, стрімко зростаючу загрозу — мікропластик і особливо нанопластик здатен проникати до ембріональних тканин і втручатися в процеси формування органів і систем.

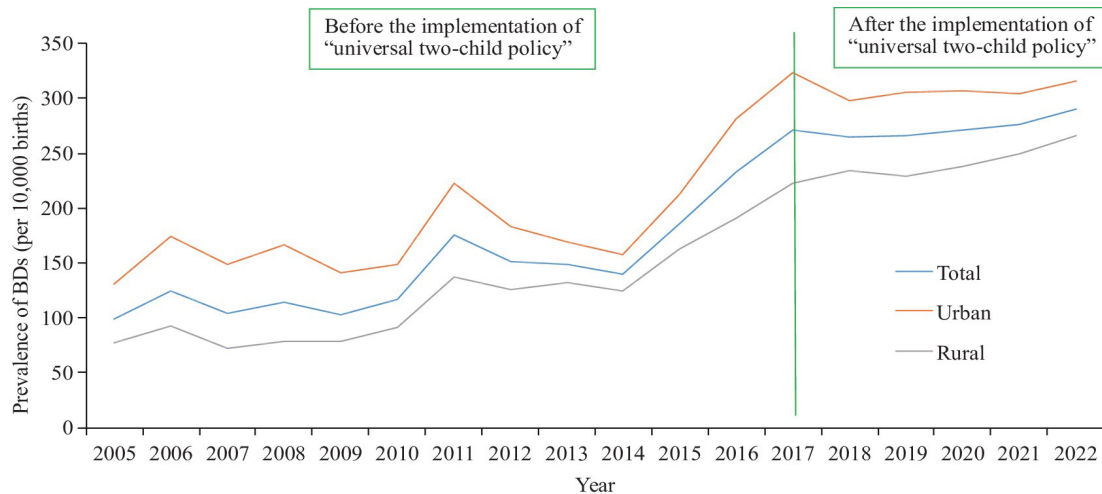


Рисунок 112. Порівняння поширеності вроджених дефектів у міських і сільських районах з 2005 до 2020 року.
Джерело: Wei, W. et al. Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects — Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022. CCDCW 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>

Електростатичний заряд, що його несе нанопластик, є особливо небезпечним в ембріональних тканинах, де кожна помилка — потенційна аномалія. Такі частинки демонструють підвищену адгезію до поверхонь клітин, зокрема до клітин нервового гребеня — критичних учасників формування серця, судин і черепно-лицьових структур. В експерименті на курячих ембріонах нанопластик спричиняв важкі вади, зокрема дефекти серця та великих судин. Однією з аномалій, що найшвидше поширюються, став гастрошизис — вада розвитку передньої черевної стінки, за якої органи плода виходять назовні через дефект шкіри та м'язів (рис. 113, 114, 115). Згідно з міжнародними даними, поширеність гастрошизису зросла на 161 % за останні три десятиліття, а серед матерів віком до 20 років — у кілька разів³⁰⁶. Існує гіпотеза, що нанопластик втручається в розвиток черевної стінки на ранніх термінах вагітності (4–8 тижнів), спричиняючи запалення та порушення закриття передньої частини тіла.

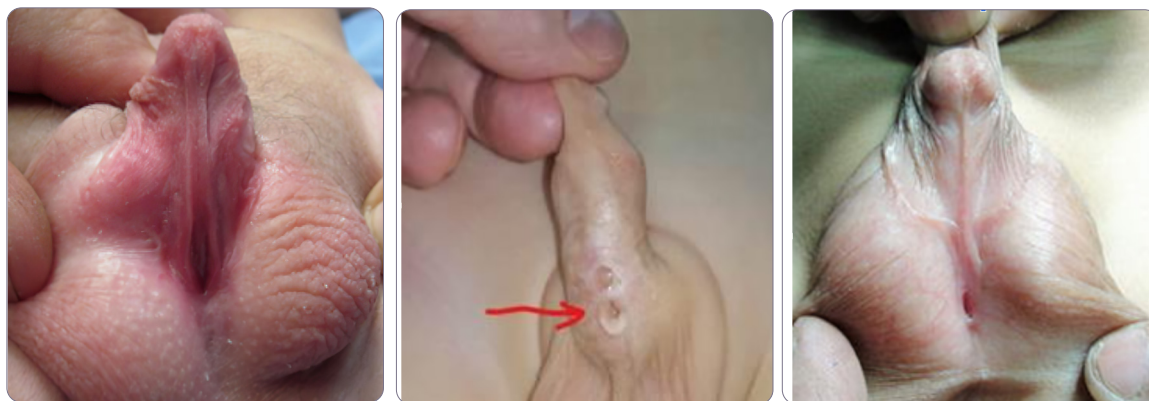
³⁰⁵Wei, W. et al. Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects — Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022. CCDCW 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>

³⁰⁶Feldkamp, M. L. et al. Gastroschisis prevalence patterns in 27 surveillance programs from 24 countries, International Clearinghouse for Birth Defects Surveillance and Research, 1980–2017. Birth Defects Research 116, e2306 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2306>



Рисунки 113–115. Гастрошизис

Інша вада, гіпоспадія, — аномалія, за якої сечовипускальний канал у хлопчиків відкривається в неправильному місці³⁰⁷, — також демонструє стійке зростання (рис. 116, 117, 118). Наприклад, у США з 1997 до 2018 року кількісне збільшення випадків становило близько 1,06 на 1000 живих новонароджених хлопчиків (з 6,1 до 7,16 на 1000), а відсотковий приріст сягнув близько 17 %³⁰⁸. Дослідження на піддослідних тваринах засвідчили, що вплив фталатів, які часто присутні в мікропластику, порушує синтез тестостерону у плодів чоловічої статі.



Рисунки 116–118. Гіпоспадія

Ці речовини, закріплені на зарядженій поверхні нанопластику, легко переносяться в кровотік і плаценту, посилюючи гормональні зрушення в критичні періоди статевого диференціювання. На цьому тлі фіксують зростання частоти синдрому Дауна, трисомії, атріовентрикулярних дефектів серця та інших серйозних порушень із 12,78 на 10 000 живонароджених у 1999–2001 роках до 15,55 на 10 000 у 2016–2020 роках³⁰⁹.

Одночасно спостерігається зростання психоневрологічних проблем у дітей, зокрема тривожних розладів і когнітивних дефіцитів. Хоча прямий причинно-наслідковий зв'язок із мікропластиком ще вивчається, відомі механізми — запалення, епігенетична модуляція та мітохондріальні дисфункції — дають підстави підозрювати його як один із чинників^{307 310}.

³⁰⁷Chen, M. J., Karaviti, L. P., Roth, D. R. & Schlomer, B. J. Birth prevalence of hypospadias and hypospadias risk factors in newborn males in the United States from 1997 to 2012. *Journal of Pediatric Urology* 14, 425.e1-425.e7 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jpurol.2018.08.024>

³⁰⁸Lavoie, C. et al. Comparing the incidence of hypospadias across the United States: A contemporary analysis. *Journal of Pediatric Urology* 21, 627–632 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.jpurol.2025.01.002>

³⁰⁹Stallings, E. B. et al. National population-based estimates for major birth defects, 2016–2020. *Birth Defects Research* 116, e2301 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2301>

³¹⁰Zhang, Y., Wang, J., Yang, H. & Guan, Y. The potential mechanisms underlying phthalate-induced hypospadias: a systematic review of rodent model studies. *Front. Endocrinol.* 15, (2024). <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1490011>

Висновки та перспективи.

Чи можливо знизити вплив МНП на здоров'я людини?

Аналіз сукупних даних демонструє, що мікро- й нанопластик є значущим і недооціненим фактором ризику для здоров'я людини. Сучасні наукові дані переконливо свідчать про те, що мікро- й нанопластик є невід'ємною частиною глобального токсичного тиску на людський організм. Внаслідок своєї здатності долати біологічні бар'єри та накопичуватися в різних тканинах, зокрема в мозку, серці, легенях і плаценті, МНП чинить токсичну дію на молекулярному, клітинному та системному рівнях. У поєднанні з хімічними добавками та адсорбованими забруднювачами довкілля пластик стає фактором, здатним спричиняти хронічне запалення, окислювальний стрес, мітохондріальні дисфункції та мутації ДНК — процеси, що лежать в основі широкого спектра захворювань, включаючи нейродегенеративні, онкологічні, серцево-судинні, ендокринні та аутоімунні порушення. Особливу тривогу викликає той факт, що частинки МНП практично не виводяться, накопичуючись в організмі з віком і посилюючи свій кумулятивний вплив.

Сучасні дані підтверджують, що уникнути контакту з МНП неможливо: він присутній у повітрі, воді, їжі та навіть усередині клітин рослин і тварин, яких ми споживаємо. Отже вплив частинок пластику стає повсюдним і безперервним — від внутрішньоутробного розвитку до пізніх етапів життя. Особливо небезпечним є інгаляційний шлях надходження, за якого наночастинки, минаючи гематоенцефалічний бар'єр, проникають безпосередньо до тканин головного мозку, роблячи центральну нервову систему однією з найбільш уразливих мішеней.

Додатковий біологічний ризик зумовлений електростатичною активністю частинок МНП, яка посилює їхню взаємодію з біологічними структурами та сприяє порушенню гомеостазу. Також наголошується на їхній потенційній ролі в перенесенні патогенів і антибіотикорезистентних мікроорганізмів, що надає проблемі забруднення мікро- й нанопластиком міждисциплінарного характеру, який зачіпає екологію, токсикологію, імунологію, неврологію та репродуктивну медицину.

З огляду на це, у межах стратегії протидії загрозі МНП, одним зі стратегічних напрямів, запропонованих «АЛЛАТРА», є розробка методів нейтралізації або екранування електростатичного заряду нанопластику. Зменшення електростатичної активності таких частинок може значно знизити їхню шкідливість і сповільнити накопичення в організмі. За оцінками авторів доповіді, методи екранування або нейтралізації заряду здатні знизити потенційний ризик, пов'язаний з МНП, щонайменше на 50 %. Це дає змогу виграти необхідний час для розроблення більш комплексних стратегій з діагностики, профілактики та виведення МНП з організму. У цьому контексті особливої значущості набувають подальші дослідження в галузях біофізики, нанотехнологій і молекулярної токсикології.

Незважаючи на зростаючу кількість наукових публікацій на цю тему, вплив МНП на здоров'я людини, як і раніше, залишається мало вивченим, і його недостатньо враховують під час формування стратегій охорони здоров'я та навколишнього середовища. З огляду на масштаби забруднення пластиком, біологічну активність частинок і потенційно незворотні наслідки їхнього впливу, цей напрям потребує пріоритетної уваги з боку наукової спільноти та органів охорони здоров'я, систематизації даних, розроблення стандартів оцінювання ризиків, а також розширення міждержавного та міжнародного наукового співробітництва.

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО МІНІМІЗАЦІЇ ПЛАСТИКОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ

Технології видалення великого пластику з водних екосистем

Ініціативи щодо пом'якшення наслідків забруднення океану переважно зосереджені на видаленні видимого великого сміття з поверхні води. На сьогодні одним із наймасштабніших проєктів, спрямованих на збір пластмас та інших видів плавучих відходів, є ініціатива The Ocean Cleanup. Їхні плаваючі системи вловлюють поверхнєве сміття (рис. 119), яке потім сортується й пакується для подальшої переробки або утилізації.

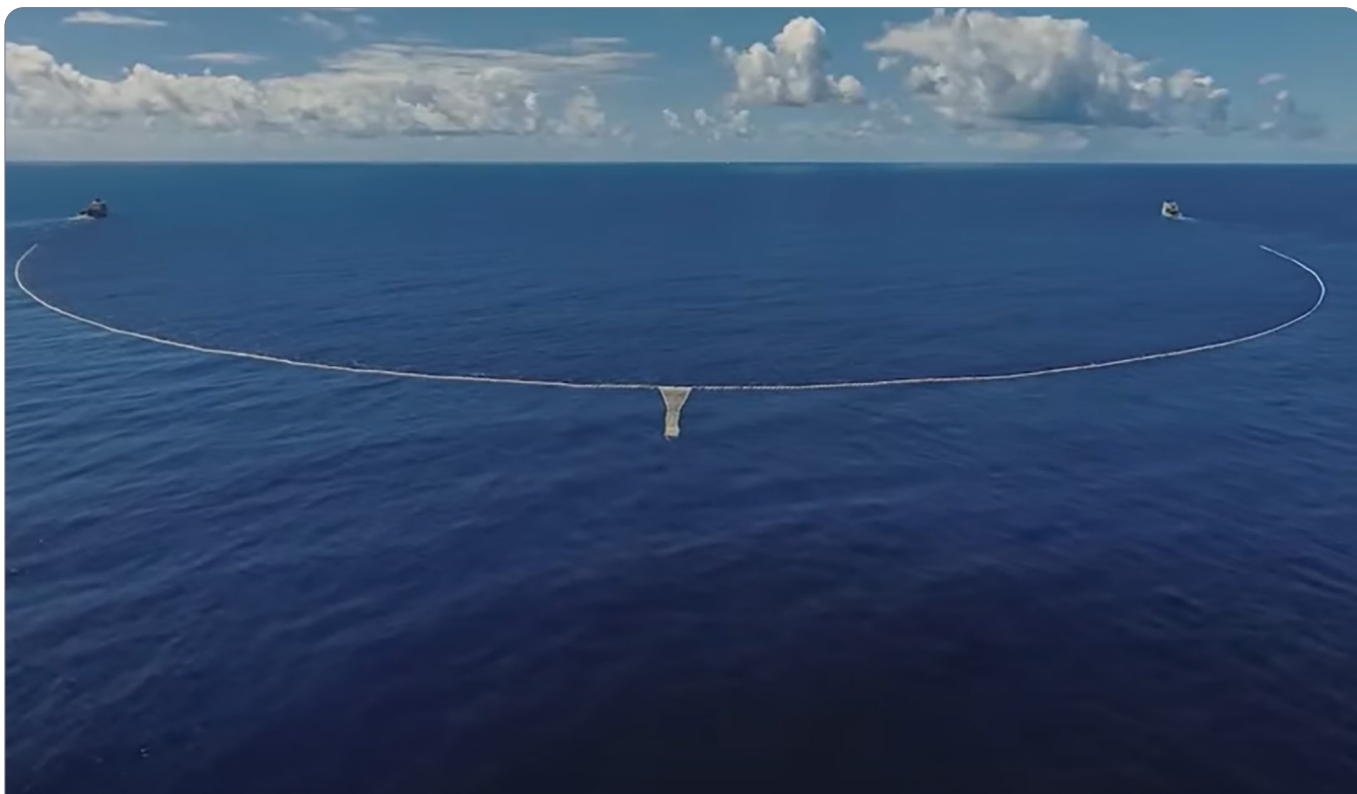


Рисунок 119. На зображенні показано технологію Ocean Cleanup у дії. Довгий U-подібний плавучий бар'єр із міцного матеріалу збирає пластикове сміття на поверхні океану.

Джерело: The Ocean Cleanup. Cleaning up plastic pollution from the oceans. <https://theoceancleanup.com> (Дата доступу: 01.05.2025).

Хоча цей метод виглядає перспективним, важливо враховувати деякі аспекти, що потребують уваги:

1. Процес збору сміття не є вибіркоvim: разом із пластиком у пастку потрапляють живі організми, такі як мікроскопічні водорості, личинки риб і медузи. Наразі відсутні кількісні оцінки обсягу супутнього вилову, проте потенційне великомасштабне вилучення цих організмів може мати негативні наслідки для морських екосистем, викликаючи порушення в природних харчових ланцюгах. Незважаючи на вжиті заходи щодо забезпечення безпеки морських мешканців, проблема залишається невирішеною.

2. Активісти щиро прагнуть очистити океан, однак **вжитих зусиль недостатньо для досягнення значущих результатів.**

Станом на листопад 2024 року ініціативою The Ocean Cleanup вилучено зі Світового океану близько 20 000 тонн пластикових відходів. Це, безумовно, значний результат. Однак у контексті глобальної проблеми він становить лише 0,01 % від загального обсягу пластикового сміття в океані, який оцінюється приблизно в 200 млн тонн. Водночас варто враховувати й надходження нових відходів, що становить близько 11 млн тонн щороку (рис. 120). Ці дані підкреслюють несумірність зусиль з очищення із масштабами проблеми.

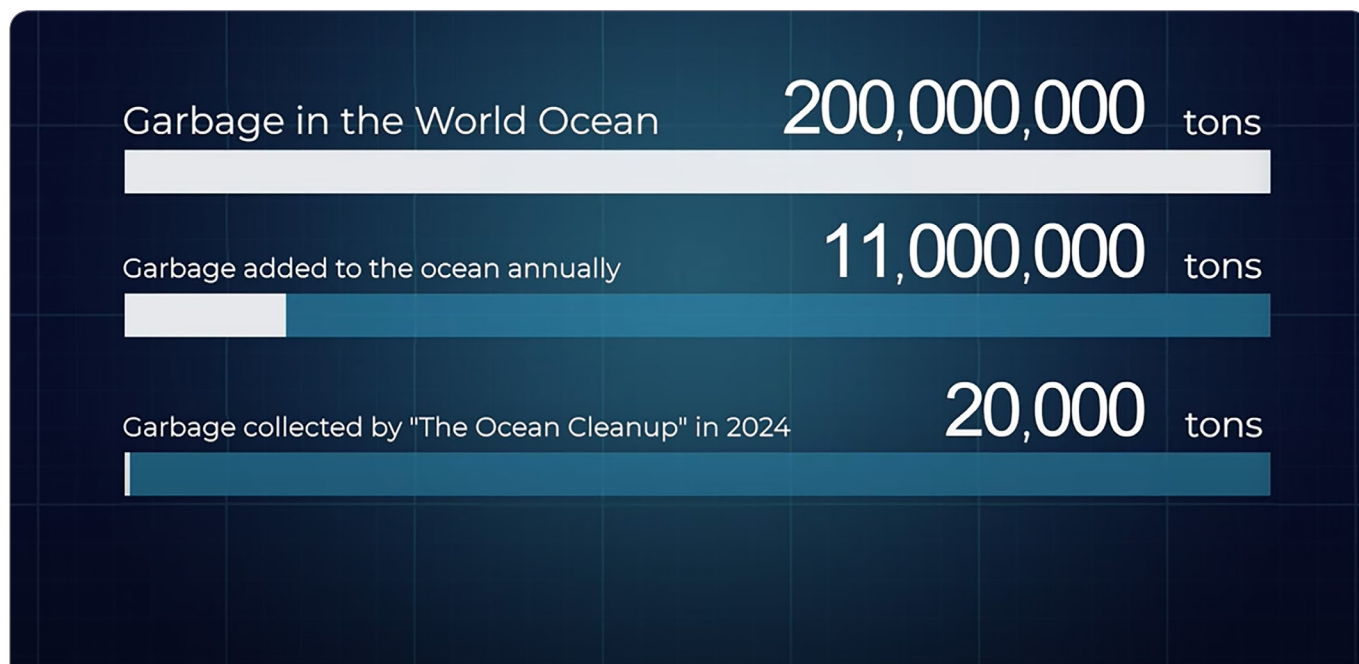


Рисунок 120. Графік порівнює три ключові показники, пов'язані з пластиковим забрудненням океанів: кількість плаваючого пластикового сміття, сміття яке щорічно викидається в океан, та обсяги його вилучення компанією Ocean Cleanup.

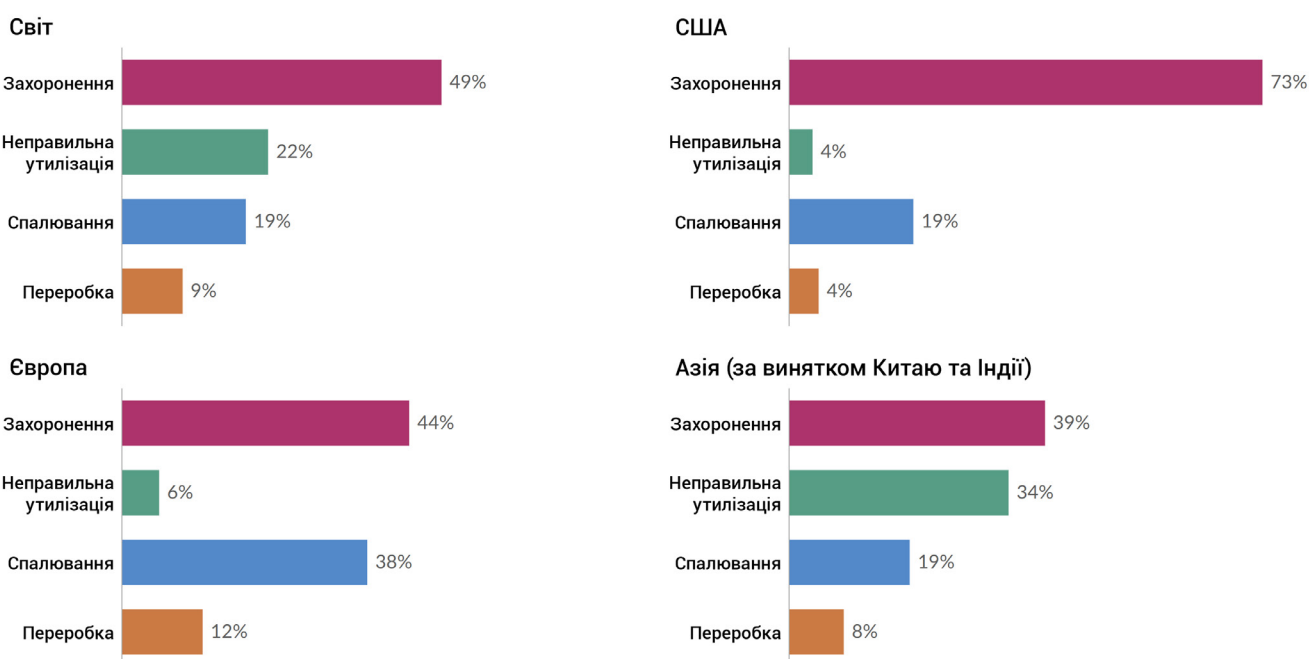
Джерело: The Ocean Cleanup. <https://theoceancleanup.com> (Дата доступу: 01.05.2025).

3. Ключовим питанням залишається подальша доля вилученого пластику. Поточні світові показники переробки пластикових відходів не перевищують 9 % (рис. 121). У зв'язку з цим існує ймовірність, що значна частина зібраного пластику може бути направлена на полігони захоронення відходів, що не вирішує проблему забруднення в довгостроковій перспективі.

Частина пластикових відходів, які переробляються, захоронюються, спалюються та неправильно утилізуються, 2019 р.

Our World
in Data

Неправильно утилізовані пластикові відходи містять матеріали, що спалюються у відкритих кар'єрах, скидаються в моря чи відкриті водойми, або утилізуються на антисанітарних звалищах і полігонах.



Джерело даних: OECD (2023)

OurWorldinData.org/plastic-pollution | CC BY

Примітка: Сукупні значення за регіонами розраховано проєктом Our World in Data на основі даних, наданих OECD¹.

1. OECD regions: The definitions of regions, as stipulated by the OECD, are: - Other OECD America: Chile, Colombia, Costa Rica, Mexico - OECD EU countries: Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany Greece, Hungary, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Netherlands, Poland, Portugal, Slovak Republic, Slovenia, Spain, Sweden - OECD Non-EU countries: Iceland, Israel, Norway, Switzerland, Turkey, United Kingdom - OECD Oceania: Australia, New Zealand - OECD Asia: Japan, Korea - Latin America: Non-OECD Latin American and Caribbean countries - Other EU: Bulgaria, Croatia, Cyprus, Malta, Romania - Other Eurasia: Non-OECD European and Caspian countries, including Russian Federation - Middle East & North Africa: Algeria, Bahrain, Egypt, Iraq, Islamic Rep. of Iran, Kuwait, Lebanon, Libya, Morocco, Oman, Qatar, Saudi Arabia, Tunisia, United Arab Emirates, Syrian Arab Rep., Western Sahara, Yemen - Other Africa: Sub-Saharan Africa - China: People's Republic of China, Hong Kong (China) - Other non-OECD Asia: Other non-OECD Asian and Pacific countries

Рисунок 121. Частка пластикових відходів, які переробляються, захоронюються, спалюються та неправильно утилізуються, 2019 р. Неправильно утилізовані пластикові відходи включають матеріали, що спалюються у відкритих кар'єрах, скидаються до морів або відкритих водойм або утилізуються в антисанітарні звалища й полігони.

Джерело: регіональні зведені дані було розраховано компанією Our World in Data, і вони базуються на даних, зазначених ОЕСР. [OurWorldinData.org/plastic-pollution](https://ourworldindata.org/plastic-pollution) | CC BY
<https://ourworldindata.org/grapher/share-plastic-fate?time=2019..latest>

Крім того, операції з очищення океану пов'язані зі значними фінансовими витратами. Наприклад, віддаленість Великої тихоокеанської сміттевої плями від територіальних вод будь-яких держав створює ситуацію, за якої відповідальність за фінансування та проведення очисних заходів не визначена. За оцінкою Чарльза Мура — океанографа й дослідника, першовідкривача Великої тихоокеанської сміттевої плями, повномасштабне очищення цієї плями приведе до банкрутства будь-яку країну, яка здійснила б подібні зусилля. Слід зазначити, що в Світовому океані ідентифіковано п'ять подібних сміттевих скупчень (рис. 122), що поглиблює проблему.

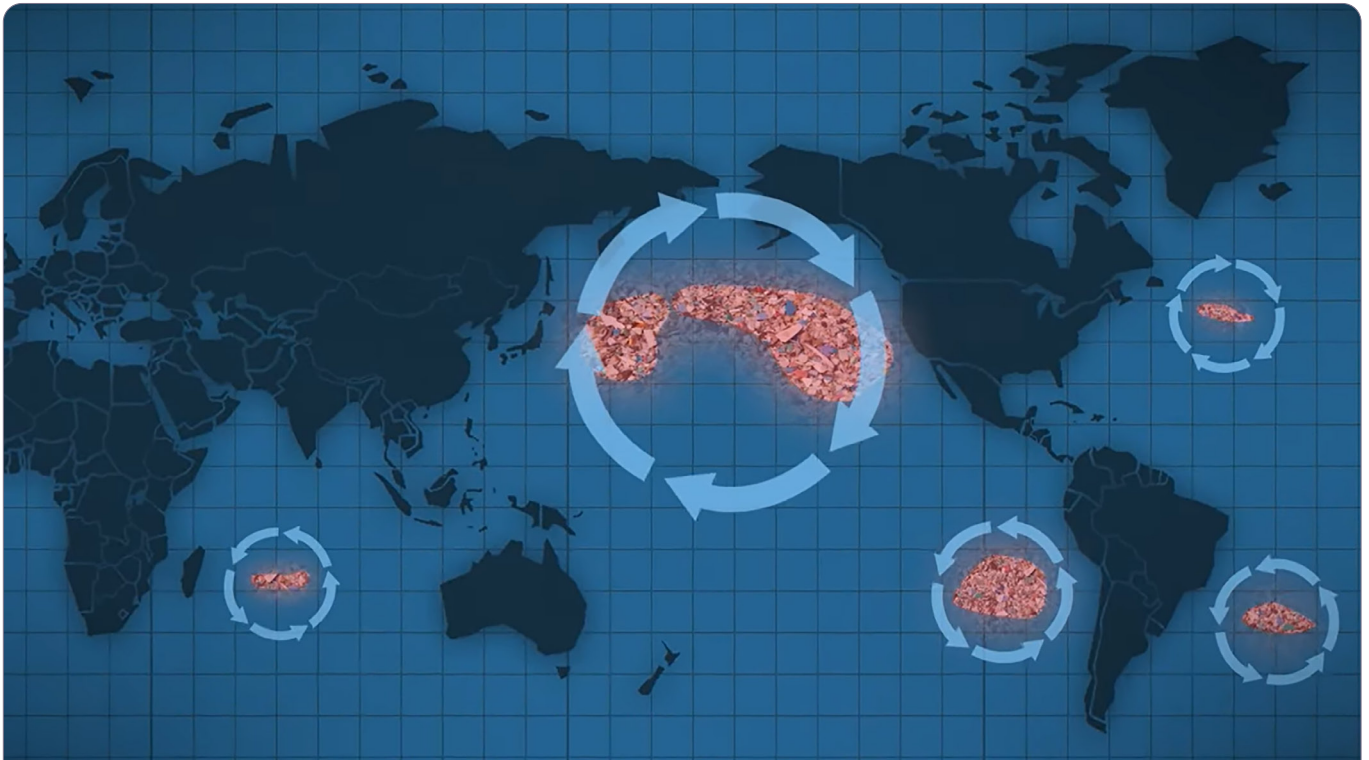


Рисунок 122. Схематичне зображення розташування п'яти основних сміттевих скупчень у Світовому океані.

Важливо зазначити, що видиме велике сміття становить лише частину загальної проблеми пластикового забруднення океану. За словами Мелані Бергманн, морської біологині Інституту Альфреда Вегенера, «йдеться лише про пластик на поверхні океану, до того ж це лише невелика частина, менше 1 % від того, що насправді знаходиться в океані».

Із фрагментацією пластику на мікро- й наночастинки завдання очищення океану від даного виду забруднення значно ускладнюється. Деякі експериментальні технології для видалення мікропластику з води вже існують. Наприклад, дослідники з Сичуанського університету розробили мініатюрну рибку-робота (рис. 123), яка здатна плавати у водному середовищі та адсорбувати прилеглі вільно плаваючі шматочки мікропластику³¹¹. Цей біонічний робот довжиною 13 мм ефективно збирає частинки мікропластику завдяки міцним хімічним зв'язкам і електростатичній взаємодії між матеріалами його корпусу та компонентами мікропластику, такими як органічні барвники, антибіотики та важкі метали.

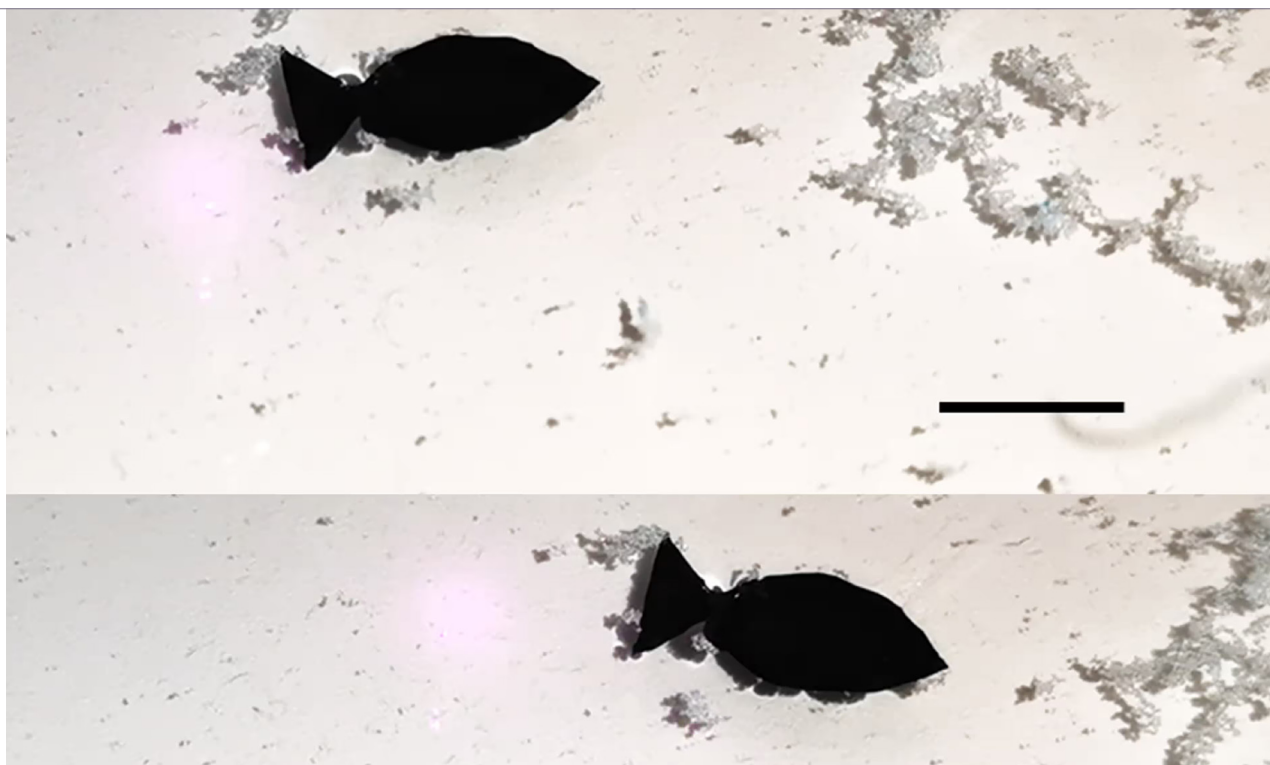


Рисунок 123. На зображенні показана мініатюрна рибка-робот, розроблена дослідниками Сичуанського університету. Компактний пристрій, що нагадує справжню рибу, плаває у водному середовищі, активно адсорбуючи вільно плаваючі шматочки мікропластику.

<https://www.theguardian.com/environment/2022/jun/22/scientists-unveil-bionic-robo-fish-to-remove-microplastics-from-seas>

Проте, незважаючи на такі інновації, практичне застосування подібних технологій у глобальному масштабі на даний момент обмежене. Мініатюрні роботи адсорбують мікропластик у безпосередній близькості від себе, що робить процес локальним; навіть у великій кількості вони не здатні охопити обсяги Світового океану. Крім того, вони самі можуть стати частиною харчового ланцюга. Також існують невизначеності щодо здатності роботів функціонувати в складних умовах океану (течії, тиск, солоність). Отже, існуючі рішення поки що недостатньо ефективні та стикаються зі складнощами масштабування.

³¹¹Wang, Y. et al. Robust, Healable, Self-Locomotive Integrated Robots Enabled by Noncovalent Assembled Gradient Nanostructure. Nano Lett. 22, 5409–5419 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c01375>

Чинні методи очищення від мікро- й нанопластику

Дедалі активніше розглядається потенційне застосування мікроорганізмів, особливо бактерій, для ферментативного розкладання синтетичних полімерів, перш за все поліетилентерефталату (ПЕТ). Ця технологія позиціонується як потенційно екологічно безпечна альтернатива традиційному методу утилізації пластикових відходів — спалюванню. Однак накопичені на даний момент емпіричні дані дозволяють сумніватися в її ефективності, безпеці та можливості застосування в промисловому масштабі.

2016 року команда японських вчених під керівництвом Сьосукі Оди відкрила бактерію *Ideonella sakaiensis*, здатну розкласти поліетилентерефталат за допомогою двох ферментів — ПЕТази та МЕТази. Це стало важливою подією в мікробіології³¹². Однак лабораторні дослідження показали, що процес розкладання є вкрай повільним: на деградацію пластикової плівки масою 20 г у бактерій пішло близько семи тижнів за оптимальних умов. Очевидно, що така швидкість утилізації не може бути визнана задовільною для вирішення проблеми забруднення пластиком. У масштабах світового забруднення, де мільйони тонн пластику потрапляють до природи щороку, така швидкість порівнянна зі спробою вичерпати океан чайною ложкою.

Наукові зусилля зосередилися на модифікації ферменту ПЕТази, який бактерія використовує для руйнування пластику. Однак, як визнають самі дослідники, фермент *Ideonella sakaiensis* знаходиться на ранній стадії еволюції. Його ефективність низька, стабільність обмежена, а прискорення реакції вимагає температур, невластивих природному середовищу. Навіть генна інженерія поки не може передбачити, які мутації дійсно приведуть до поліпшення. Йдеться про «два кроки вперед, один назад», як висловилася Елізабет Белл із Національної лабораторії відновлюваної енергії США.

Крім того, ферментативне руйнування далеко не є універсальним. Лише деякі типи пластику (наприклад, ПЕТ) теоретично піддаються такому розкладанню. Поліетилен, поліпропілен та інші широко використовувані матеріали залишаються практично несприйнятливими до розкладання мікроорганізмами. І вчені з *Nature* стверджують, що більшість пластиків занадто енергоємні для ефективного біохімічного руйнування.

Навіть якщо уявити, що з'явиться такий високоефективний мікроб, виникає набагато тривожніше запитання: чи можна його безпечно випустити в навколишнє середовище?

Будь-яка генетично модифікована бактерія — це потенційне джерело екологічної катастрофи. Наразі майже всі країни суворо регулюють або повністю забороняють випуск таких організмів у дику природу.

³¹²Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science* 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

Причини очевидні: невідомо, як бактерія поведеться після «виконання своєї місії». Чи не почне вона руйнувати інші важливі органічні сполуки? Чи не витіснить інші мікроби? Чи не призведе до мутацій з дедалі непередбачуванішими наслідками?

Таким чином, одна екологічна проблема може бути легко замінена іншою — набагато більш непередбачуваною та руйнівною.

Незважаючи на безсумнівне значення фундаментальних досліджень в області бактеріальної переробки пластмас, на поточному етапі ця технологія не може розглядатися як ефективне, масштабоване та безпечне рішення проблеми пластикового забруднення.

Дослідження впливу кип'ятіння води на видалення мікропластику: ефективність і ризики

Фахівці в галузі біомедичної інженерії та вивчення мікропластику з Медичного університету Гуанчжоу та Цзінаньського університету (Китай) провели дослідження³¹³. Експеримент був спрямований на вивчення впливу кип'ятіння води з підвищеним вмістом солей кальцію (жорсткої води) на видалення мікропластику.

Для дослідження було взято зразки водопровідної води різної жорсткості з міста Гуанчжоу. У воду додали 3 види пластикових частинок — полістирол, поліетилен і поліпропілен, розміром від 0,1 до 150 мікрометрів. Зразки кип'ятили протягом 5 хвилин, після чого охолоджували та вимірювали залишковий вміст мікропластику.

Під час кип'ятіння в жорсткій воді, насиченій солями кальцію, утворюється нерозчинний карбонат кальцію (CaCO_3), відомий як накип. Дослідники припустили, що частинки мікропластику можуть зв'язуватися з кристалами карбонату кальцію й випадати в осад, що пояснює зниження концентрації мікропластику в кип'яченій воді.

Ефективність очищення виявилася найбільшою в зразках з високою жорсткістю (300 мг CaCO_3 на літр), де кип'ятіння дозволило видалити до 90 % мікропластику. У зразках із м'якою водою (менше 60 мг CaCO_3 на літр) ефект був значно нижчим: було видалено лише 25 % пластикових частинок.

Однак, незважаючи на певний позитивний ефект від кип'ятіння жорсткої води, виникає важливе питання: можливість потрапляння мікро- й нанопластику до повітря. При кип'ятінні води виділяється водяна пара, з якою частинки мікропластику потрапляють у повітря. Вдихання таких частинок становить серйознішу загрозу, ніж їх споживання з їжею або водою.

³¹³Yu, Z., Wang, J.-J., Liu, L.-Y., Li, Z. & Zeng, E. Y. Drinking Boiled Tap Water Reduces Human Intake of Nanoplastics and Microplastics. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 11, 273–279 (2024). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.4c00081>

Дослідження показують, що при вдиханні нанопластик за 2 години може проникнути в головний мозок, тоді як при потраплянні до травної системи мікропластик частково виводиться з організму. Потрапляння пластику в мозок пов'язане з довгостроковими ризиками, оскільки виведення таких частинок із тканин мозку неможливе.

Таким чином, метод кип'ятіння води потенційно збільшує ризик забруднення повітря мікропластиком, що може виявитися небезпечнішим для здоров'я людини. Це підкреслює необхідність розробки більш безпечних та ефективних методів очищення води.

Піроліз як метод переробки пластику: ефективність і ризики

Піроліз є однією з технологій переробки пластику, заснованою на його термічному розкладанні при високих температурах у середовищі з обмеженим доступом кисню. Процес зазвичай відбувається за температур від 300 до 800 °C і дозволяє отримувати газоподібні та рідкі вуглеводневі сполуки, а також твердий залишок у вигляді вуглецю.

При високотемпературному розкладанні полімерні ланцюжки пластику розпадаються, утворюючи суміш вуглеводнів, яка може бути використана як паливо. Однак цей метод, поряд із традиційним спалюванням пластику, супроводжується значними екологічними ризиками, пов'язаними з викидами нанопластику.

Під впливом високих температур пластик руйнується до найдрібніших частинок, зокрема до нанопластику (розміром менше 100 нанометрів). Ці частинки настільки малі, що сучасні системи фільтрації не здатні повністю їх затримувати, внаслідок чого вони потрапляють до атмосфери.

Спалювання пластмас також супроводжується виділенням діоксинів і фуранів — високотоксичних сполук, які мають канцерогенний ефект³¹⁴.

Отже, використання піролізу та спалювання пластику для отримання палива супроводжується значним ризиком викидів в атмосферу, що становить загрозу не лише екології, але й здоров'ю людини. Такий метод утилізації пластику не може вважатися безпечним і стійким рішенням проблеми забруднення навколишнього середовища. Ціна такого палива — це загроза життю та здоров'ю людей.

³¹⁴Baca, D. et al. Dioxins and plastic waste: A scientometric analysis and systematic literature review of the detection methods. *Environmental Advances* 13, 100439 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100439>

ПІДХОДИ НАУКОВОЇ СПІЛЬНОТИ «АЛЛАТРА» ДО БОРОТЬБИ З ЕПІДЕМІЄЮ МІКРО- ТА НАНОПЛАСТИКУ

Технологія атмосферних генераторів води (АГВ) для очищення океану від МНП

Відновлення екологічної рівноваги вимагає масового впровадження інноваційних технологій, таких як атмосферні генератори води (АГВ). На сьогодні такі установки представлені в широкому діапазоні, від побутових до промислових моделей. Ці пристрої здатні виробляти питну воду з повітря, ефективно видаляючи забруднювачі, зокрема мікропластик (рис. 124). Для поліпшення смаку та якості воду також можна мінералізувати.

Принцип роботи генераторів заснований на конденсації вологи, що міститься в повітрі.

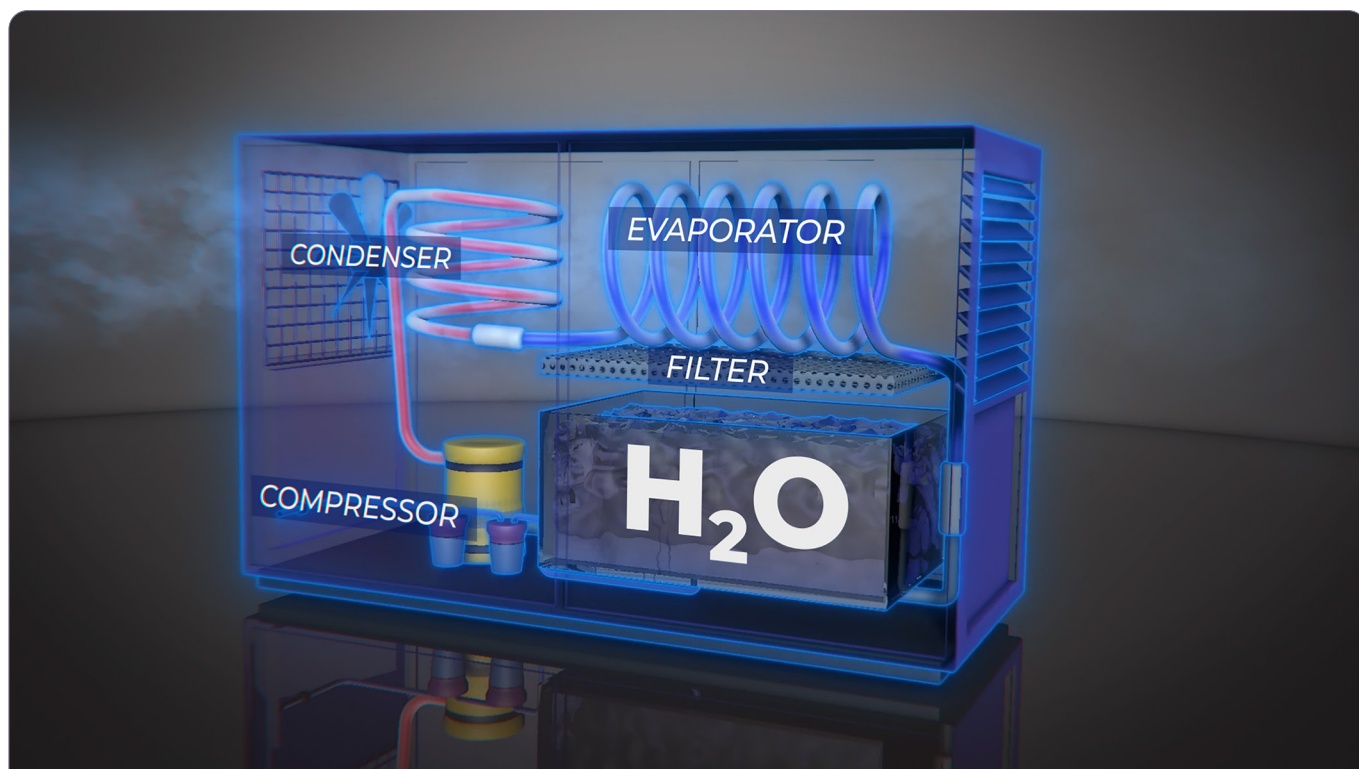


Рисунок 124. На рисунку представлено схематичне зображення атмосферного генератора води, що ілюструє його складові частини та принцип роботи

АГВ працюють за двома основними технологіями:

1. Технологія, що базується на конденсації. За цим методом навколишнє повітря втягується у пристрій і піддається впливу холодної поверхні / охолоджуючої спіралі, внаслідок чого водяна пара конденсується в рідину. Цей процес схожий на те, як волога утворюється на холодному предметі, який дістали з морозильної камери. Конденсаційні АГВ найкраще працюють у теплому й вологому середовищі.

2. Технологія, що ґрунтується на адсорбції. Для вловлювання вологи з повітря використовуються вологопоглинаючі матеріали, такі як силікагель, цеоліти або металоорганічні каркаси. Ввібрана вода потім вивільняється при нагріванні матеріалу.

Сьогодні такі установки локально використовуються для забезпечення населення питною водою, зокрема в ситуаціях, пов'язаних із кліматичними катастрофами.

Широкомасштабне застосування АГВ для задоволення потреб як промисловості, так і населення може забезпечити значне зниження рівня забруднення океанів протягом декількох років.

Наразі джерелом води для побутових потреб, зокрема для приготування їжі, служать водойми, які часто містять високі рівні мікро- й нанопластику. Ця вода сприяє накопиченню пластику в організмі людини. Перехід до видобутку води з повітря, а не з забруднених джерел, може істотно поліпшити якість води, що споживається.

Відновлення екосистем через природну фільтрацію та атмосферні генератори води

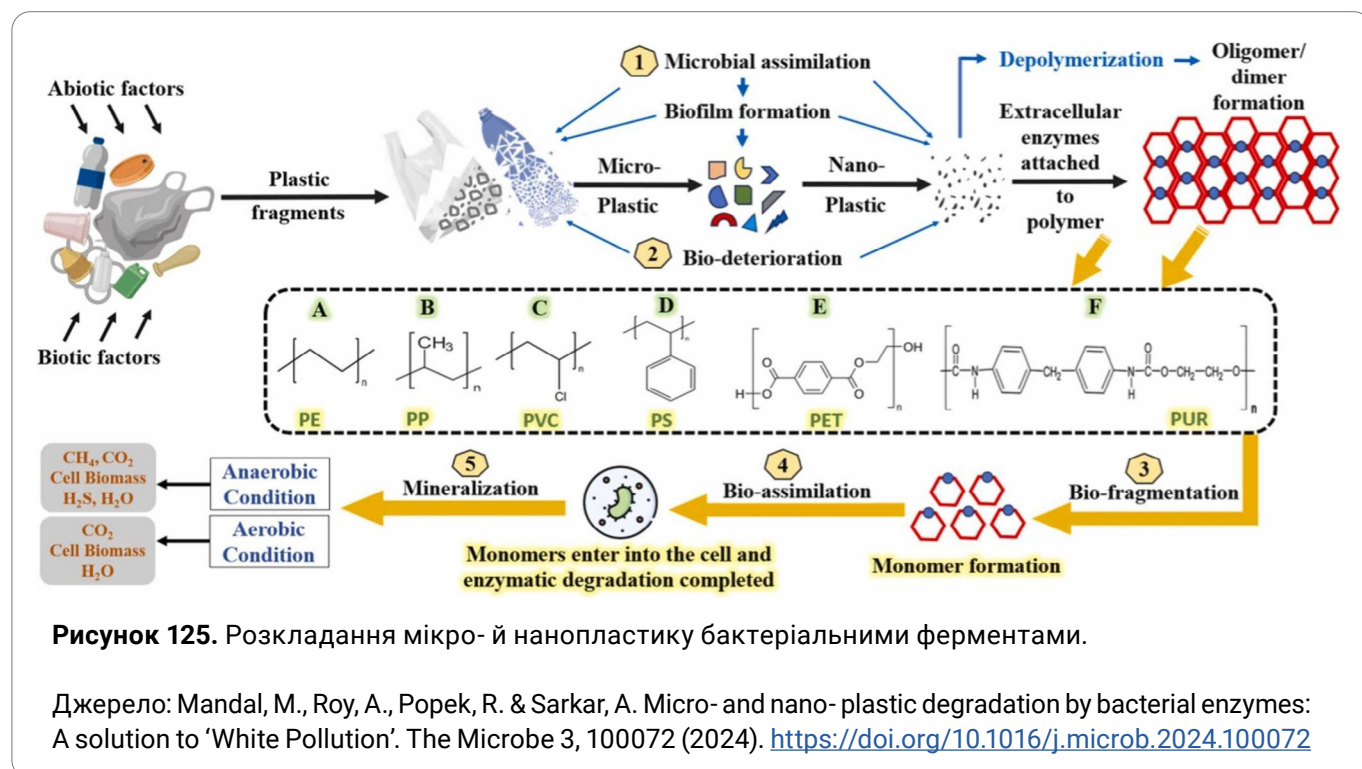
Для ефективного видалення мікропластику з використаної води необхідно застосовувати інноваційні технології, сучасні фільтраційні та асиміляційні системи. Крім того, важливо переоснастити очисні споруди таким чином, щоб використана вода після очищення не скидалася у водойми, а спрямовувалася в ґрунт, оскільки у ґрунті мешкають мікроорганізми, які природним чином здатні переробляти пластик³¹⁵.

Ці організми істотно відрізняються від генетично модифікованих або штучно створених у лабораторних умовах. Їх присутність в екосистемах залишається природною, і вони не виявляють ознак інвазивних видів у цьому середовищі.

³¹⁵Park, S. Y. & Kim, C. G. Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a landfill site. Chemosphere 222, 527–533 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.159>

Дослідження³¹⁶ свідчать, що низка ґрунтових мікробів, які живуть у природному середовищі³¹⁷, демонструють значну ефективність у розкладанні полімерів³¹⁸, таких як поліетилен³¹⁹ і поліетилентерефталат³²⁰. Наприклад, найбільша активність грибової деградації — середнє зниження маси поліетилену на $36,4 \pm 5,53$ % за 16 тижнів — була відзначена у штаму *Aspergillus oryzae* A5, 1.

Здатність мікробів до біорозкладу полімерів обумовлена тим, що вони виробляють ферменти, які дозволяють розщеплювати складні молекулярні структури пластиків³¹⁷.



Ці дані, підтверджені експериментальними спостереженнями, вказують на потенціал використання природних мікробних угруповань для зниження рівня забруднення довкілля мікро- й нанопластиком.

«Серед кількох методів рекультивачії, доступних на сьогодні, мікробна рекультивачія демонструє найкращі перспективи для розкладання або стійкого видалення мікропластику з навколишнього середовища», — йдеться в оглядовому дослідженні³¹⁷.

³¹⁶Auta, H. S. et al. Enhanced microbial degradation of PET and PS microplastics under natural conditions in mangrove environment. Journal of Environmental Management 304, 114273 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114273>

³¹⁷Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to 'White Pollution'. The Microbe 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>

³¹⁸Auta, H. S., Emenike, C. U., Jayanthi, B. & Fauziah, S. H. Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by Bacillus sp. and Rhodococcus sp. isolated from mangrove sediment. Marine Pollution Bulletin 127, 15–21 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.036>

³¹⁹Muhonja, C. N., Makonde, H., Magoma, G. & Imbuga, M. Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. PLOS ONE 13, e0198446 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198446>

³²⁰Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). Science 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

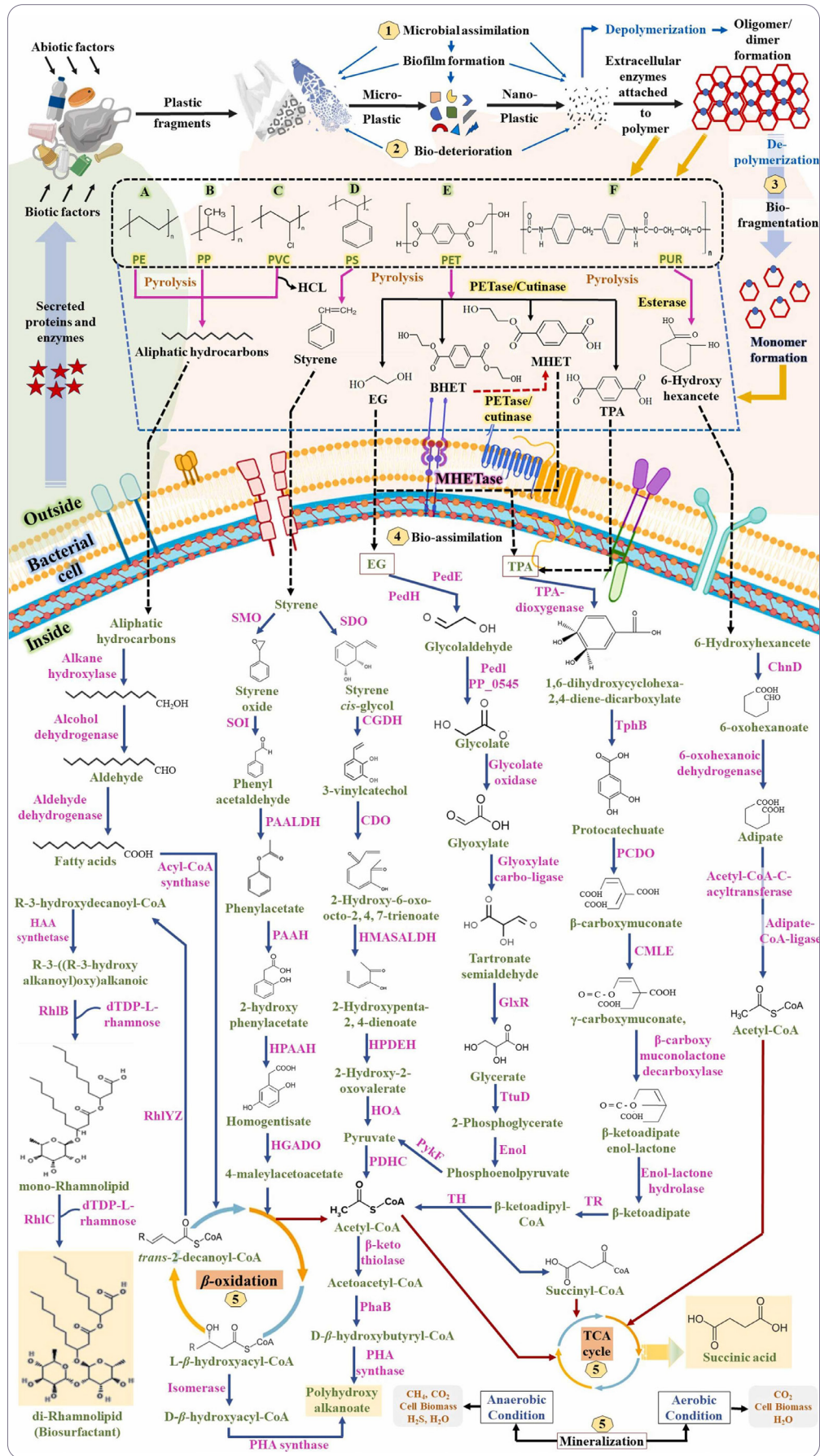


Рисунок 126. Відходи пластику розкладаються на МНЧ з огляду на різноманітні абіотичні та біотичні фактори.

Джерело: Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to 'White Pollution'. The Microbe 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>

Таким чином, перехід до технології видобутку води з повітря значно поліпшить якість споживаної води, і, в поєднанні з технологією мікробної рекультивації, це сприятиме значному зниженню мікро- й нанопластикового забруднення у довкіллі.

У верхніх шарах ґрунту, як і у водоймах, концентрація пластику деякий час залишатиметься високою. Однак у процесі проникнення води на велику глибину відбудеться самоочищення (рис. 127). Мікроорганізми, що живуть у ґрунті, сприятимуть розкладанню дрібних частинок нанопластику.

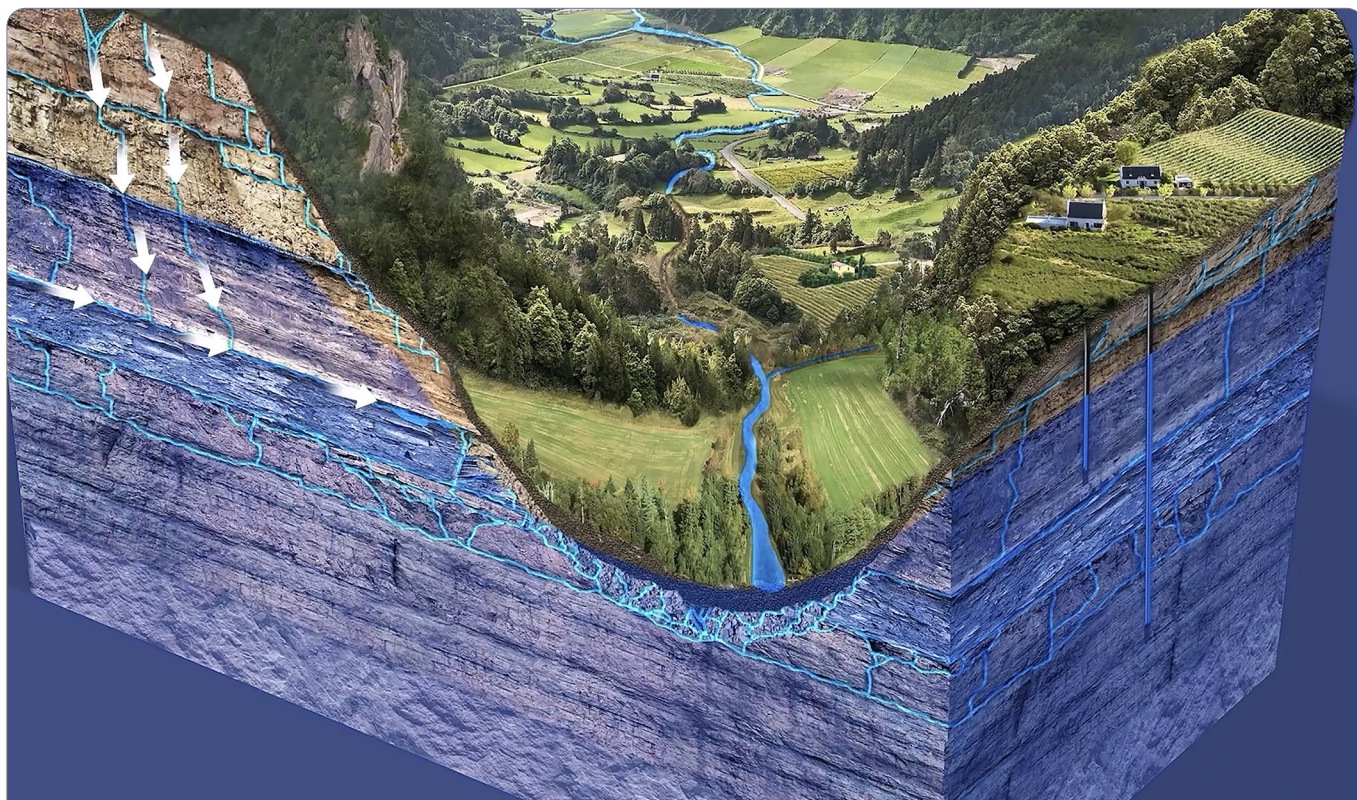


Рисунок 127. Схематичне зображення процесу біологічного доочищення води, що зливається до ґрунту, через геологічні породи. Стрілки показують шлях стічних вод, що проходять через шари ґрунту й порід, де мікроорганізми та фільтрувальні матеріали видаляють забруднення. Шари ґрунту позначені різними кольорами: коричневий — для верхнього шару, сірий — для піску та гравію.

Збільшення обсягу використаної та відфільтрованої на очисних спорудах води, що зливається в ґрунт, сприяє розмноженню мікроорганізмів, зокрема бактерій, грибів і архей, які відіграють основну роль у формуванні здорового ґрунту, кругообігу поживних речовин і стійкості екосистем. Надалі очищена вода просочуватиметься до глибших шарів і повертатиметься в океани.

Розміщення установок атмосферних генераторів води в пустельних регіонах, а також повернення використаної води до ґрунту видається перспективним рішенням для подолання водної кризи та боротьби з опустелюванням, адже активізує процеси, які сприяють відновленню рослинності³²¹ та екосистем.

³²¹Islam, W., Zeng, F., Alotaibi, M. O. & Khan, K. A. Unlocking the potential of soil microbes for sustainable desertification management. *Earth-Science Reviews* 252, 104738 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104738>

Використання АГВ приведе до поліпшення якості життя місцевого населення, вирішуючи проблему нестачі питної води. У поєднанні з мікробною рекультивацією застосування АГВ може стати важливим кроком до сталого управління водними ресурсами та відновлення деградованих земель.

Повний перехід на АГВ передбачає використання атмосферної води для всіх потреб населення, зокрема, побутові, промислові та сільськогосподарські. Впровадження цієї технології в глобальному масштабі забезпечить інтенсивніше випаровування, що призведе до охолодження океану, а також прискорить його очищення. Крім того, зниження надлишкової вологи в атмосфері за допомогою АГВ зменшить кількість екстремальних опадів і вітрів, що може пом'якшити руйнівний вплив природних катаклізмів (докладніше — у фільмі «Вода з повітря. Шлях до порятунку людства»).

Виклики та ризики, пов'язані із застосуванням атмосферних генераторів води

Однак існує й зворотний бік глобального застосування АГВ. Проблема полягає в тому, що в контексті застосування технологій атмосферної генерації води не враховується безпосередньо її вплив на людину. Хоча застосування цієї технології насправді може сприяти очищенню океанічних вод і поліпшенню теплопровідності, однак масштабне застосування АГВ також може призвести до значного збільшення концентрації мікропластику в атмосфері.

Механізм функціонування АГВ полягає в конденсації вологи з атмосфери, яка згодом поповнюється за рахунок випаровування з океанічних вод. Оскільки ці води містять високі рівні мікропластику та нанопластику, волога, що надходить в атмосферу під час цього процесу, може транспортувати найдрібніші пластикові частинки. Як наслідок, у тих регіонах, де буде застосовано ці технології, зокрема у великих мегаполісах, рівні нанопластику в повітрі, що вдихається, можуть досягти тих самих показників, які наразі спостерігаються в прибережних зонах. Це створює ризик збільшення концентрації нанопластику в повітрі, що становить загрозу для здоров'я людини. Вдихання нанопластику сприяє його накопиченню в організмі, зокрема в головному мозку.

І це — ключовий момент. Необхідно розуміти, що сама ідея використання АГВ як засобу очищення океанічних вод була висунута вченими «АЛЛАТРА» понад 20 років тому — в умовах, коли концентрація мікропластику в атмосфері залишалася вкрай низькою. У той період реалізація подібних технологій могла дійсно принести відчутну екологічну користь без серйозного ризику для людини. Однак сьогодні ситуація кардинально змінилася. Масове застосування АГВ у сучасних умовах, навпаки, призведе насамперед до збільшення концентрації МНП у повітрі — тепер, за вже високих рівнів МНП в атмосфері, додавання додаткових обсягів через АГВ може стати фатальним для здоров'я людей.

Таким чином, технологія, колись перспективна та інноваційна, втратила свою актуальність. Ми як людство проґавили той критично важливий момент, коли АГВ могли б стати порятунком. Часовий фактор у питаннях клімату та забруднення довкілля відіграє вирішальну роль. Те, що могло зберегти здоров'я мільйонам людей і дійсно очистити планету два десятиліття тому, сьогодні стало потенційно небезпечним.

АГВ — більше не технологія майбутнього, а нагадування про втрачену можливість. У нинішніх реаліях пріоритетом мають бути розробки, які дадуть змогу вивести МНП з атмосфери та з людського організму. Насамперед нам необхідно виграти час.

Інноваційний науковий підхід до зниження токсичності мікро- й нанопластику

З урахуванням представлених даних щодо багаторівневого та кумулятивного впливу мікропластику й особливо нанопластику на здоров'я людини, стає очевидним: сучасна цивілізація стикається з еколого-біомедичним викликом, який виходить за межі традиційних уявлень про забруднення довкілля. Ця проблема зачіпає не лише окремі біосфери, але й стійкість популяції *Homo sapiens* у довгостроковій перспективі.

На сьогодні практично весь вироблений пластик — понад 9 мільярдів тонн — продовжує накопичуватися в навколишньому середовищі, піддаючись фрагментації до мікро- й нанорозмірів, які мають високу хімічну та біологічну активність. Мікро- й нанопластик виявляють у ґрунті, воді, повітрі та в усіх основних категоріях харчових продуктів — від овочів і фруктів до м'яса, риби, меду, молока та солі. Це вказує на тотальне проникнення пластикових частинок до харчових ланцюгів, що істотно трансформує традиційне уявлення про «безпечну» або «здорову» їжу.

Шлях надходження частинок до організму людини багато в чому визначає їхню біологічну поведінку й розподіл. У той час як пластик, що потрапляє через травний тракт, може частково виводитися, інгаляційний шлях характеризується значно вищим ступенем ризику. Нанопластик, що вдихається, осідає в легеневій тканині, долає гематогенні бар'єри та може досягати безпосередньо головного мозку, де здатний накопичуватися з пролонгованим терміном. Водночас природні механізми детоксикації (печінка, нирки) не володіють ефективними засобами розпізнавання та видалення таких частинок.

Найбільша щільність мікропластику фіксується поблизу водойм, прибережних зон і лісових масивів — особливо в умовах підвищеної вологості та температури. У таких ландшафтах пластик затримується довше, бере участь в аерозольному перенесенні, провокує окислювальний стрес у рослин і знижує ефективність фотосинтетичних процесів. Відпочинок на узбережжі, який раніше розглядався як сприятливий з погляду оздоровлення, сьогодні пов'язаний із додатковим інгаляційним навантаженням: за оцінками, обсяг пластику, що вдихається поблизу відкритих водойм, може багаторазово перевищувати показники міського середовища.

Епідеміологічні дослідження показують стійкий зв'язок між рівнем забруднення МНП і поширеністю хронічних неінфекційних захворювань, зокрема артеріальної гіпертензії, цукрового діабету, інсульту, депресивних і когнітивних розладів. Внаслідок здатності долати біологічні бар'єри та накопичуватися в різних тканинах, зокрема в мозку, серці, легенях і плаценті, МНП чинить токсичну дію на молекулярному, клітинному та органному рівнях. Акумуляючись в організмі, пластик чинить імуносупресивну, запальну та генотоксичну дію. Незважаючи на прогрес у виявленні ризиків, ефективні механізми нейтралізації та виведення МНП з організму людини дотепер не розроблені.

Однією з найбільш критичних властивостей нанопластику, що має системний біологічний вплив, є його здатність утримувати електростатичний заряд. На відміну від інертних частинок, нанопластик активно взаємодіє з клітинними поверхнями, білками, рецепторами і навіть генетичним матеріалом, формуючи стійкі зв'язки на молекулярному рівні. Ця властивість не лише посилює проникнення частинок нанопластику через біологічні бар'єри, зокрема гематоенцефалічний, але й ускладнює їхнє подальше виведення, сприяючи тривалому затриманню в тканинах, особливо в головному мозку. Електростатична взаємодія ініціює каскад клітинних порушень, таких як деполяризація мембран, мітохондріальні дисфункції, окислювальний стрес і апоптоз, що значно підвищує токсичність навіть за мінімальних концентрацій частинок нанопластику.

Автори цієї доповіді висувають припущення, що вирішення цієї задачі — нейтралізація або екранування електростатичного заряду мікро- й нанопластику — може стати фундаментальним проривом, здатним значно знизити біологічну активність нанопластику та уповільнити швидкість його накопичення в критично важливих органах. За оцінками авторів доповіді, екранування або нейтралізація електростатичного заряду здатні знизити потенційну небезпеку МНП щонайменше на 50 %, що робить цей напрям досліджень критично важливим. Це дасть науковій спільноті часовий проміжок, необхідний для розроблення більш комплексних підходів до діагностики, детоксикації та профілактики наслідків МНП. У цьому аспекті дослідження в галузі біофізики, наноматеріалознавства та молекулярної токсикології набувають пріоритетного значення. Зволікання в цьому випадку — це потенційне прискорення деградаційних процесів.

Паралельно з біомедичними рішеннями потрібна науково обґрунтована стратегія безпечного поводження з пластиковими відходами. Наявна система утилізації не в змозі запобігти подальшій фрагментації та надходженню мікропластику в біосферу. В умовах глобалізації необхідно розробити міжнародну технологічну платформу для створення, впровадження та масштабування безпечних методів збирання й переробки пластику. Такі заходи

можуть бути реалізовані виключно за наявності інституційної підтримки, транскордонного регулювання та наукової дипломатії.

Особливого значення набуває підвищення інформованості наукового співтовариства, представників охорони здоров'я та широкої громадськості. На сьогодні більшість людей не усвідомлюють масштабів впливу МНП і продовжують несвідомо сприяти його поширенню.

Таким чином, проблема мікро- й нанопластику перестала бути потенційною загрозою та перетворилася на фактор системного ризику. Цей напрям потребує пріоритетної уваги з боку наукової спільноти та органів охорони здоров'я, систематизації даних, розроблення стандартів оцінювання ризиків, а також розширення міждержавного та міжнародного співробітництва. Для вироблення ефективних рішень, що гарантують біологічну безпеку в короткостроковій і довгостроковій перспективі, потрібні міждисциплінарний підхід, інституційне визнання та міжнародна консолідація зусиль.

ФАКТОР Х. ВПЛИВ МІКРО- Й НАНОПЛАСТИКУ НА ДИНАМІКУ ЦИКЛУ ПРИРОДНИХ КАТАКЛІЗМІВ

Як уже було зазначено в розділі «Вплив мікро- й нанопластику на клімат», частинки мікро- й нанопластику знижують теплопровідну функцію океанічних вод, що призводить до накопичення тепла в океані і, як наслідок, до критичного зростання температур океану. Проте мікро- й нанопластик сам собою не є джерелом нагрівання океану.

З весни 2023 року та впродовж понад року середня температура поверхні Світового океану щодня оновлювала історичні максимуми, що стало безпрецедентним явищем в історії спостережень (рис. 128). Вчені по всьому світу висловлюють серйозну стурбованість цим аномальним підвищенням.



Доктор Брайан Макнолді, старший науковий співробітник Школи океанології при Університеті Маямі, зазначає: *«Йдеться не просто про рекордні температури океану, які спостерігаються вже цілий рік, — важливо, наскільки ці нові рекорди перевершують колишні. Сучасні показники навіть близько не відповідають попереднім рекордним значенням»*³²².



Цю стурбованість поділяє доктор Роб Лартер, британський морський геофізик: *«Це справді насторожує, зокрема й тому, що я не чую жодного вченого, який би дав переконливе пояснення, чому спостерігається таке значне відхилення. Але зараз складається враження, що все розвивається набагато інтенсивніше та швидше, ніж ми очікували»*³²³.

За даними кліматичних досліджень, сучасні моделі пророкують поступове підвищення температури поверхні океану, але спостережувана швидкість цього процесу значно перевищує всі прогнози. Вчені вважають, що антропогенна зміна клімату відіграє певну роль, але вона не може повністю пояснити спостережуваний феномен.

³²²NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024)
<https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179> (Дата доступу: 10.05.2025).

³²³The New York Times. Scientists are freaking out about ocean temperatures. (2024)
<https://www.nytimes.com/2024/02/27/climate/scientists-are-freaking-out-about-ocean-temperatures.html> (Дата доступу: 01.05.2025).

Професор Джон Абрахам з Університету Св. Томаса, який вивчає температуру океану, висловив припущення щодо наявності раніше невідомих факторів, які можуть впливати на довгострокові зміни температури поверхні океану³²². Він зазначив, що ці фактори не було враховано в попередніх прогнозах. Автори цієї доповіді висувають припущення про існування певного «фактора Х», який може бути відповідальним за додаткове нагрівання океану й атмосфери.

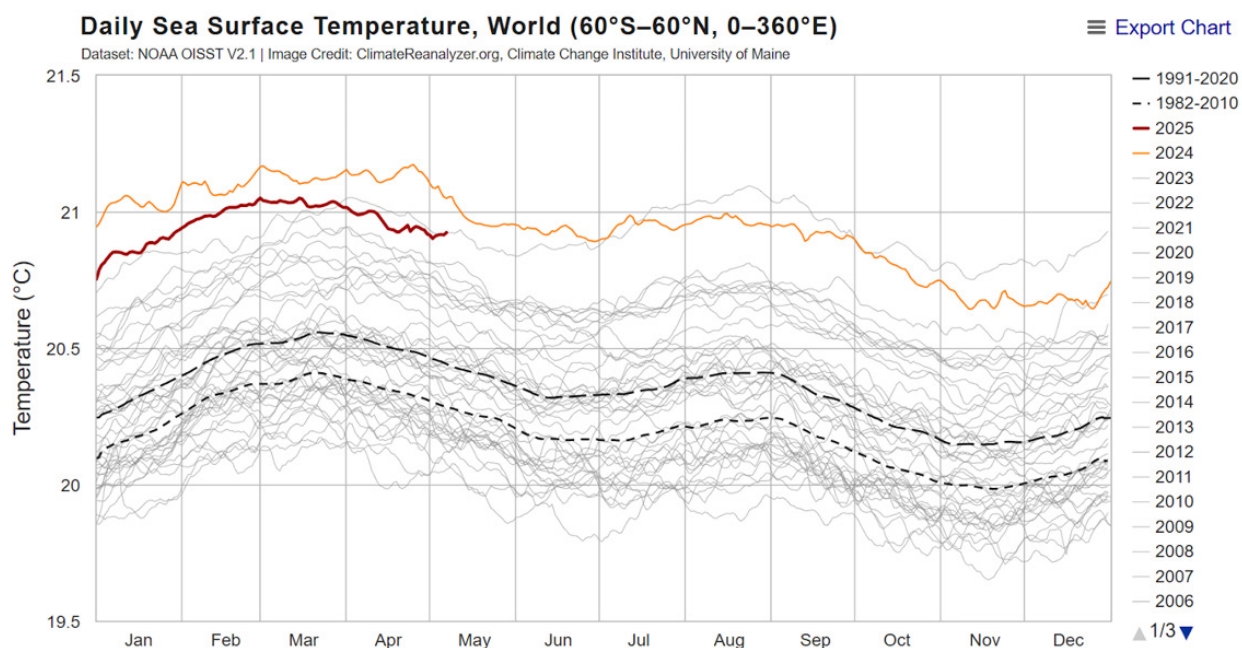


Рисунок 128. Середньодобова температура поверхні океану, 1981–2025 рр.

Джерело даних: Dataset NOAA OISST V2.1 | Джерело зображення: [ClimateReanalyzer.org](https://climateanalyzer.org), Climate Change Institute, University of Maine, Dataset NOAA OISST.

https://climateanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2

Чи може мікро- й нанопластик в океані бути невивченим фактором X?

Аналіз можливості того, що саме мікро- й нанопластик є головною причиною поточного нагріву океанів, виявляє серйозне протиріччя. Нанопластик дійсно погіршує здатність океану відводити тепло. Проте він не генерує теплову енергію — він лише перешкоджає її виходу з океану.

За останні 60 років середні глибини океану нагрівалися в 15 разів швидше, ніж за попередні 10 000 років^{324 325}, і цей процес лише пришвидшується. Ця прогресія наростає з кожним роком дедалі швидше. Необхідна величезна кількість енергії, щоб підняти температуру на таких глибинах, куди сонячні промені вже не проникають^{326 327}.

Своєю чергою масштабне надходження мікро- й нанопластику до океану почалося відносно нещодавно — приблизно 30 років тому, тоді як прискорення потепління океанічних глибин спостерігається вже впродовж останніх 60 років. Отже, пластик не може пояснити довгострокову й наростаючу тенденцію нагріву середніх глибин океану, що почалася задовго до значної появи цих забруднювачів в океані. Також не може пояснити цей нагрів і сонячна радіація, оскільки сонячні промені проникають на глибини до 200 м. Вода може нагріватися від Сонця максимально до 700 м унаслідок перемішування³²⁸. Для прогрівання глибинних шарів, куди не проникають сонячні промені, потрібна колосальна кількість енергії. Це означає, що накопичене в океані тепло повинно надходити з іншого джерела, а присутність нанопластику призводить до того, що це тепло «замикається» всередині океану.

З огляду на те, що нагрівання від Сонця не пояснює причин експоненційного зростання температур океану, було висунуто припущення про наявність додаткових джерел нагріву океану в різних його частинах.

Вертикальний розподіл температурних аномалій

Аналіз даних системи Argo щодо глобальних коливань температури на різних глибинах за останні два десятиліття виявив низку температурних аномалій, які не узгоджуються з традиційною моделлю низхідної теплопередачі від поверхні до глибинних шарів океану^{329 330}.

³²⁴Rosenthal, Y. et al. Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science* 342, 617–621 (2013). <https://doi.org/10.1126/science.1240837>

³²⁵Columbia Climate School. 'Is Global Heating Hiding Out in the Oceans?'. (2013) <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Дата доступу: 10.05.2025).

³²⁶NOAA Ocean Service. 'How far does light travel in the ocean?'. (n.d.) https://oceanservice.noaa.gov/facts/light_travel.html (Дата доступу: 10.05.2025).

³²⁷NOAA Ocean Exploration. 'Marine Life'. (n.d.) <https://oceanexplorer.noaa.gov/explainers/marine-life.html> (Дата доступу: 10.05.2025).

³²⁸Climate.gov. 'The role of the ocean in tempering global warming'. (2014)

<https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/role-ocean-tempering-global-warming> (Дата доступу: 10.05.2025).

³²⁹Johnson, Gregory C., et al. "Argo-Two Decades: Global Oceanography, Revolutionized." *Annual Review of Marine Science*, vol. 14, 2022, pp. 379–403.

<https://doi.org/10.1146/annurev-marine-022521-102008>.

³³⁰Wong, Annie P. S., et al. "Argo Data 1999–2019: Two Million Temperature-Salinity Profiles and Subsurface Velocity Observations From a Global Array of Profiling Floats." *Frontiers in Marine Science*, vol. 7, 2020, article 700. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00700>.

Зафіксовано статистично значущі випадки інверсії температурного градієнта, коли тепліші водні маси розташовуються під відносно холодними поверхневими шарами (рис. 129). Подібна стратифікація температур фізично неможлива за винятково низхідної теплопередачі з поверхні, оскільки теплова енергія, згідно із законами фізики, не здатна подолати проміжний холодний шар згори донизу.

Дані ARGO демонструють коливання температури на різних глибинах за останні 20 років

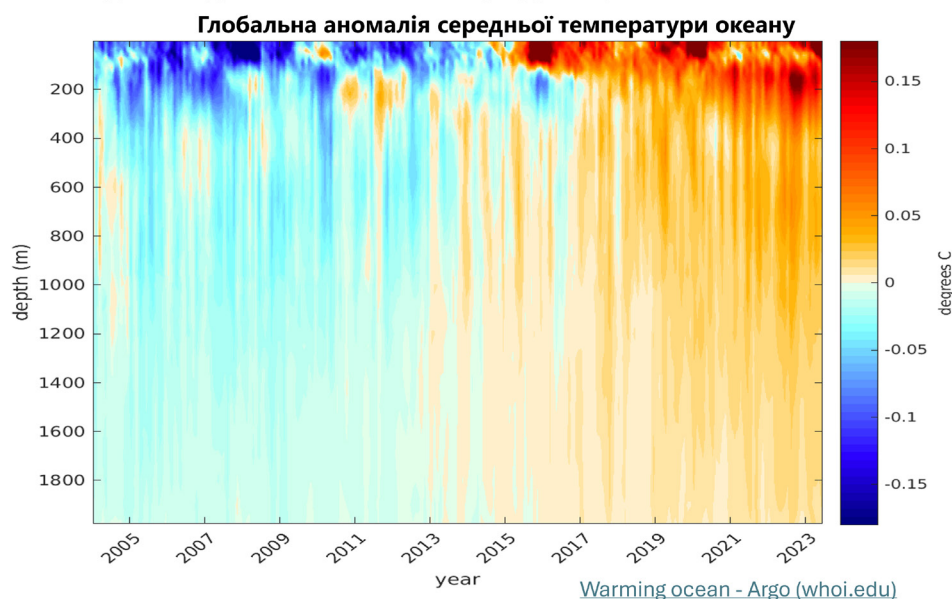


Рисунок 129. Глобальні аномалії температури океану на глибинах 0–1900 м з 2004 року.

Джерело: Argo <https://www2.who.edu/site/argo/impacts/warming-ocean/>

Нові дослідження вчених із Китайського океанологічного університету³³¹ підтверджують висновки про наявність у товщах води теплових аномалій, які не проявляються на поверхні океану. Дослідження довели, що третина морських хвиль тепла взагалі не проявляється на поверхні океану, а близько половини проявляється не на всіх етапах життєвого циклу.

Щорічна кількість цих підповерхневих морських теплових хвиль значно збільшується внаслідок потепління океану протягом останніх трьох десятиліть. Те, що значна частина морських хвиль тепла зовсім не спостерігається на поверхні океану, однозначно вказує на те, що вони не можуть бути викликані теплом від атмосфери.

³³¹Sun, D., Li, F., Jing, Z., Hu, S., & Zhang, B. (2023). Frequent marine heatwaves hidden below the surface of the global ocean. *Nature Geoscience*, 16(12), 1099–1104. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01325-w>

Дослідження джерел нагріву на дні океану

Дослідження та регулярний моніторинг температури на дні океану на сьогодні є вкрай рідкісними й обмеженими. Довгий час наука не ставила перед собою завдання відстежувати зміни саме на таких глибинах. Сучасні системи моніторингу, як-от мережа буїв ARGO, дають змогу збирати дані лише з 0,03 % площі океану, водночас більшість буїв занурюється тільки на половину середньої глибини, не досягаючи океанічного дна³³².

Реально людством вивчено усього близько 3–3,5 % поверхні дна океану³³³. Це пов'язано з низкою серйозних причин. По-перше, більша частина Світового океану перебуває на глибинах 3000–6000 м. Створення глибоководних апаратів, здатних витримати колосальний тиск на глибинах до 6000 м, вимагає величезних фінансових і технологічних ресурсів.

По-друге, самі експедиції є надзвичайно складними та витратними: за всю історію було побудовано лише вісім спеціалізованих апаратів для подібних досліджень. З цієї причини сьогодні ми вивчили космос у деяких аспектах навіть глибше, ніж найвіддаленіші куточки Світового океану.

Водночас стає дедалі очевиднішим, що геологічні процеси на дні океану можуть відігравати істотну роль у зміні клімату та теплового балансу океанів. На дні розташовані мільйони унікальних геологічних об'єктів: вулкани, розломи та гідротермальні джерела, що володіють величезною енергією. Однак через їхню важкодоступність і недостатнє охоплення моніторингу масштаби їхнього потенційного впливу досі багато в чому залишаються загадкою для науки.

Незважаючи на це, дослідження океанічного дна все ж таки проводять, і ціла низка з них вказує на нагрівання океанічної води на дні.

Так, у **двох глибоких ділянках Аргентинського басейну**³³⁴, на глибинах понад 4500 м, спостерігаються значні тенденції потепління: $0,02\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ за десятиліття, у період 2009–2019 рр. Це колосальна кількість енергії, яка необхідна, щоб нагріти такий обсяг холодної води на дні.

Безпосередньо біля берегів Західної Антарктиди відбувається аномальне нагрівання глибоких вод моря Ведделла³³⁵, тоді як верхні 700 м вод майже не нагріваються. У глибших регіонах спостерігається постійне підвищення температури. З одного боку море Ведделла обрамляє Західно-Антарктичний рифт, а з іншого — підводний вулканічний хребет із Південними Сандвічевими островами.

³³²Argo Program. 'Mission'. (n.d.) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (Дата доступу: 10.05.2025).

³³³Bell, Katherine L. C., et al. "How Little We've Seen: A Visual Coverage Estimate of the Deep Seafloor." *Science Advances*, vol. 11, no. 19, 2025, eadp8602. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adp8602>.

³³⁴Meinen, C. S., Perez, R. C., Dong, S., Piola, A. R. & Campos, E. Observed Ocean Bottom Temperature Variability at Four Sites in the Northwestern Argentine Basin: Evidence of Decadal Deep/Abyssal Warming Amidst Hourly to Interannual Variability During 2009–2019. *Geophysical Research Letters* 47, e2020GL089093 (2020). <https://doi.org/10.1029/2020GL089093>

³³⁵Strass, V. H., Rohardt, G., Kanzow, T., Hoppema, M. & Boebel, O. Multidecadal warming and density loss in the Deep Weddell Sea, Antarctica. *Journal of Climate* 33, 9863–9881 (2020). <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0271.1>

Роль геотермального теплового потоку, тектонічних процесів і вулканічних вивержень на дні океану

У контексті спостережуваних аномалій нагріву глибоководних шарів, де вплив атмосфери мінімальний, логічним видається розгляд геотермального потоку з надр Землі як потенційного джерела додаткового тепла. Традиційно в кліматичних моделях геотермальний потік, що надходить знизу, приймають постійним і рівним приблизно $0,09 \text{ Вт/м}^2$ (або 90 мВт/м^2)³³⁶, що на кілька порядків менше за сонячний потік^{337 338}.

Проте зростаючий обсяг наукових даних вказує на значущість цього недооціненого джерела тепла. Масштабні геотермічні дослідження показали, що енергія теплового потоку, яка виходить через дно океану, залежить від віку океанічної кори: він максимальний у молодих зонах спредингу і мінімальний у старих океанічних басейнах³³⁹ (рис. 130).

Такі локальні аномалії можуть впливати на вертикальну структуру температури води, послаблювати термоклин і сприяти перемішуванню водних мас, що впливає на циркуляцію, біопродуктивність і навіть на стійкість льодовиків у приполярних регіонах.

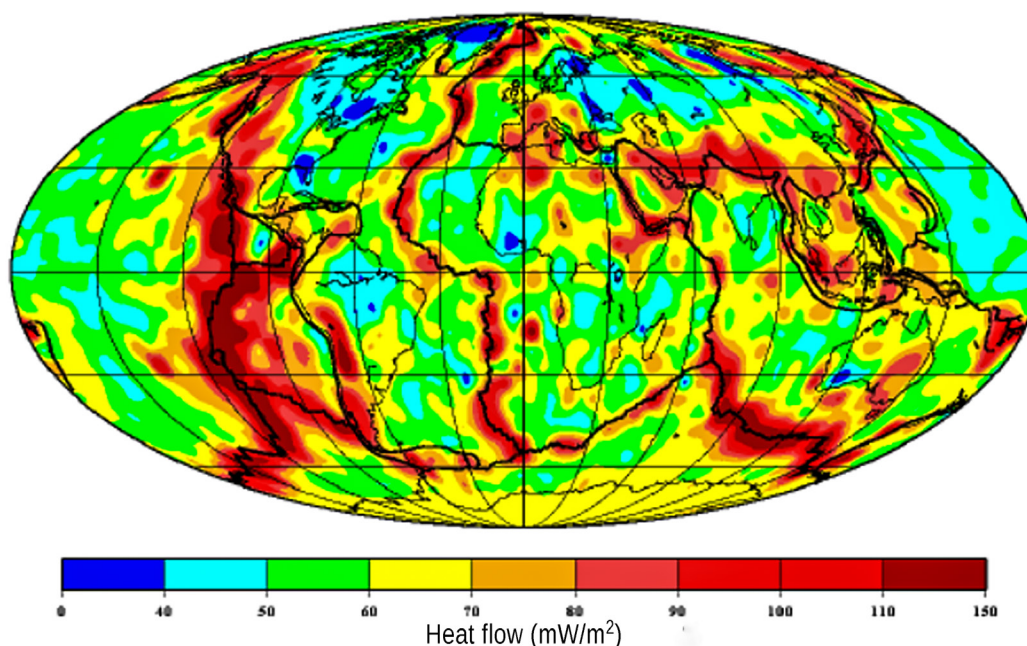


Рисунок 130. Глобальне представлення теплового потоку на основі даних спостережень, доповнене оцінками, отриманими з цифрових карт, та емпіричною кореляцією з віком.

Ілюстрація зі статті: Vieira F., Hamza V. M. Global Heat Flow: New Estimates Using Digital Maps and GIS Techniques // International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics. 2018. Vol. 1, n. 1. pp. 6–13.

³³⁶Pollack, H. N., Hurter, S. J. & Johnson, J. R. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. Rev. Geophys. 31, 267–280 (1993). <https://doi.org/10.1029/93RG01249>

³³⁷Kopp, G. & Lean, J. L. A New, Lower Value of Total Solar Irradiance: Evidence and Climate Significance. Geophysical Research Letters 38, L01706 (2011). <https://doi.org/10.1029/2010GL045777> (Дата доступу: 10.05.2025).

³³⁸World Energy Council. World Energy Resources: Solar 2013. (2013) <https://www.worldenergy.org/publications> (Дата доступу: 10.05.2025).

³³⁹Khutorskoy, M. D. & Polyak, B. G. Reflection of contrasting geodynamic settings in the thermal field. Georesursy (2), 24–43 (2014).

Геотермальний тепловий потік — це кількість теплової енергії, що надходить із надр Землі через одиницю площі поверхні за одиницю часу, яка вимірюється в міліватах на квадратний метр (мВт/м²).

У той час як середня енергія геотермального потоку для континентів становить 40–60 мВт/м², а для океанічного дна — приблизно 100 мВт/м², у деяких регіонах реєструють значення, що в кілька разів перевищують ці показники. Найекстремальніші значення геотермального теплового потоку виявлено в тектонічно й вулканічно активних зонах: наприклад, у зонах серединно-океанічних хребтів і активних рифтових зонах потік може перевищувати 200–1000 мВт/м²³⁴⁰.

Особливо високий тепловий потік відзначається в зонах гідротермальних полів — це зони виходу гарячих флюїдів на дно океану, де температура води сягає 350–400 °С. Ці системи формують унікальні екосистеми та забезпечують локальні аномалії теплового потоку, істотно впливаючи на тепловий режим придонних вод.

Основною добре вивченою зоною підвищеного геотермального теплового потоку на дні океану є серединно-океанічні хребти — це зони розсування літосферних плит, де відбувається активне формування нової океанічної кори. Ця глобальна система підводних хребтів має загальну протяжність близько 60 000 км³⁴¹, оперізаючи всю земну кулю подібно до швів на бейсбольному м'ячі. Серединно-океанічні хребти характеризуються високою концентрацією гідротермальних джерел, підводних вулканів і активних розломів, через які до океану надходить значна кількість теплової енергії з мантиї Землі³⁴². Тепловий потік у цих зонах у 10–100 разів перевищує середні показники для решти частини океанічного дна³³², що робить їх ключовими ділянками теплообміну між внутрішніми шарами Землі та Світовим океаном.

Професор університету Меріленд Артур Вітеріто встановив зростання кількості землетрусів на дні океану за серединно-океанічними хребтами з 1995 року (рис. 131)³⁴³. Із коефіцієнтом кореляції 0,7 це зростання відповідає зростанню глобальних температур. Водночас зростання температури збільшується з відставанням на два роки після наростання сейсмічної активності. Збільшення сейсмічної активності в цих зонах пов'язане з підйомом магми, яка формує нову океанічну кору.

³⁴⁰Polyak, B. G. & Khutorskoy, M. D. (2018). Heat flow from the interior is an indicator of deep processes. *Georesursy*, 20(4), Part 2, 366–376.
<https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376>

³⁴¹LaFemina, P. C. Plate Tectonics and Volcanism. in *The Encyclopedia of Volcanoes* (ed. Sigurdsson, H.) 65–92 (Academic Press, 2015).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00003-1>

³⁴²Baker, E. T. & German, C. R. On the Global Distribution of Hydrothermal Vent Fields. in *Mid-Ocean Ridges: Hydrothermal Interactions Between the Lithosphere and Oceans* (eds German, C. R., Lin, J. & Parson, L. M.) 245–266 (American Geophysical Union, 2004).

³³²Argo Program. 'Mission'. (n.d.) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (Дата доступу: 10.05.2025).

³⁴³Viterito, A. 1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History. *Int. J. Environ. Sci. Nat. Res.* 29, 556271 (2022).
<https://doi.org/10.19080/IJESNR.2022.29.556271>

Збільшення кількості землетрусів на дні океану вздовж серединно-океанічних хребтів

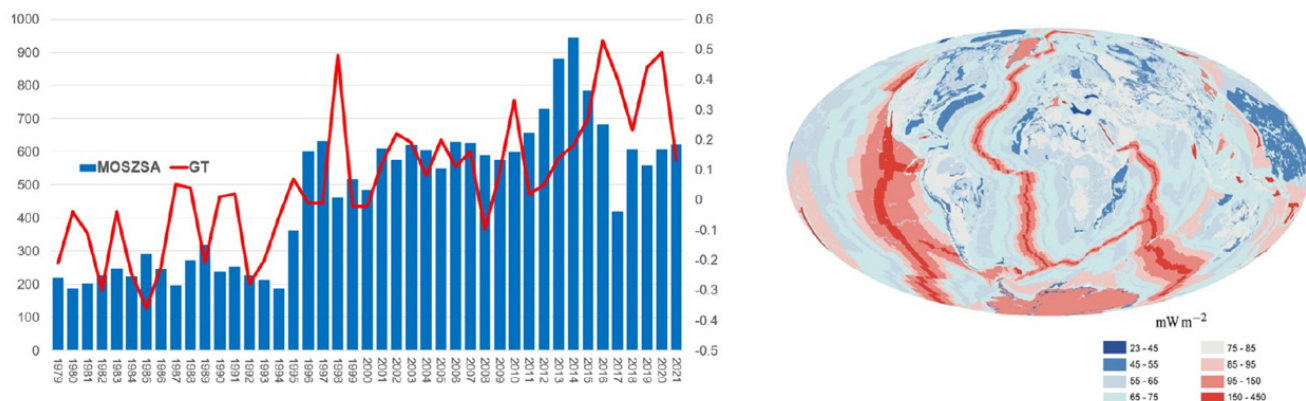


Рисунок 131. Одночасне зростання кількості землетрусів магнітудою 4,0–6,0 на дні океану та глобальних температур атмосфери.

Джерело: Viterito, A. (2022). "1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History." *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 29(5). <https://doi.org/10.19080/ijesnr.2022.29.556271>

Хоча прямих вимірювань обсягів магми, що піднімається, немає, глобальна мережа сейсмічного моніторингу дає змогу судити про масштаби цих процесів побічно — за кількістю та інтенсивністю сейсмічних подій, які збільшуються незалежно від кількості сейсмічних даних. Згідно з гіпотезою Вітеріто, сейсмічна та вулканічна активність уздовж серединно-океанічних хребтів призводить до збільшення темпів гідротермальних викидів і нагрівання вод, що зі свого боку призводить до викидів парникових газів і нагрівання атмосфери. Таким чином, Вітеріто показує: океани нагріваються не лише зверху, але й знизу — через геологічні процеси.

Підводний вулканізм також може відігравати важливу роль у формуванні теплового режиму океанічного дна. Сучасні дані свідчать, що приблизно 75 % усіх вулканічних вивержень Землі відбуваються під водою³⁴⁴. Раніше вважалося, що підводні виверження відбуваються зі спокійним виливом лави, а вибухові виверження неможливі через тиск стовпа води. Тому передбачалося, що підводні вулкани не можуть нагрівати товщу води — лава, що витікає, майже відразу застигає. Але нещодавні дослідження змінили розуміння механізму вивержень підводних вулканів.

Тиск магми становить 10 000–30 000 бар, а тиск стовпа води в найглибших частинах океану становить лише 1000 бар. Під час прориву магми відбувається миттєве закипання води з розпадом молекул H_2O , формуючи газо-водяну порожнину з тиском у сотні або тисячі бар³⁴⁵, що призводить до потужних вибухових вивержень.

³⁴⁴Crisp, J. A. Rates of magma emplacement and volcanic output. *J. Volc. Geotherm. Res.* 20, 177–211 (1984). [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90039-8)

³⁴⁵Lyons, J.J., Haney, M.M., Fee, D. et al. Infrasound from giant bubbles during explosive submarine eruptions. *Nat. Geosci.* 12, 952–958 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0461-0>

Такі виверження супроводжуються викидом тефри та гідротерм — велетенських струменів перегрітої води, об'єм яких може сягати еквівалента 40 мільйонів олімпійських басейнів. Такі викиди можуть порушувати теплову рівновагу океану не лише локально, а й на глобальному рівні.

Дослідження Лідського університету виявили кілометрові поля вулканічної тефри на дні Тихого океану³⁴⁶, що підтверджує потужні вибухові підводні виверження. Одне таке виверження може виділяти теплову потужність близько 1 ТВт, що вдвічі перевищує енергоспоживання США.



Внесок вибухових вивержень у нагрівання океану підтверджує професор Бернд Зімановскі з Університету Юліуса Максиміліана в Баварії³⁴⁷:

«Під час підводних вивержень лави тепло від лави до води передається досить довго. Проте при вибухових виверженнях магма розпадається на крихітні частинки. Це може створювати настільки потужні теплові імпульси, що теплові рівноважні струми в океанах порушуються локально або навіть глобально»³⁴⁸.

За сучасними оцінками, кількість гідротермально активних підводних утворень становить від 100 тис. до 10 млн^{349 350}, що свідчить про те, що, ймовірно, внесок гідротермальної активності у тепловий баланс океану є недооціненим. Вибухові виверження магми призводять до формування потужних теплових імпульсів, здатних порушувати теплові струми в океанах локально. Однак, враховуючи розміри океану, навіть таких сильних підводних вивержень недостатньо, щоб його нагріти. Вулкани розташовуються не повсюдно, і їхні виверження епізодичні, а їхньої енергії недостатньо для нагрівання всього океану. Проте вона може бути достатньою, щоб викликати локальні хвилі тепла в океані.

Окремим прикладом таких локальних теплових аномалій є морські хвилі тепла, тобто локально тривало нагріта вода в океані. Ще одна їхня назва — блоги. Це гігантські області поверхневої води з аномально високими температурами. З 1995 року кількість блогів значно зросла³⁵¹, і вони почали частіше з'являтися в різних частинах Світового океану, зокрема поблизу берегів Нової Зеландії, Південно-Західної Африки та в південній частині Індійського океану.

³⁴⁶Pegler, S.S., Ferguson, D.J. Rapid heat discharge during deep-sea eruptions generates megaplumes and disperses tephra. Nat Commun 12, 2292 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22439-y>

³⁴⁷Dürrig, T., White, J.D.L., Murch, A.P. et al. Deep-sea eruptions boosted by induced fuel-coolant explosions. Nat. Geosci. 13, 498–503 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0603-4>

³⁴⁸University of Würzburg. How Volcanoes Explode in the Deep Sea. (2020) <https://www.uni-wuerzburg.de/en/news-and-events/news/detail/news/how-volcanoes-explode-in-the-deep-sea> (Дата доступу: 01.05.2025).

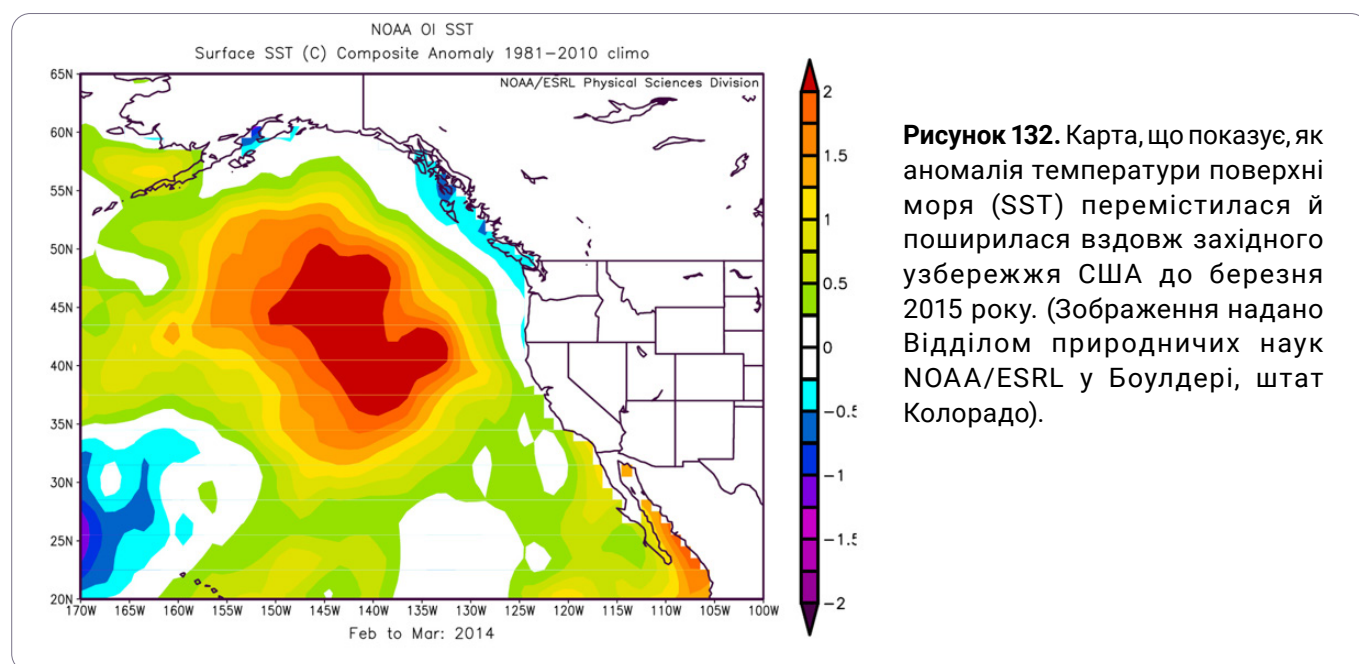
³⁴⁹Baker, E. T. et al. How many vent fields? New estimates of vent field populations on ocean ridges from precise mapping of hydrothermal discharge locations. Earth Planet. Sci. Lett. 449, 186–196 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.05.031>

³⁵⁰Science News Explores. Seafloor hosts surprising number of deep-sea vents. (2016) <https://www.snexplores.org/article/seafloor-hosts-surprising-number-deep-sea-vents> (Дата доступу: 10.05.2025).

³⁵¹Laufkötter, C., Zscheischler, J. & Frölicher, T. L. High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming. Science 369, 1621–1625 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aba0690>

Один із найвідоміших і наймасштабніших блобів сформувався в затоці Аляска 2013 року та швидко поширився Тихим океаном. Його площа склала понад 4 млн км² (що перевищує площу Індії), а температура води в деяких місцях перевищила середню на 5-6 °C (рис. 132). Блоб переміщувався океаном від Аляски до Мексики протягом трьох років, до 2016 року. Це явище негативно вплинуло на морську екосистему та клімат у регіоні.

Причиною виникнення блобу, найімовірніше, був активний вулканізм біля узбережжя Аляски та магматичний плюм Кобб³⁵², які нагріли воду на дні океану, і вона спливла на поверхню в такому величезному обсязі.



На схід від Нової Зеландії, у південній частині Тихого океану, у грудні 2019 року з'явився блоб, температура якого в певні дні була на 6 °C вищою за середні значення. Блоб мав площу понад 1 000 000 км², що еквівалентно 1,5 площі Техасу або чотирьом площам Нової Зеландії (рис. 133). Як повідомлялося, на той час це був найбільший блоб у Світовому океані. До того ж, ця крапля стала другою за величиною подією за всю історію спостережень у цьому регіоні.

³⁵²Chadwick, J., Keller, R., Kamenov, G., Yogodzinski, G. & Lupton, J. The Cobb hot spot: HIMU-DMM mixing and melting controlled by a progressively thinning lithospheric lid. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 15, 3107–3122 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014gc005334>

66

Джеймс Ренвік, професор кафедри географії, екології та наук про Землю в Університеті Вікторії у Веллінгтоні, зазначив:

«Це найбільша зона аномального потепління на планеті. Зазвичай температура води там сягає 15 °C, а зараз – приблизно 20 °C»³⁵³.

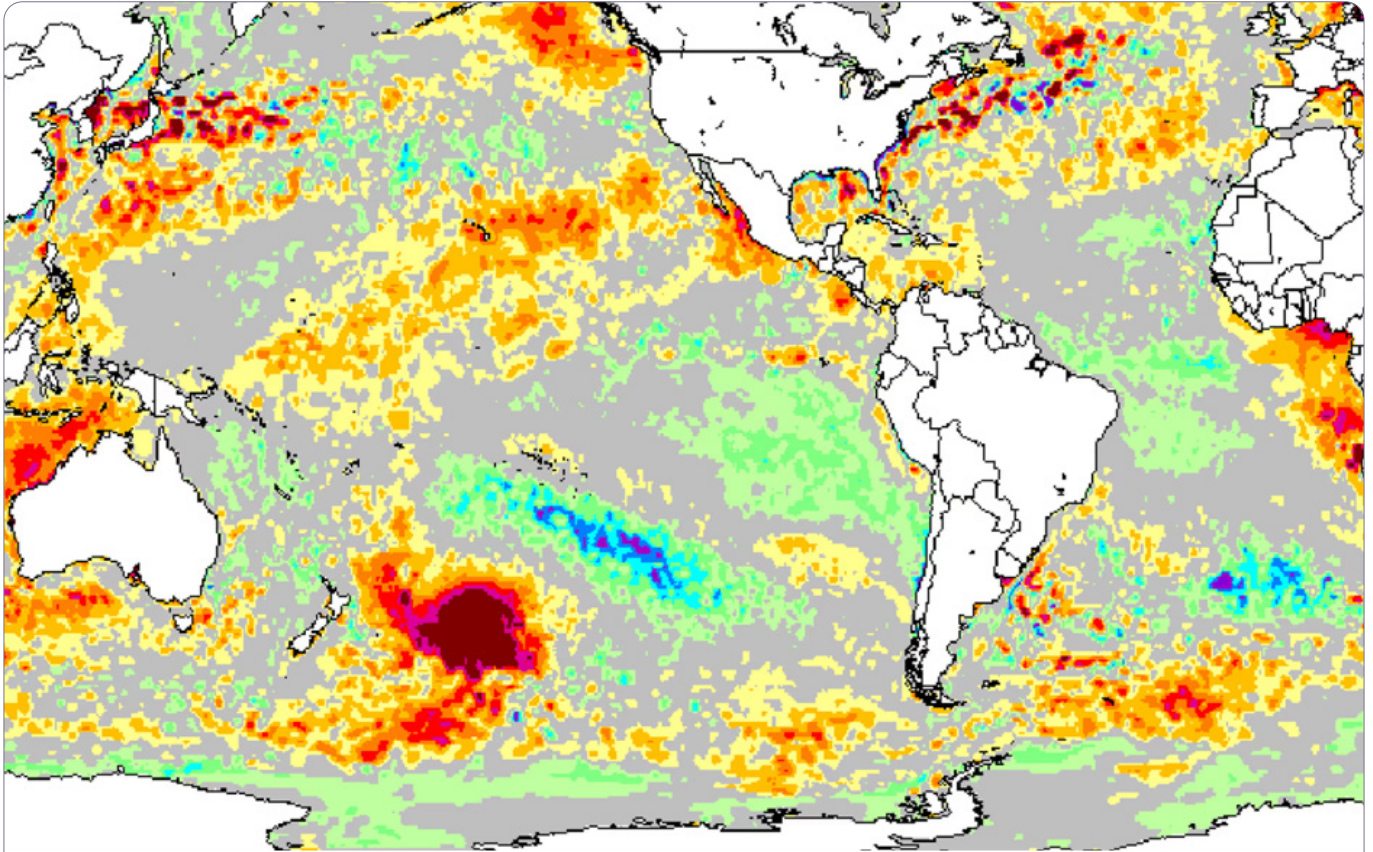


Рисунок 133. Аномалія температури поверхні моря в південній частині Тихого океану 25 грудня 2019 року.

Джерело: The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019) <https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (Дата доступу: 11.05.2025).

Ймовірною причиною формування цього блобу стала активність стародавнього вулканічного плато біля узбережжя Нової Зеландії³⁵⁴.

³⁵³The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019) <https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (Дата доступу: 10.05.2025).

³⁵⁴Gase, A. et al. Subducting volcanoclastic-rich upper crust supplies fluids for shallow megathrust and slow slip. Sci. Adv. 9, eadh0150 (2023). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh0150>

Ще одним окремим прикладом впливу геотермального тепла на підвищення температури океанічних вод за рахунок магматичних процесів є аномалії нагріву в арктичних морях уздовж узбережжя Сибіру. Згідно з дослідженнями 2022 року, Сибірська Арктика нагрівається майже вчетверо швидше, ніж земна куля, що є вищим співвідношенням, ніж раніше враховувалося в кліматичних моделях, і виявилось вкрай несподіваним для вчених³⁵⁵ (рис. 134).

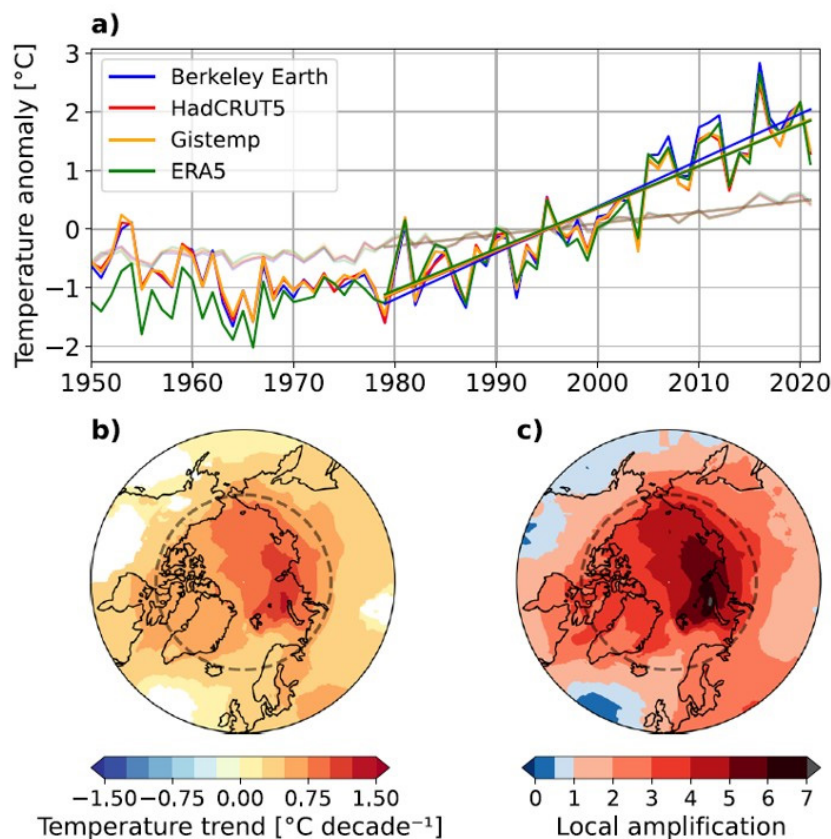


Рисунок 134. Еволюція середньорічної температури в Арктиці.

(а) Середньорічні температурні аномалії в Арктиці 66.5°–90° пн. ш. (темні кольори) та в глобальному масштабі (світлі кольори) за період 1950–2021 рр., отримані з різних спостережних наборів даних. Температурні аномалії розраховано щодо стандартного 30-річного періоду 1981–2010 рр. Пунктирна лінія на графіках (b) і (c) позначає Північне полярне коло (широта 66,5° пн. ш.).

Джерело: Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun Earth Environ* 3, 168 (2022).

<https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>

Саме в цьому регіоні світу, в районі півострова Таймир, відбувається активізація Сибірського магматичного плюму, який наразі стрімко піднімається в тому регіоні, де 250 мільйонів років тому відбувся вилив Сибірських трапів. І все вказує на те, що голова плюму наразі активно розмиває Східно-Сибірський кратон, і магма розтікається під всією його площею (рис. 135). Згідно з попередніми оцінками, область розтікання потоків магми під Сибіром може сягати 2500–3000 км у діаметрі, що співмірно з площею Австралії.

³⁵⁵Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun Earth Environ* 3, 168 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>

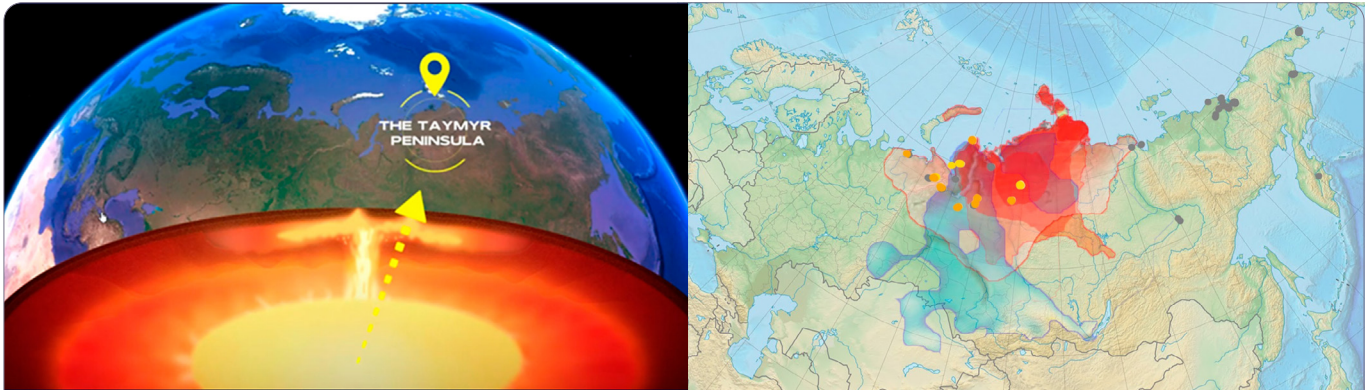


Рисунок 135. Локалізація місця розташування плюму за результатами різних досліджень

Важливо зазначити, що таке інтенсивне потепління арктичних морів відбувається саме в районі півострова Таймир. Таку аномалію саме в акваторіальній зоні Сибіру можна пояснити тим, що океанічна кора тонша і швидше проводить тепло, а вода має більшу теплоємність, ніж атмосфера. Тому саме океанічна вода інтенсивно накопичує та затримує тепло від магматичного плюму, що піднімається, незважаючи на те, що його підйом відбувається під континентальною корою у відносному віддаленні від узбережжя.



Детальніше ознайомитися з інформацією про Сибірський магматичний плюм і його вплив на кліматичну систему, а також про загрози, які несе в собі ця геологічна структура, та шляхи вирішення проблеми можна в доповіді

«ПРО ЗАГРОЗУ ПРОРИВУ МАГМАТИЧНОГО ПЛЮМУ В СИБІРУ ТА ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ ЦІЄЇ ПРОБЛЕМИ»

Сукупність усіх цих даних свідчить про те, що геологічні процеси на дні океану є істотним фактором глобального потепління. Збільшення сейсмічної та вулканічної активності на дні океану корелює зі зростанням глобальних температур, що вказує на можливий причинно-наслідковий зв'язок. Підводні виверження, особливо вибухового характеру, здатні створювати потужні теплові імпульси, що порушують локальний і навіть глобальний тепловий баланс.

Гідротермальні системи та вулканічні процеси формують великомасштабні аномалії, такі як блоги, що помітно впливають на океанічні екосистеми та клімат, а магматичні процеси викликають аномальне потепління арктичних морів.

Отже, океан нагрівається не лише зверху під впливом атмосфери, але й знизу — за рахунок динамічних процесів у земних надрах. Це вимагає перегляду існуючих кліматичних моделей і більш глибокого вивчення підводної геологічної активності як важливого компонента в загальному тепловому балансі планети.

Однак є одне запитання, яке має ключове значення: чому в цей період часу відбувається збільшення магматичних і тектонічних процесів на Землі?

Стислий опис геодинамічної моделі зміни клімату на Землі у сучасний період

Останні 30 років на Землі відбувається безпрецедентне та синхронне наростання не тільки змін клімату, але й аномалій в усіх шарах планети та її геофізичних параметрах. Наростання цих змін відбувається експоненційно. Комплексний аналіз наукових даних показує, що головною причиною цього є астрономічні цикли, які повторюються кожні 12 000 років.

Гіпотеза про вплив космічних факторів підтверджується аналогічними змінами, які одночасно із Землею почали відбуватися на інших планетах Сонячної системи та їхніх супутниках. Наприклад, на Урані³⁵⁶, Юпитері³⁵⁷ та Венері³⁵⁸ збільшується швидкість вітрів і розширюються зони ураганів. На Марсі спостерігається танення крижаних шапок на полюсах³⁵⁹, а вулканічна активність на Венері³⁶⁰ та Марсі продовжує зростати³⁶¹. Крім того, на Марсі, мертвій планеті, посилюються землетруси³⁶², що свідчить про появу аномальної активності в його надрах.

Критичні зміни в системі Землі почали проявлятися з 1995 року, коли було зафіксовано значні геофізичні аномалії, зокрема різке прискорення обертання Землі, зміщення її осі та початок дрейфу північного магнітного полюса (рис. 136).

³⁵⁶de Pater, I. et al. Record-breaking storm activity on Uranus in 2014. *Icarus* 252, 121-128 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.01.008>

³⁵⁷Wong, M. H. et al. Evolution of the Horizontal Winds in Jupiter's Great Red Spot From One Jovian Year of HST/WFC3 Maps. *Geophysical Research Letters* 48, e2021GL093982 (2021). <https://doi.org/10.1029/2021GL093982>

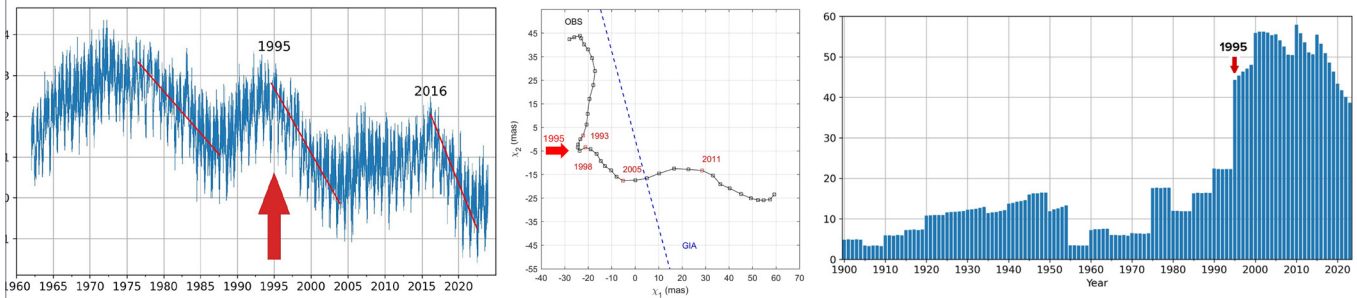
³⁵⁸Khatuntsev, I. V. et al. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging. *Icarus* 226, 140–158 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018>

³⁵⁹Sori, M. M. & Bramson, A. M. Water on Mars, With a Grain of Salt: Local Heat Anomalies Are Required for Basal Melting of Ice at the South Pole Today. *Geophysical Research Letters* 46, 1222–1231 (2019). <https://doi.org/10.1029/2018GL080985>

³⁶⁰Encrenaz, T. et al. HDO and SO₂ thermal mapping on Venus - IV. Statistical analysis of the SO₂ plumes. *A&A* 623, A70 (2019). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833511>

³⁶¹Broquet, A. & Andrews-Hanna, J. C. Geophysical evidence for an active mantle plume underneath Elysium Planitia on Mars. *Nat Astron* (2022). [doi:10.1038/s41550-022-01836-3](https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3) <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3>

³⁶²Fernando, B. et al. A Tectonic Origin for the Largest Marsquake Observed by InSight. *Geophysical Research Letters* 50, e2023GL103619 (2023). <https://doi.org/10.1029/2023GL103619>



Раптове та різке прискорення обертання планети, зафіксоване Центром орієнтації Землі Паризької обсерваторії.

Джерело даних:
IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory. Length of Day – Earth orientation parameters. https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plot-name=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223

Аномальні зміни осі обертання Землі: різка зміна напрямку її дрейфу та збільшення швидкості руху в 17 разів.

Джерело: Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes. Geophysical Research Letters, 48, e2020GL092114 (2021). <https://doi.org/10.1029/2020gl092114>

Рух північного магнітного полюса, який раніше зміщувався зі швидкістю 10 км/рік, раптово прискорився до 55 км/рік і змінив траєкторію в бік півострова Таймир у Сибіру.

Джерело даних:
NOAA data on the position of the North Magnetic Pole <https://www.ncei.noaa.gov/products/wandering-geomagnetic-poles>

Рисунок 136. Зміни геофізичних параметрів Землі 1995 року

Ці аномалії вказують на глибокі зміни в ядрі Землі, що потребують у квадрильйони разів більше витрат енергії, ніж людство виробило за весь час існування цивілізації. Причиною є зовнішній космічний вплив на земне ядро, як і на ядра інших планет Сонячної системи. Цей зовнішній вплив посилює плавлення мантиї, що призводить до її підйому ближче до поверхні. Як наслідок, запускається ланцюгова реакція: посилюється вулканічна та сейсмічна активність, збільшується нагрів із надр і зростання природних катаклізмів в усьому світі.

З 1995 року спостерігається помітне наростання сейсмічної активності, що характеризується збільшенням частоти, сили та енергії землетрусів. Ця тенденція є помітною як на суші, так і в океанах, зокрема в регіонах, де раніше майже не фіксували сейсмічну активність. Усе це вказує на глобальний масштаб змін. Важливо зазначити, що збільшення кількості землетрусів магнітудою 5,0 і вище не пов'язане зі збільшенням мережі або чутливості датчиків, а дійсно відображає зміни в геодинаміці Землі. За сумарними даними Міжнародного сейсмологічного центру, кількість таких землетрусів за останні 25 років істотно зросла та продовжує збільшуватися (рис. 137).

Крім того, наростає сейсмічна активність поблизу вулканів, зокрема супервулканів, таких як Еллоустоун у США, Флегрейські поля в Італії³⁶³ й Таупо в Новій Зеландії³⁶⁴, а також інших вулканів, виверження яких відбувалися протягом попередніх 12 000-річних циклів (рис. 137).

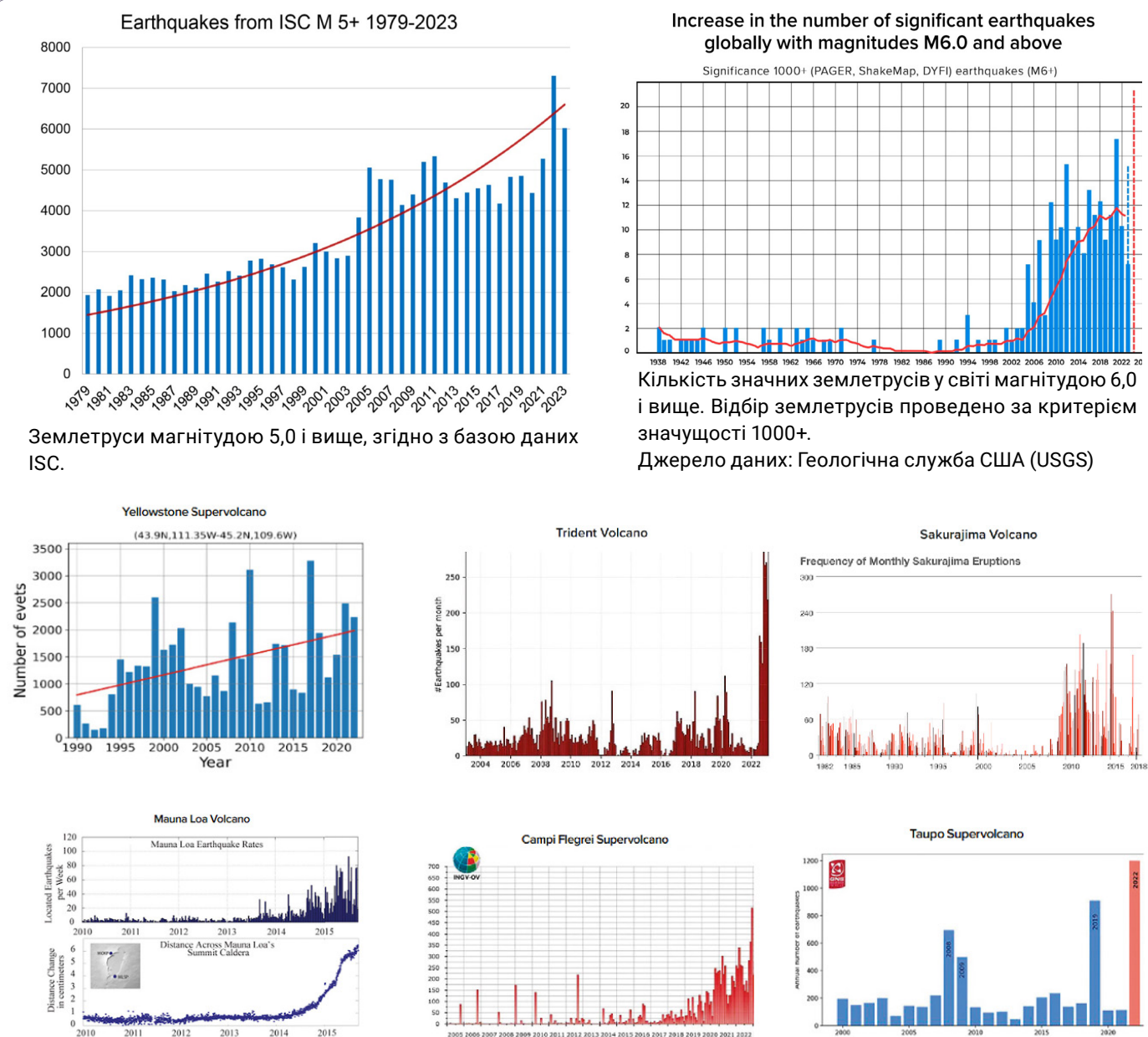


Рисунок 137. Зростання сейсмічної активності в цілому по планеті та поблизу вулканів і супервулканів

Щороку дедалі більше днів відзначаються виверженнями вулканів, причому викинута лава часто має аномальні властивості, такі як перегрів і незвичайний хімічний склад, характерний для магми, що походить із глибинних шарів мантії.

³⁶³Fanpage.it. At Campi Flegrei 675 earthquakes in April 2023: it is the month with the most tremors in the last 20 years. (2023) <https://www.fanpage.it/napoli/campi-flegrei-675-terremoti-aprile-2023> (Дата доступу: 01.05.2025).

³⁶⁴GeoNet. Strong M5.6 earthquake consistent with continued minor volcanic unrest at Taupō. Volcanic Alert Level remains at Level 1. (2022) <https://www.geonet.org.nz/vabs/7tu66lDztDnlaYDG0LYSgl> (Дата доступу: 01.05.2025).

Особливу стурбованість викликає збільшення числа глибокофокусних землетрусів, які відбуваються на глибинах понад 300 км, іноді сягаючи 750 км під поверхню Землі. Ці явища виникають не в земній корі, а в мантії, де матеріал мантії не руйнується, а деформується, немов пластилін, що робить природу таких землетрусів незвичною. Оскільки ці землетруси відбуваються за умов екстремального тиску та високих температур, можна зробити висновок, що ці потужні вибухи в мантії за енергією співмірні з одночасним детонуванням великої кількості атомних бомб усередині мантії Землі. Крім того, глибокофокусні землетруси часто ініціюють потужні сейсмічні поштовхи в земній корі, посилюючи їх руйнівний вплив. З 1995 року спостерігається стрімке зростання кількості таких глибинних землетрусів (рис. 138), що збігається з іншими геодинамічними аномаліями, які розпочалися в той самий період. Зростання кількості цих внутрішньомантіїних вибухів вказує на збільшення енергії в глибинах планети та інтенсивне плавлення мантії, що може призвести до масштабних вивержень вулканів.

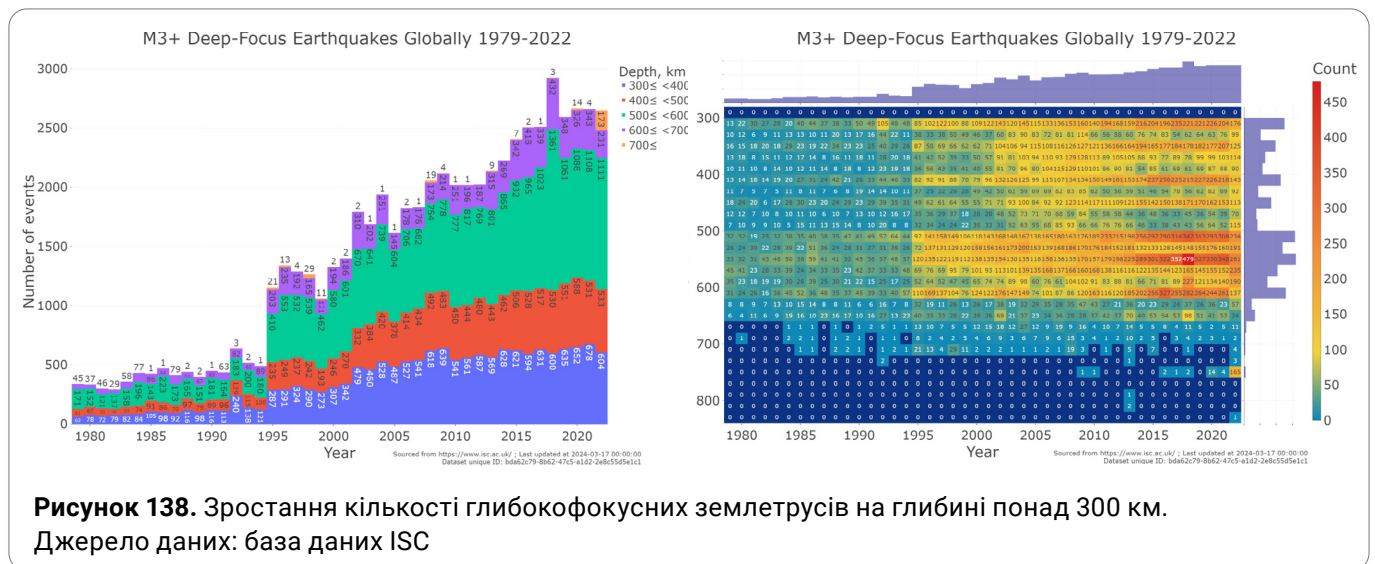


Рисунок 138. Зростання кількості глибокофокусних землетрусів на глибині понад 300 км.
Джерело даних: база даних ISC

Під впливом відцентрових сил розплавлена магма в мантії з 1995 року почала активно підніматися до поверхні Землі, розмиваючи та посилюючи нагрів літосфери зсередини більше, ніж зазвичай. Це підняття магми призводить до збільшення геотермального потоку з надр планети й активує магматичні плюми під льодовиками Західної Антарктиди, Центральної Гренландії та Сибіру. Як результат, льодовики та вічна мерзлота починають прискорено танути знизу догори^{365 366 367}.

Отже, причиною нагріву океану є висхідна магма, яка особливо інтенсивно нагріває океанічну кору, що є тоншою та вразливішою порівняно з континентальною.

³⁶⁵Rogozhina, I. et al. Melting at the base of the Greenland ice sheet explained by Iceland hotspot history. *Nature Geosci* 9, 366–369 (2016).
<https://doi.org/10.1038/ngeo2689>

³⁶⁶Van Der Veen, C. J., Leftwich, T., Von Frese, R., Csatho, B. M. & Li, J. Subglacial topography and geothermal heat flux: Potential interactions with drainage of the Greenland ice sheet. *Geophysical Research Letters* 34, 2007GL030046 (2007). <https://doi.org/10.1029/2007GL030046>

³⁶⁷Dziadek, R., Ferraccioli, F. & Gohl, K. High geothermal heat flow beneath Thwaites Glacier in West Antarctica inferred from aeromagnetic data. *Commun Earth Environ* 2, 162 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00242-3>

Історичні дані з геологічних і крижаних кернів свідчать про те, що Земля стикалася з подібними катастрофічними циклами кожні 12 000 років. Кожен другий цикл, тобто кожні 24 000 років, планетарні катастрофи мають більш руйнівний характер (рис. 139).

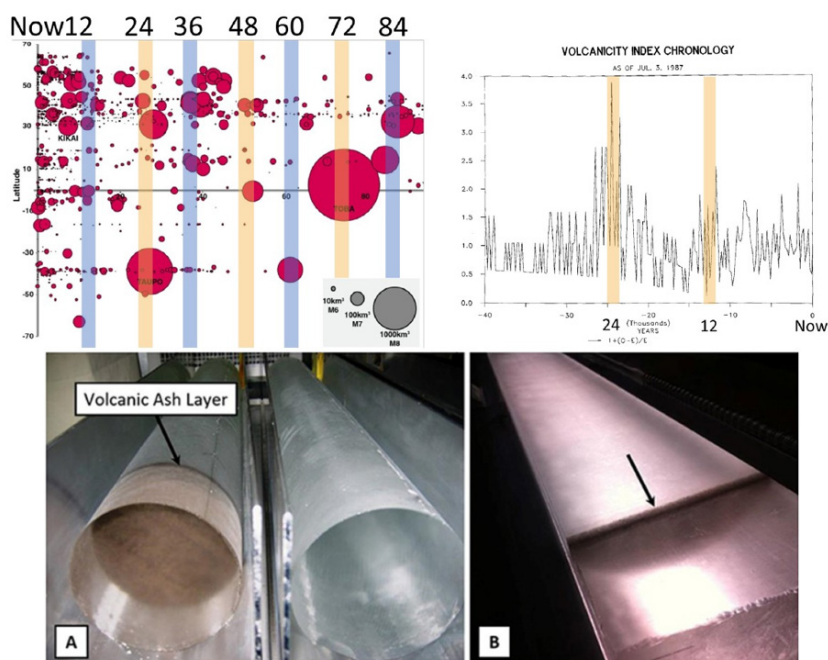


Рисунок 139. Графіки ілюструють катастрофічну вулканічну активність, що відбувається кожні 12 000 років, і ще інтенсивніші події кожні 24 000 років.

Джерела: Brown, S. K., Croswell, H. S., Sparks, R. S.J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*, 3 (5) (2014). <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>
Bryson, R. A. Late quaternary volcanic modulation of Milankovitch climate forcing. *Theoretical and Applied Climatology*, 39, 115–125 (1989). <https://doi.org/10.1007/bf00868307>

Саме в такий цикл зараз входить Земля. Однак цього разу через антропогенне забруднення океану мікро- й нанопластиком посилюється тепловий дисбаланс у мантії, що призводить до збільшення кількості глибокофокусних землетрусів, утворення нових магматичних осередків і загальної нестабільності планети. Саме тому катаклізми нині наростають набагато швидше та потужніше, ніж у попередніх циклах. Фактично забруднення океану стало головною причиною того, що Земля може не впоратися з цим циклом. Важливо розуміти, що вирішення питання із забрудненням океану мікро- й нанопластиком може уповільнити розвиток катаклізмів, але не зупинить їх.



Детальніше ознайомитися з інформацією про геодинамічну активізацію надр Землі у цей період часу, цикл катаклізмів 12 000 років, і шляхи вирішення цієї проблеми можна у доповіді:

**«ПРО ПРОГРЕСІЮ КЛІМАТИЧНИХ
КАТАКЛІЗМІВ НА ЗЕМЛІ ТА ЇХНІ
КАТАСТРОФІЧНІ НАСЛІДКИ»**

Як показали багаторічні міждисциплінарні дослідження геодинамічних змін у циклі 12 000 років, причиною первинного нагрівання океану є висхідна магма, яка особливо сильно впливає на океанічну кору, тоншу та вразливішу порівняно до континентальної. Забруднення Світового океану пластиком і накопичення частинок мікро- й нанопластику стає критичним фактором, що змінює теплофізичні властивості океану. Присутність цих синтетичних частинок в океанічній воді істотно знижує її здатність проводити тепло, що порушує природні процеси теплообміну між глибинними шарами океану та поверхнею, але що навіть критичніше — порушує відведення тепла від літосферних плит. В умовах збільшення геодинамічної активності під час циклу 12 000 років критична зміна теплопровідної функції океанічної води збільшує не лише нагрівання океану та атмосфери, але й нагрів у надрах. Це призводить до наростання плавлення мантиї і, як наслідок, до дедалі інтенсивнішої геодинамічної активності.

Це викликає накопичення надлишкової енергії в надрах Землі, що призводить до збільшення кількості глибокофокусних землетрусів і прискореного формування нових магматичних осередків. Зі свого боку, ці процеси ще більше посилюють нестабільність планети та прискорюють нагрівання океану.

Формується небезпечний замкнутий цикл: геодинамічна активність нагріває океан → нагрівання прискорює розкладання пластику → збільшення концентрації мікропластику знижує теплопровідність води → порушується відведення тепла від надр → посилюється геодинамічна активність і частота землетрусів → дедалі більше нагрівається океан і тим більше прискорюється процес розпаду пластику на мікро- й наночастинки.



Це призводить до зростання частоти та сили екстремальних погодних явищ і природних катаклізмів, таких як повені, урагани та тропічні циклони, які сьогодні досягають безпрецедентної інтенсивності.

Таким чином, забруднення океану мікро- й нанопластиком не лише завдає значної шкоди здоров'ю людини, екосистемам, біосфері та кліматичній системі, але також сприяє посиленню нагрівання океану. Крім того, це посилює і без того руйнівні катастрофи 24 000-річного циклу, в який зараз вступила Земля. Це створює безпрецедентні ризики не тільки для виживання людства, але й для самої планети.

Вирішення глобальної екологічної, кліматичної та геодинамічної кризи вимагає міжнародної співпраці вчених різних дисциплін для термінової розробки та реалізації комплексних заходів. Ці рішення повинні включати не лише очищення океану від мікро- й нанопластику та зменшення його негативного впливу на здоров'я людини, але й розробку фундаментальних рішень для усунення геодинамічних загроз.

Ознайомитися з запропонованими рішеннями можна у відповідних доповідях:



ДОПОВІДЬ

**«ПРО ПРОГРЕСІЮ КЛІМАТИЧНИХ
КАТАКЛІЗМІВ НА ЗЕМЛІ ТА ЇХНІ
КАТАСТРОФІЧНІ НАСЛІДКИ»**



ДОПОВІДЬ

**«ПРО ЗАГРОЗУ ПРОРИВУ
МАГМАТИЧНОГО ПЛЮМУ В СИБІРУ ТА
ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ ЦІЄЇ ПРОБЛЕМИ»**

ВИСНОВКИ. НАНОПЛАСТИК — ВИКЛИК, ЯКИЙ НЕ МОЖНА ІГНОРУВАТИ

Проблема пластикового забруднення, особливо у формах мікро- й нанопластику, вийшла за межі локальних екологічних наслідків і набула характеру багатоаспектної глобальної загрози. Сучасні дослідження підтверджують як прямий, так і опосередкований вплив МНП на кліматичну систему, стійкість екосистем і здоров'я людини. Частинки мікропластику здатні проникати в живі організми, викликати запальні реакції, порушувати гормональний баланс, функції імунної та репродуктивної систем, а також змінювати фізико-хімічні властивості навколишнього середовища — від морської води до атмосфери.

Понад 10 років тому представники міжнародної наукової спільноти «АЛЛАТРА» висунули припущення про зростаючий вплив пластикового забруднення на кліматичні аномалії та загострення проблем здоров'я населення. Сьогодні ці гіпотези знаходять підтвердження в незалежних дослідженнях, проведених провідними науковими установами. Швидке накопичення даних про екологічні та біологічні ефекти МНП відкриває нові горизонти аналізу, в тому числі трансформацію кліматичних патернів, зміни в гідросфері та наростання системних ризиків для сталого розвитку. Особливу тривогу викликає те, що навіть мікроскопічні концентрації нанопластику можуть запускати каскадні ефекти в біосфері та кліматі. Пластик перестав бути просто твердим сміттям — він стає активним агентом трансформації середовища проживання та людського організму. Наслідки його поширення проявляються вже зараз. Проблема МНП зачіпає не лише екологію та медицину, але також вимагає осмислення в контексті національної безпеки, макроекономіки та міжнародних відносин.

В межах стратегії протидії цій зазрозі Рух «АЛЛАТРА» запропонував два ключові напрями, що мають як прикладний, так і прогностичний потенціал. Першим із них є масштабне впровадження технологій атмосферної генерації води (АГВ), які здатні одночасно вирішувати проблему дефіциту прісної води та робити внесок в очищення атмосфери й океанів від мікропластикових частинок. Однак реалізація АГВ-технологій вимагає врахування можливих ризиків — зокрема, підвищення концентрації МНП у повітрі і, як наслідок, посилення інгаляційного впливу на людину. Це диктує необхідність паралельної розробки високоефективних фільтраційних і захисних систем.

Другим стратегічним напрямом, також запропонованим «АЛЛАТРА», є розробка методів нейтралізації або екранування електростатичного заряду нанопластику — одного з головних факторів його токсичності. Заряджені частинки нанопластику активно взаємодіють із клітинними мембранами, білками та генетичним матеріалом, формуючи стійкі молекулярні зв'язки. Такі частинки проникають через біологічні бар'єри, зокрема гематоенцефалічний бар'єр, накопичуються в тканинах та ініціюють каскад клітинних порушень — від окислювального стресу до апоптозу. Зниження електростатичної активності мікро- й нанопластику може значно зменшити його шкідливість і уповільнити накопичення в організмі.

За оцінками авторів доповіді, екранування або нейтралізація електростатичного заряду здатні знизити потенційну небезпеку МНП щонайменше на 50 %, що робить цей напрям досліджень критично важливим. Це створить необхідний часовий проміжок для розробки більш комплексних стратегій діагностики, профілактики та виведення МНП з людського організму й очищення біосфери. У цьому контексті особливого значення набувають дослідження в галузях біофізики, нанотехнологій і молекулярної токсикології.

Таким чином, ефективне реагування на загрозу МНП вимагає не локальних заходів, а глобального та міждисциплінарного підходу. Потрібна координація зусиль у сфері наукових досліджень, технологічних рішень, нормативного регулювання та міжнародної кооперації. Пластикове забруднення необхідно розглядати не як вузьку екологічну проблему, а як системний виклик, що зачіпає здоров'я, безпеку, ресурсну забезпеченість і стійкість соціальної інфраструктури.

Унікальність цієї доповіді полягає в комплексному міждисциплінарному підході, що об'єднує дані з фізики, хімії, біології та медицини. Такий синтез дозволяє розглядати проблему МНП як цивілізаційний виклик, що вимагає рішень на багатьох рівнях. Нині світова спільнота поступово усвідомлює справжні масштаби цієї загрози. Незважаючи на відсутність універсального рішення, саме прагнення до його пошуку та розвиток наукового співробітництва можуть визначити шлях до подолання кризи. Головний виклик — не у відсутності рішення, а в здатності знайти його до настання критичної точки.

Джерела

- Agence France-Presse. Japan's famous Nara deer dying from eating plastic bags. The Guardian. <https://www.theguardian.com/world/2019/jul/10/japans-famous-nara-deer-dying-from-eating-plastic-bags> (Дата доступу: 01.05.2025).
- Ahern, T. P. et al. Medication–Associated Phthalate Exposure and Childhood Cancer Incidence. JNCI: Journal of the National Cancer Institute 114, 885–894 (2022). <https://doi.org/10.1093/jnci/djac045>
- Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. Coatings 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>
- Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research. Micro- and nanoplastic from the atmosphere is polluting the ocean. <https://www.awi.de/en/about-us/service/press/single-view/mikro-und-nanoplastik-aus-der-atmosphaere-belastet-meere.html> (Дата доступу: 01.05.2025)
- Alijagic, A. et al. The triple exposure nexus of microplastic particles, plastic-associated chemicals, and environmental pollutants from a human health perspective. Environment International 188, 108736 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108736>
- AllatRa TV. Anthropogenic factor in the oceans' demise: Popular science film. Time 55:00, (2025). <https://allatra.tv/en/video/anthropogenic-factor-in-the-oceans-demise-popular-science-film> (Дата доступу: 01.05.2025).
- Allen, S. et al. Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics. PLoS ONE 15, e0232746 (2020). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232746>
- Alqahtani, S., Alqahtani, S., Saquib, Q. & Mohiddin, F. Toxicological impact of microplastics and nanoplastics on humans: understanding the mechanistic aspect of the interaction. Front. Toxicol. 5, 1193386 (2023). <https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1193386>
- Amato-Lourenço, L. F. et al. Microplastics in the Olfactory Bulb of the Human Brain. JAMA Netw Open 7, e2440018 (2024). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.40018>
- Amato-Lourenço, L. F. et al. Presence of airborne microplastics in human lung tissue. Journal of Hazardous Materials 416, 126124 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126124>
- American College of Cardiology. New evidence links microplastics with chronic disease. (2025) <https://www.acc.org/About-ACC/Press-Releases/2025/03/25/10/19/New-Evidence-Links-Microplastics-with-Chronic-Disease> (Дата доступу: 01.05.2025).
- Animal Survival International. Sri Lankan Elephants Die After Eating Plastic From Rubbish Dumps. (2020) <https://animalsurvival.org/habitat-loss/sri-lankan-elephants-die-after-eating-plastic-from-rubbish-dumps> (Дата доступу: 01.05.2025).

Argo Program. 'Mission'. (n.d.) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (Дата доступу: 10.05.2025).

Arrigo, F., Impellitteri, F., Piccione, G. & Faggio, C. Phthalates and their effects on human health: Focus on erythrocytes and the reproductive system. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology* 270, 109645 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2023.109645>

Ask a Scientist Blog. If molecules in colder things get denser, why does ice float? WordPress. <https://askascientistblog.wordpress.com/2015/11/04/if-molecules-in-colder-things-get-denser-why-does-ice-float> (Дата доступу: 01.05.2025).

Auta, H. S. et al. Enhanced microbial degradation of PET and PS microplastics under natural conditions in mangrove environment. *Journal of Environmental Management* 304, 114273 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114273>

Auta, H. S., Emenike, C. U., Jayanthi, B. & Fauziah, S. H. Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. isolated from mangrove sediment. *Marine Pollution Bulletin* 127, 15–21 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.036>

Autism Parenting Magazine. Autism Statistics You Need To Know in 2024. (2025) <https://www.autismparentingmagazine.com/autism-statistics> (Дата доступу: 01.05.2025).

Avio, C. G., Gorbi, S. & Regoli, F. Experimental development of a new protocol for extraction and characterization of microplastics in fish tissues: First observations in commercial species from Adriatic Sea. *Marine Environmental Research* 111, 18–26 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.06.014>

Aykut, B., Pushalkar, S., Chen, R. et al. The fungal mycobiome promotes pancreatic oncogenesis via activation of MBL. *Nature* 574, 264–267 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1608-2>

Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. *Nanomaterials* 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112935>

Azim Premji University. The Biology of Electricity: How electricity is critical to the functioning of the human body. (2022) <https://azimpremjiuniversity.edu.in/news/2022/the-biology-of-electricity> (Дата доступу: 01.05.2025).

Baker, B. H. et al. Ultra-processed and fast food consumption, exposure to phthalates during pregnancy, and socioeconomic disparities in phthalate exposures. *Environment International* 183, 108427 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108427>

Baker, E. T. & German, C. R. On the Global Distribution of Hydrothermal Vent Fields. in *Mid-Ocean Ridges: Hydrothermal Interactions Between the Lithosphere and Oceans* (eds German, C. R., Lin, J. & Parson, L. M.) 245–266 (American Geophysical Union, 2004).

Baker, E. T. et al. How many vent fields? New estimates of vent field populations on ocean ridges from precise mapping of hydrothermal discharge locations. *Earth Planet. Sci. Lett.* 449, 186–196 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.05.031>

- Bandmann, V., Müller, J. D., Köhler, T. & Homann, U. Uptake of fluorescent nano beads into BY2-cells involves clathrin-dependent and clathrin-independent endocytosis. *FEBS Letters* 586, 3626–3632 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2012.08.008>
- Baribo, L. E., Avens, J. S. & O'Neill, R. D. Effect of Electrostatic Charge on the Contamination of Plastic Food Containers by Airborne Bacterial Spores. *Applied Microbiology* 14, 905–913 (1966). <https://doi.org/10.1128/am.14.6.905-913.1966>
- Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
- Basaran, B. et al. Microplastics in honey from Türkiye: Occurrence, characteristic, human exposure, and risk assessment. *Journal of Food Composition and Analysis* 135, 106646 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106646>
- Alma, A. M., de Groot, G. S. & Buteler, M. Microplastics incorporated by honeybees from food are transferred to honey, wax and larvae. *Environmental Pollution* 320, 121078 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121078>
- Pasquini, E. et al. Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition. *Science of The Total Environment* 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>
- Behrenfeld et al. 2009 Роберта Симмона <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton> (Дата доступу: 01.05.2025).
- Bell, Katherine L. C., et al. "How Little We've Seen: A Visual Coverage Estimate of the Deep Seafloor." *Science Advances*, vol. 11, no. 19, 2025, eadp8602. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adp8602>.
- Bengalli, R. et al. Characterization of microparticles derived from waste plastics and their bio-interaction with human lung A549 cells. *Journal of Applied Toxicology* 42, 2030–2044 (2022). <https://doi.org/10.1002/jat.4372>
- Berger Bioucas, F. E. et al. Effective Thermal Conductivity of Nanofluids: Measurement and Prediction. *Int J Thermophys* 41, 55 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10765-020-2621-2>
- Beriot, N., Peek, J., Zornoza, R., Geissen, V. & Huerta Lwanga, E. Low density-microplastics detected in sheep faeces and soil: A case study from the intensive vegetable farming in Southeast Spain. *Science of The Total Environment* 755, 142653 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142653>
- Bhuiyan, M. M. U. et al. Oxygen declination in the coastal ocean over the twenty-first century: Driving forces, trends, and impacts. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 9, 100621 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100621>
- Bopp, L. et al. Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. *Biogeosciences* 10, 6225–6245 (2013). <https://doi.org/10.5194/bg-10-6225-2013>
- Borreani, G. & Tabacco, E. 9 - Plastics in Animal Production. in *A Guide to the Manufacture, Performance, and Potential of Plastics in Agriculture* (ed. Orzolek, M. D.) 145–185 (Elsevier, 2017). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102170-5.00009-9>

- Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P. & Vijver, M. G. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere* 226, 774–781 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>
- Boyce, D. G., Lewis, M. R. & Worm, B. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature* 466, 591–596 (2010). <https://doi.org/10.1038/nature09268>
- Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnenberger, M. & Sukumaran, S. Plastic rain in protected areas of the United States. *Science* 368, 1257–1260 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aaz5819>
- Brennecke, D., Duarte, B., Paiva, F., Caçador, I. & Canning-Clode, J. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 178, 189–195 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.003>
- Breton, J. L. Visitation patterns of African elephants (*Loxodonta africana*) to a rubbish dumpsite in Victoria Falls, Zimbabwe. *Pachyderm* 60, 45–54 (2019). <https://doi.org/10.69649/pachyderm.v60i.30>
- Broquet, A. & Andrews-Hanna, J. C. Geophysical evidence for an active mantle plume underneath Elysium Planitia on Mars. *Nat Astron* (2022). <https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3>
- Broszeit, S., Hattam, C. & Beaumont, N. Bioremediation of waste under ocean acidification: Reviewing the role of *Mytilus edulis*. *Marine Pollution Bulletin* 103, 5–14 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.12.040>
- Brown, S. K., Croswell, H. S., Sparks, R. S.J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*, 3 (5) (2014). <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>
- Brynzak-Schreiber, E. et al. Microplastics role in cell migration and distribution during cancer cell division. *Chemosphere* 353, 141463 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141463>
- Bryson, R. A.. Late quaternary volcanic modulation of Milankovitch climate forcing. *Theoretical and Applied Climatology*, 39, 115–125 (1989). <https://doi.org/10.1007/bf00868307>
- Busse, H. L., Ariyasena, D. D., Orris, J. & Freedman, M. A. Pristine and Aged Microplastics Can Nucleate Ice through Immersion Freezing. *ACS EST Air* 1, 1579–1588 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsestair.4c00146>
- Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V. & Uricchio, V. F. A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health. *IJERPH* 17, 1212 (2020). <https://doi.org/10.3390/ijerph17041212>
- Casella, C. & Ballaz, S. J. Genotoxic and neurotoxic potential of intracellular nanoplastics: A review. *Journal of Applied Toxicology* 44, 1657–1678 (2024). <https://doi.org/10.1002/jat.4598>
- Centers for Disease Control and Prevention. Autism Prevalence Higher, According to Data from 11 ADDM Communities. <https://www.cdc.gov/media/releases/2023/p0323-autism.html> (Дата доступу: 01.05.2025).

- Chadwick, J., Keller, R., Kamenov, G., Yogodzinski, G. & Lupton, J. The Cobb hot spot: HIMU-DMM mixing and melting controlled by a progressively thinning lithospheric lid. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 15, 3107–3122 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014gc005334>
- Chen, M. J., Karaviti, L. P., Roth, D. R. & Schlomer, B. J. Birth prevalence of hypospadias and hypospadias risk factors in newborn males in the United States from 1997 to 2012. *Journal of Pediatric Urology* 14, 425.e1-425.e7 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jpurol.2018.08.024>
- Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>
- Cheng, L. et al. Another Year of Record Heat for the Oceans. *Adv. Atmos. Sci.* 40, 963–974 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2385-2>
- Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Adv. Atmos. Sci.* 37, 137–142 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>
- Chew, T., Daik, R. & Hamid, M. Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Dodecylbenzenesulfonic Acid-Doped Polyaniline Particles—Water Based Nanofluid. *Polymers* 7, 1221–1231 (2015). <https://doi.org/10.3390/polym7071221>
- China Environment News. Microplastics "secretly attack" the human body, how much damage can they cause? (2025) <https://cenews.com.cn/news.html?aid=1205048> (Дата доступу: 01.05.2025).
- Climate.gov. 'The role of the ocean in tempering global warming'. (2014) <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/role-ocean-tempering-global-warming> (Дата доступу: 10.05.2025).
- ClimateReanalyzer.org, Climate Change Institute, University of Maine, Dataset. NOAA OISST. https://climatoreanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2 (Дата доступу: 01.05.2025).
- Columbia Climate School. 'Is Global Heating Hiding Out in the Oceans?'. (2013) <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Дата доступу: 10.05.2025).
- Corinaldesi, C., Canensi, S., Dell'Anno, A. et al. Multiple impacts of microplastics can threaten marine habitat-forming species. *Commun Biol* 4, 431 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01961-1>
- Crisp, J. A. Rates of magma emplacement and volcanic output. *J. Volc. Geotherm. Res.* 20, 177–211 (1984). [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90039-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90039-8)
- Da Costa Filho, P. A. et al. Detection and characterization of small-sized microplastics ($\geq 5 \mu\text{m}$) in milk products. *Sci Rep* 11, 24046 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03458-7>
- Dante, S. et al. Selective Targeting of Neurons with Inorganic Nanoparticles: Revealing the Crucial Role of Nanoparticle Surface Charge. *ACS Nano* 11, 6630–6640 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.nano.7b00397>
- Dawson, A. L. et al. Turning microplastics into nanoplastics through digestive fragmentation by Antarctic krill. *Nat Commun* 9, 1001 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03465-9>

- De Falco, F., Di Pace, E., Cocca, M. & Avella, M. The contribution of washing processes of synthetic clothes to microplastic pollution. *Sci Rep* 9, 6633 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43023-x>
- De Jersey, A. M. et al. Seabirds in crisis: Plastic ingestion induces proteomic signatures of multiorgan failure and neurodegeneration. *Sci. Adv.* 11, eads0834 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.ads0834>
- De Pater, I. et al. Record-breaking storm activity on Uranus in 2014. *Icarus* 252, 121-128 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.01.008>
- De Souza Machado, A. A. et al. Impacts of Microplastics on the Soil Biophysical Environment. *Environ. Sci. Technol.* 52, 9656–9665 (2018). <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>
- De Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S. & Rillig, M. C. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology* 24, 1405–1416 (2018). <https://doi.org/10.1111/gcb.14020>
- Deike, L., Reichl, B. G. & Paulot, F. A Mechanistic Sea Spray Generation Function Based on the Sea State and the Physics of Bubble Bursting. *AGU Advances* 3, e2022AV000750 (2022). <https://doi.org/10.1029/2022AV000750>
- Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL092114 (2021). <https://doi.org/10.1029/2020gl092114>
- Derraik, J. G. B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Marine Pollution Bulletin* 44, 842–852 (2002). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5)
- Dick, L. et al. The adsorption of drugs on nanoplastics has severe biological impact. *Sci Rep* 14, 25853 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75785-4>
- Dohlman, A. B. et al. A pan-cancer mycobiome analysis reveals fungal involvement in gastrointestinal and lung tumors. *Cell* 185, 3807-3822.e12 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cell.2022.09.015>
- Dris, R. et al. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environmental Pollution* 221, 453–458 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>
- Dugershaw-Kurzer, B. et al. Nanoparticles Dysregulate the Human Placental Secretome with Consequences on Angiogenesis and Vascularization. *Advanced Science* 11, 2401060 (2024). <https://doi.org/10.1002/adv.202401060>
- Duncan, E. M. et al. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. *Global Change Biology* 25, 744–752 (2019). <https://doi.org/10.1111/gcb.14519>
- Dürig, T., White, J.D.L., Murch, A.P. et al. Deep-sea eruptions boosted by induced fuel–coolant explosions. *Nat. Geosci.* 13, 498–503 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0603-4>
- [EarthDay.org](https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know). Babies vs. Plastics Report. (2023) <https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know> (Дата доступу: 01.05.2025).

Encrenaz, T. et al. HDO and SO₂ thermal mapping on Venus - IV. Statistical analysis of the SO₂ plumes. *A&A* 623, A70 (2019). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833511>

Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025) <https://www.britannica.com/science/neuron> (Дата доступу: 01.05.2025).

Enders, K., Lenz, R., Stedmon, C. A. & Nielsen, T. G. Abundance, size and polymer composition of marine microplastics $\geq 10 \mu\text{m}$ in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution. *Marine Pollution Bulletin* 100, 70–81 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.027>

Eriksen, M. et al. A growing plastic smog, now estimated to be over 170 trillion plastic particles afloat in the world's oceans—Urgent solutions required. *PLoS ONE* 18, e0281596 (2023). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596>

Eriksen, M. et al. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. *PLoS ONE* 9, e111913 (2014). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>

Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. The plight of camels eating plastic waste. *Journal of Arid Environments* 185, 104374 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374>

Eunomia. Plastics in the Marine Environment. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment> (Дата доступу: 01.05.2025)

European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024 <https://www.essl.org/cms/hailstorms-of-2024> (Дата доступу: 01.05.2025).

[Fanpage.it](https://www.fanpage.it). At Campi Flegrei 675 earthquakes in April 2023: it is the month with the most tremors in the last 20 years. (2023) <https://www.fanpage.it/napoli/campi-flegrei-675-terremoti-aprile-2023> (Дата доступу: 01.05.2025).

Federal Office of Public Health. Impact of pollution on embryonic development - Nanoparticles: Risk for babies in the womb. FOPH. (2024) <https://www.bit.admin.ch/en/nsb?id=101285> (Дата доступу: 01.05.2025).

Feldkamp, M. L. et al. Gastroschisis prevalence patterns in 27 surveillance programs from 24 countries, International Clearinghouse for Birth Defects Surveillance and Research, 1980–2017. *Birth Defects Research* 116, e2306 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2306>

Fernando, B. et al. A Tectonic Origin for the Largest Marsquake Observed by InSight. *Geophysical Research Letters* 50, e2023GL103619 (2023). <https://doi.org/10.1029/2023GL103619>

Financial Times. Have humans passed peak brain power? <https://www.ft.com/content/a8016c64-63b7-458b-a371-e0e1c54a13fc> (Дата доступу: 01.05.2025).

Frazier, T. W., Georgiades, S., Bishop, S. L. & Hardan, A. Y. Behavioral and Cognitive Characteristics of Females and Males With Autism in the Simons Simplex Collection. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry* 53, 329-340.e3 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2013.12.004>

Galyon, H. et al. Long-term in situ ruminal degradation of biodegradable polymers in Holstein dairy cattle. *JDS Communications* 4, 70–74 (2023). <https://doi.org/10.3168/jdsc.2022-0319>

Gao, Y., Fang, H. & Ni, K. A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow. *Sci Rep* 11, 9542 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88810-7>

Gao, Y., Fang, H., Ni, K. & Feng, Y. Water clusters and density fluctuations in liquid water based on extended hierarchical clustering methods. *Sci Rep* 12, 8036 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11947-6>

Garbage Patches. Marine Debris Program. NOAA <https://marinedebris.noaa.gov/discover-marine-debris/garbage-patches> (Дата доступу: 01.05.2025)

Gase, A. et al. Subducting volcanoclastic-rich upper crust supplies fluids for shallow megathrust and slow slip. *Sci. Adv.* 9, eadh0150 (2023). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh0150>

GeoNet. Strong M5.6 earthquake consistent with continued minor volcanic unrest at Taupō. Volcanic Alert Level remains at Level 1. (2022) <https://www.geonet.org.nz/vabs/7tu66lDztDnlaYDG0LYSgl> (Дата доступу: 01.05.2025).

Geueke, B. et al. Evidence for widespread human exposure to food contact chemicals. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 1–12 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41370-024-00718-2>

Geyer, R., Jambeck, J. R. & Law, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 3, e1700782 (2017). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

Gigault, J. et al. Current opinion: What is a nanoplastic? *Environmental Pollution* 235, 1030–1034 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024>

Glausiusz, J. Toxicology: The plastics puzzle. *Nature* 508, 306–308 (2014). <https://doi.org/10.1038/508306a>

Glorio Patrucco, S., Rivoira, L., Bruzzoniti, M. C., Barbera, S. & Tassone, S. Development and application of a novel extraction protocol for the monitoring of microplastic contamination in widely consumed ruminant feeds. *Science of The Total Environment* 947, 174493 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174493>

Gou, Z., Wu, H., Li, S., Liu, Z. & Zhang, Y. Airborne micro- and nanoplastics: emerging causes of respiratory diseases. *Particle and Fibre Toxicology* 21, 50 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12989-024-00613-6>

Grechi, N. et al. Microplastics are present in women's and cows' follicular fluid and polystyrene microplastics compromise bovine oocyte function in vitro. *eLife* 12, (2023). <https://doi.org/10.7554/eLife.86791.1>

Guo, X. et al. Discovery and analysis of microplastics in human bone marrow. *Journal of Hazardous Materials* 477, 135266 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135266>

- Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L. & Zeng, E. Y. A Global Perspective on Microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125, e2018JC014719 (2020). <https://doi.org/10.1029/2018JC014719>
- Hall-Spencer, J. M. & Harvey, B. P. Ocean acidification impacts on coastal ecosystem services due to habitat degradation. *Emerging Topics in Life Sciences* 3, 197–206 (2019). <https://doi.org/10.1042/ETLS20180117>
- Harrison, R. G. Atmospheric electricity and cloud microphysics <https://cds.cern.ch/record/557170/files/p75.pdf> (Дата доступу: 01.05.2025).
- Hasan, M. M. et al. Impact of microplastics on terrestrial ecosystems: A plant-centric perspective. *Environmental Pollution and Management* 1, 223–234 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.epm.2024.11.002>
- Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ. Environmental Impacts of Plastics: Moving beyond the perspective on waste. https://www.ufz.de/index.php?en=36336&webc_pm=44/2024 (Дата доступу: 01.05.2025)
- Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>
- Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>
- Hoffman, M. J. & Hittinger, E. Inventory and transport of plastic debris in the Laurentian Great Lakes. *Marine Pollution Bulletin* 115, 273–281 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.061>
- Hofstede, L. T., Vasse, G. F. & Melgert, B. N. Microplastics: A threat for developing and repairing organs? *Cambridge Prisms: Plastics* 1, e19 (2023). <https://doi.org/10.1017/plc.2023.19>
- How Much of the World's Plastic Waste Actually Gets Recycled? <https://www.visualcapitalist.com/how-much-plastic-gets-recycled> (Дата доступу: 01.05.2025)
- Huang, H. et al. Microplastics in the bloodstream can induce cerebral thrombosis by causing cell obstruction and lead to neurobehavioral abnormalities. *Sci. Adv.* 11, eadr8243 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adr8243>
- Huang, S. et al. Detection and Analysis of Microplastics in Human Sputum. *Environ. Sci. Technol.* 56, 2476–2486 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03859>
- Huang, S. et al. Plastic Waste Management Strategies and Their Environmental Aspects: A Scientometric Analysis and Comprehensive Review. *IJERPH* 19, 4556 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijerph19084556>
- IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory. Day length – Earth orientation parameters: https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plotname=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223 (Дата доступу: 01.05.2025).

Iizuka, T. et al. Mono-(2-ethyl-5-hydroxyhexyl) phthalate promotes uterine leiomyoma cell survival through tryptophan-kynurenine-AHR pathway activation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119, e2208886119 (2022). <https://doi.org/10.1073/pnas.2208886119>

Institute of Marine Sciences (ICM-CSIC). Plastic degradation in the ocean contributes to its acidification. <https://www.icm.csic.es/en/news/plastic-degradation-ocean-contributes-its-acidification> (Дата доступу: 01.05.2025).

IPCC. *Global Warming of 1.5°C*. (Cambridge University Press, 2022). <https://doi.org/10.1017/9781009157940> (Дата доступу: 01.05.2025).

Irigoiien, X. et al. Large mesopelagic fishes biomass and trophic efficiency in the open ocean. *Nat Commun* 5, 3271 (2014). <https://doi.org/10.1038/ncomms4271>

Islam, W., Zeng, F., Alotaibi, M. O. & Khan, K. A. Unlocking the potential of soil microbes for sustainable desertification management. *Earth-Science Reviews* 252, 104738 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104738>

Ivar Do Sul, J. A. & Costa, M. F. The present and future of microplastic pollution in the marine environment. *Environmental Pollution* 185, 352–364 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.036>

Ivleva, N. P. Chemical Analysis of Microplastics and Nanoplastics: Challenges, Advanced Methods, and Perspectives. *Chem. Rev.* 121, 11886–11936 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00178>

James P. Barry, Stephen Widdicombe, and Jason M. Hall-Spencer. Effects of ocean acidification on marine biodiversity and ecosystem function. *Ocean acidification*, edited by Jean-Pierre Gattuso, Lina Hansson. Oxford, Oxford University Press, 2011. <https://books.google.com.ua/books?id=8y-jNFxkALjIC&pg=PA192>

Jamieson, D. T. & Tudhope, J. S. Physical properties of sea water solutions: thermal conductivity. *Desalination* 8, 393–401 (1970). [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)80240-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)80240-4)

Jeffrey, G. A. *An Introduction to Hydrogen Bonding* (Oxford University Press, New York, 1997). <https://books.google.com/books?vid=ISBN0195095499>

Jenna R. Jambeck et al., Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 347, 768-771 (2015). <https://doi.org/10.1126/science.1260352>

Jeong, B. et al. Maternal exposure to polystyrene nanoplastics causes brain abnormalities in progeny. *Journal of Hazardous Materials* 426, 127815 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127815>

Jiefang Daily. Intestine is the second brain? It can also communicate with multiple organs in both directions | New People - Health News. (2025) <https://www.jfdaily.com/staticsg/res/html/web/newsDetail.html?id=866347> (Дата доступу: 01.05.2025).

Jochum, M. et al. Elevated Micro- and Nanoplastics Detected in Preterm Human Placentae. Preprint (2025). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5903715/v1>

- Johnson, Gregory C., et al. "Argo-Two Decades: Global Oceanography, Revolutionized." *Annual Review of Marine Science*, vol. 14, 2022, pp. 379–403. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-022521-102008>.
- Kahane-Rapport, S. R. et al. Field measurements reveal exposure risk to microplastic ingestion by filter-feeding megafauna. *Nat Commun* 13, 6327 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5>
- Karim, A. et al. Interfacial Interactions between Nanoplastics and Biological Systems: toward an Atomic and Molecular Understanding of Plastics-Driven Biological Dyshomeostasis. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 16, 25740–25756 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsami.4c03008>
- Karlsruhe Institute of Technology. Blind spots in the monitoring of plastic waste https://www.kit.edu/kit/english/pi_2022_097_blind-spots-in-the-monitoring-of-plastic-waste.php (Дата доступу: 01.05.2025)
- Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. *Chemosphere* 361, 142380 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380>
- Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. *iScience* 26, 106061 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061>
- Khatuntsev, I. V. et al. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging. *Icarus* 226, 140–158 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018>
- Khutorskoy, M. D., & Polyak, B. G. (2014). Reflection of contrasting geodynamic settings in the thermal field. *Georesources*, (2), 24–43.
- Kim, D. Y. et al. Effects of Microplastic Accumulation on Neuronal Death After Global Cerebral Ischemia. *Cells* 14, 241 (2025). <https://doi.org/10.3390/cells14040241>
- Kim, N.-H., Choo, H.-I. & Lee, Y.-A. Effect of nanoplastic intake on the dopamine system during the development of male mice. *Neuroscience* 555, 11–22 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2024.07.018>
- Kiyama, Y., Miyahara, K. & Ohshima, Y. Active uptake of artificial particles in the nematode *Caenorhabditis elegans*. *Journal of Experimental Biology* 215, 1178–1183 (2012). <https://doi.org/10.1242/jeb.067199>
- Kopatz, V. et al. Micro- and Nanoplastics Breach the Blood–Brain Barrier (BBB): Biomolecular Corona's Role Revealed. *Nanomaterials* 13, 1404 (2023). <https://doi.org/10.3390/nano13081404>
- Kopp, G. & Lean, J. L. A New, Lower Value of Total Solar Irradiance: Evidence and Climate Significance. *Geophysical Research Letters* 38, L01706 (2011). <https://doi.org/10.1029/2010GL045777>
- Kosuth, M., Mason, S. A. & Wattenberg, E. V. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *PLoS ONE* 13, e0194970 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194970>
- Laage, D., Elsaesser, T. & Hynes, J. T. Water Dynamics in the Hydration Shells of Biomolecules. *Chem. Rev.* 117, 10694–10725 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00765>

- LaFemina, P. C. Plate Tectonics and Volcanism. in *The Encyclopedia of Volcanoes* (ed. Sigurdsson, H.) 65–92 (Academic Press, 2015). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00003-1>
- Lamb, J. B. et al. Plastic waste associated with disease on coral reefs. *Science* 359, 460–462 (2018). <https://doi.org/10.1126/science.aar3320>
- Laufkötter, C., Zscheischler, J. & Frölicher, T. L. High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming. *Science* 369, 1621–1625 (2020). <https://doi.org/10.1126/science.aba0690>
- Lax, J. Y., Price, C. & Saaroni, H. On the Spontaneous Build-Up of Voltage between Dissimilar Metals Under High Relative Humidity Conditions. *Sci Rep* 10, 7642 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64409-2>
- Lear, G., Kingsbury, J.M., Franchini, S. et al. Plastics and the microbiome: impacts and solutions. *Environmental Microbiome* 16, 2 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40793-020-00371-w>
- Lebreton, L. et al. Seven years into the North Pacific garbage patch: legacy plastic fragments rising disproportionately faster than larger floating objects. *Environ. Res. Lett.* 19, 124054 (2024). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad78ed>
- Lebreton, L., Egger, M. & Slat, B. A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean. *Sci Rep* 9, 12922 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49413-5>
- Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci Rep* 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>
- Lépine, J.-P. & Briley, M. The increasing burden of depression. *NDT* 7, 3–7 (2011). <https://doi.org/10.2147/NDT.S19617>
- Levine, H. et al. Male reproductive health statement (XIIIth international symposium on Spermatology, may 9th–12th 2018, Stockholm, Sweden. *Basic Clin. Androl.* 28, 13 (2018). <https://doi.org/10.1186/s12610-018-0077-z>
- Levine, H. et al. Temporal trends in sperm count: a systematic review and meta-regression analysis of samples collected globally in the 20th and 21st centuries. *Human Reproduction Update* 29, 157–176 (2023). <https://doi.org/10.1093/humupd/dmac035>
- Li, D., Shi, Y., Yang, L. et al. Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation. *Nat Food* 1, 746–754 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00171-y>
- Li, H. et al. Detection of microplastics in domestic and fetal pigs' lung tissue in natural environment: A preliminary study. *Environmental Research* 216, 114623 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114623>
- Li, N. et al. Prevalence and implications of microplastic contaminants in general human seminal fluid: A Raman spectroscopic study. *Science of The Total Environment* 937, 173522 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173522>
- Li, W. et al. Uptake and effect of carboxyl-modified polystyrene microplastics on cotton plants. *Journal of Hazardous Materials* 466, 133581 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133581>

- Li, X. et al. Mitochondrial proteins and congenital birth defect risk: a mendelian randomization study. BMC Pregnancy Childbirth 25, 444 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12884-025-07562-8>
- Li, Y. et al. Potential Health Impact of Microplastics: A Review of Environmental Distribution, Human Exposure, and Toxic Effects. Environ. Health 1, 249–257 (2023). <https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00052>
- Lian, J. et al. Do polystyrene nanoplastics affect the toxicity of cadmium to wheat (*Triticum aestivum* L.)? Environmental Pollution 263, 114498 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114498>
- Lide, D. R. (ed.) CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85th edn (CRC Press, 2004).
- Liebezeit, G. & and Liebezeit, E. Non-pollen particulates in honey and sugar. Food Additives & Contaminants: Part A 30, 2136–2140 (2013). <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.843025>
- Liu, S. et al. Microplastics in three types of human arteries detected by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (Py-GC/MS). Journal of Hazardous Materials 469, 133855 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133855>
- Lusher, A. (2015). Microplastics in the Marine Environment: Distribution, Interactions and Effects. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (eds) Marine Anthropogenic Litter. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_10
- Lyons, J.J., Haney, M.M., Fee, D. et al. Infrasound from giant bubbles during explosive submarine eruptions. Nat. Geosci. 12, 952–958 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0461-0>
- Maganti, S. S. & Akkina, R. C. Detection and characterisation of microplastics in animal feed. ojafr 13, 348–356 (2023). <https://doi.org/10.51227/ojafr.2023.50>
- Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to 'White Pollution'. The Microbe 3, 100072 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072>
- Manzi, F., Schlösser, P., Owczarz, A. & Wolinska, J. Polystyrene nanoplastics differentially influence the outcome of infection by two microparasites of the host *Daphnia magna*. Phil. Trans. R. Soc. B 378, 20220013 (2023). <https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0013>
- Marfella, R. et al. Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events. N Engl J Med 390, 900–910 (2024). <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2309822>
- Martin-Folgar, R. et al. Molecular effects of polystyrene nanoplastics on human neural stem cells. PLOS ONE 19, e0295816 (2024). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295816>
- Medindia. Study unravels how mitochondrial dysfunction leads to premature aging. (2022) <https://www.medindia.net/news/study-unravels-how-mitochondrial-dysfunction-leads-to-premature-aging-208364-1.htm> (Дата доступу: 01.05.2025).

Meinen, C. S., Perez, R. C., Dong, S., Piola, A. R. & Campos, E. Observed Ocean Bottom Temperature Variability at Four Sites in the Northwestern Argentine Basin: Evidence of Decadal Deep/Abyssal Warming Amidst Hourly to Interannual Variability During 2009–2019. *Geophysical Research Letters* 47, e2020GL089093 (2020). <https://doi.org/10.1029/2020GL089093>

Microplastics pose risk to ocean plankton, climate, other key Earth systems. Mongabay. (2023) <https://news.mongabay.com/2023/10/microplastics-pose-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems> (accessed 1 May 2025).

Moiniafshari, K. et al. A perspective on the potential impact of microplastics and nanoplastics on the human central nervous system. *Environmental Science: Nano* 12, 1809–1820 (2025). <https://doi.org/10.1039/D4EN01017E>

Montano, L. et al. First evidence of microplastics in human ovarian follicular fluid: An emerging threat to female fertility. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 291, 117868 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117868>

Moore, C. J., Moore, S. L., Leecaster, M. K. & Weisberg, S. B. A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre. *Marine Pollution Bulletin* 42, 1297–1300 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)

Moresco, V. et al. Binding, recovery, and infectiousness of enveloped and non-enveloped viruses associated with plastic pollution in surface water. *Environmental Pollution* 308, 119594 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119594>

Morishige, C., Donohue, M. J., Flint, E., Swenson, C. & Woolaway, C. Factors affecting marine debris deposition at French Frigate Shoals, Northwestern Hawaiian Islands Marine National Monument, 1990–2006. *Marine Pollution Bulletin* 54, 1162–1169 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.04.014>

Muhonja, C. N., Makonde, H., Magoma, G. & Imbuga, M. Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. *PLOS ONE* 13, e0198446 (2018). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198446>

Murano, C., Bergami, E., Liberatori, G., Palumbo, A. & Corsi, I. Interplay Between Nanoplastics and the Immune System of the Mediterranean Sea Urchin *Paracentrotus lividus*. *Front. Mar. Sci.* 8, 647394 (2021). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.647394>

Murazzi, M. E., Pradel, A., Schefer, R. B., Gessler, A. & Mitrano, D. M. Uptake and physiological impacts of nanoplastics in trees with divergent water use strategies. *Environ. Sci.: Nano* 11, 3574–3584 (2024). <https://doi.org/10.1039/D4EN00286E>

Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

- Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>
- NASA. NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024 <https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024> (Дата доступу: 01.05.2025).
- NASA. Steamy relationships: How atmospheric water vapor amplifies Earth's greenhouse effect. (2022) <https://science.nasa.gov/earth/climate-change/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifies-earths-greenhouse-effect> (Дата доступу: 01.05.2025).
- NASA. Tracking 30 Years of Sea Level Rise <https://earthobservatory.nasa.gov/images/150192/tracking-30-years-of-sea-level-rise> (Дата доступу: 01.05.2025).
- NASA. What are Phytoplankton? <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton> (Дата доступу: 01.05.2025).
- National Center for Biotechnology Information. Bisphenol A, 2D Structure. PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1017#section=2D-Structure> (Дата доступу: 01.05.2025).
- National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. Overweight & obesity statistics. NIDDK. (2021) <https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity> (Дата доступу: 01.05.2025).
- Nava, V., Chandra, S., Aherne, J. et al. Plastic debris in lakes and reservoirs. *Nature* 619, 317–322 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06168-4>
- NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024) <https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179> (Дата доступу: 10.05.2025).
- NBC News. Oceans hit record-hot temperatures. (2024) <https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179> (Дата доступу: 01.05.2025).
- New Atlas. Autism in boys linked to common plastic exposure in the womb. (2024) <https://newatlas.com/health-wellbeing/prenatal-bisphenol-a-bpa-autism-boys> (Дата доступу: 01.05.2025).
- News-Medical. Plasticizers can impair important brain functions in humans. (2021) <https://www.news-medical.net/news/20210412/Plasticizers-can-impair-important-brain-functions-in-humans.aspx> (Дата доступу: 01.05.2025).
- Ng, E.-L. et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. *Science of The Total Environment* 627, 1377–1388 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>
- Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. *Nat Med* 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>
- [Nippon.com](https://www.nippon.com/en/features/h00194). Japan's aging society. <https://www.nippon.com/en/features/h00194> (Дата доступу: 01.05.2025).

NOAA Ocean Exploration. 'Marine Life'. (n.d.) <https://oceanexplorer.noaa.gov/explainers/marine-life.html> (Дата доступу: 10.05.2025).

NOAA Ocean Service. 'How far does light travel in the ocean?'. (n.d.) https://oceanservice.noaa.gov/facts/light_travel.html (Дата доступу: 10.05.2025).

NOAA. Data on the position of the North Magnetic Pole. <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/data/poles/NP.xy> (Дата доступу: 01.05.2025).

NOAA. Earth had its warmest year on record; Upper-ocean heat content was record high while Antarctic sea ice was record low. <https://www.ncei.noaa.gov/news/global-climate-202312> (Дата доступу: 01.05.2025).

NOAA. How much oxygen comes from the ocean? <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-oxygen.html> (Дата доступу: 01.05.2025).

NOAA. Ocean heat content. www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT (Дата доступу: 01.05.2025).

O'Hanlon, N. J., James, N. A., Masden, E. A. & Bond, A. L. Seabirds and marine plastic debris in the northeastern Atlantic: A synthesis and recommendations for monitoring and research. *Environmental Pollution* 231, 1291–1301 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.101>

Obbard, R. W. et al. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future* 2, 315–320 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014EF000240>

Ocean Blue Project. Plastic Pollution in the Ocean: How Many Animals Die from Pollution? (2021) <https://oceanblueproject.org/wp-content/uploads/2023/02/how-many-animals-die-from-plastic-pollution-ocean-blue-report.pdf> (Дата доступу: 01.05.2025).

OECD (2023) Note: Regional summary data was calculated by Our World in Data based on OECD-provided data. OurWorldinData.org/plastic-pollution | CC BY <https://ourworldindata.org/grapher/share-plastic-fate?time=2019..latest> (Дата доступу: 01.05.2025).

Oliveri Conti, G. et al. Micro- and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population. *Environmental Research* 187, 109677 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109677>

Organisation for Economic Co-operation and Development. Do adults have the skills they need to thrive in a changing world? OECD Publications. (2024) https://www.oecd.org/en/publications/do-adults-have-the-skills-they-need-to-thrive-in-a-changing-world_b263dc5d-en.html (Дата доступу: 01.05.2025).

Oßmann, B. E. et al. Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water Research* 141, 307–316 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>

Ostle, C. et al. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. *Nat Commun* 10,

Our World in Data. Annual plastic waste by disposal method, World, 2000 to 2019. <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate> (Дата доступу: 01.05.2025).

Our World in Data. Cancer deaths by type, World. <https://ourworldindata.org/grapher/cancer-deaths-by-type-grouped> (Дата доступу: 01.05.2025).

Our World in Data. Deaths from diabetes by type 1980-2021. <https://ourworldindata.org/grapher/deaths-from-diabetes-by-type> (Дата доступу: 01.05.2025).

Our World in Data. Microplastics in the ocean. <https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean> (Дата доступу: 01.05.2025).

Our World in Data. Number of deaths from cardiovascular diseases by age, worldwide. <https://ourworldindata.org/grapher/cardiovascular-disease-deaths-by-age> (Дата доступу: 01.05.2025).

Panisi, C. & Marini, M. Dynamic and Systemic Perspective in Autism Spectrum Disorders: A Change of Gaze in Research Opens to A New Landscape of Needs and Solutions. Brain Sciences 12, 250 (2022). <https://doi.org/10.3390/brainsci12020250>

Pantos, O. Microplastics: impacts on corals and other reef organisms. Emerging Topics in Life Sciences 6, 81–93 (2022). <https://doi.org/10.1042/ETLS20210236>

Park, S. Y. & Kim, C. G. Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a landfill site. Chemosphere 222, 527–533 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.159>

Pauling, L. The Nature of the Chemical Bond, 3rd edn, Chapter 12-2 (Cornell Univ. Press, 1960).

Pegler, S.S., Ferguson, D.J. Rapid heat discharge during deep-sea eruptions generates megaplumes and disperses tephra. Nat Commun 12, 2292 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22439-y>

Peking University Center for Environmental Science and Engineering. Prof. Yi Huang's team made new progress in atmospheric microplastic distribution and its human health risk. CESE. (2022) <https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm> (Дата доступу: 01.05.2025).

Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. Geochem. Persp. Let. 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

Perini, D. A. et al. Surface-Functionalized Polystyrene Nanoparticles Alter the Transmembrane Potential via Ion-Selective Pores Maintaining Global Bilayer Integrity. Langmuir 38, 14837–14849 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c02487>

Polyak, B. G., & Khutorskoy, M. D. (2018). Heat flow from the Earth's interior as an indicator of deep-seated processes. Georesources, 20(4), Part 2, 366–376. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376>

Phys.org. Quantum effects in proteins: How tiny particles coordinate energy transfer inside cells. (2025) <https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html> (Дата доступу: 10.05.2025).

- Plastics News. Study highlights health hazards of microplastics. (2019) <https://www.plasticsnews.com/news/study-highlights-health-hazards-microplastics> (Дата доступу: 01.05.2025).
- Pinheiro, H. T. et al. Plastic pollution on the world's coral reefs. *Nature* 619, 311–316 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06113-5>
- Pollack, H. N., Hurter, S. J. & Johnson, J. R. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. *Rev. Geophys.* 31, 267–280 (1993). <https://doi.org/10.1029/93RG01249>
- Prata, J. C. et al. Microplastics in Internal Tissues of Companion Animals from Urban Environments. *Animals* 12, 1979 (2022). <https://doi.org/10.3390/ani12151979>
- Ragusa, A. et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International* 146, 106274 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>
- Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. *Polymers* 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>
- Rahman, A. M. N. A. A. et al. A review of microplastic surface interactions in water and potential capturing methods. *Water Science and Engineering* 17, 361–370 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>
- Rai, P. K., Sonne, C., Brown, R. J. C., Younis, S. A. & Kim, K.-H. Adsorption of environmental contaminants on micro- and nano-scale plastic polymers and the influence of weathering processes on their adsorptive attributes. *Journal of Hazardous Materials* 427, 127903 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127903>
- Rajendran, D. & Chandrasekaran, N. Journey of micronanoplastics with blood components. *RSC Adv.* 13, 31435–31459 (2023). <https://doi.org/10.1039/D3RA05620A>
- Ramsperger, A. F. R. M. et al. Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells. *Sci. Adv.* 6, eabd1211 (2020). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211>
- Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun Earth Environ* 3, 168 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
- Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution* 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>
- Riazi, H. et al. Specific heat control of nanofluids: A critical review. *International Journal of Thermal Sciences* 107, 25–38 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.024>
- Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study. *European Journal of Public Health* 34, 696–703 (2024). <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckae062>
- Rillig, M. C., Ingraffia, R. & De Souza Machado, A. A. Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. *Front. Plant Sci.* 8, 1805 (2017). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>

- Rogers, T. The political economy of autism. Substack. <https://tobyrogers.substack.com/p/the-political-economy-of-autism> (Дата доступу: 01.05.2025).
- Roman, L., Hardesty, B. D., Hindell, M. A. & Wilcox, C. A quantitative analysis linking seabird mortality and marine debris ingestion. *Sci Rep* 9, 3202 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36585-9>
- Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. *Science of The Total Environment* 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>
- Romps, D. M., Seeley, J. T., Vollaro, D. & Molinari, J. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. *Science* 346, 851–854 (2014). <https://doi.org/10.1126/science.1259100>
- Rosenthal, Y. et al. Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science* 342, 617–621 (2013). <https://doi.org/10.1126/science.1240837>
- Rosenthal, Y., Linsley, B. K., & Oppo, D. W. (2013). Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science*, 342(6158), 617–621. <https://doi.org/10.1126/science.1240837>; Oppo, D. (2013, October 31). Is Global Heating Hiding Out in the Oceans? <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Дата доступу: 01.05.2025)
- Rubin, B. S. Bisphenol A: An endocrine disruptor with widespread exposure and multiple effects. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology* 127, 27–34 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.jsbmb.2011.05.002>
- Sajjad, M. et al. Microplastics in the soil environment: A critical review. *Environmental Technology & Innovation* 27, 102408 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>
- Sarkar, P., Xavier, K. A. M., Shukla, S. P. & Rathi Bhuvaneswari, G. Nanoplastic exposure inhibits growth, photosynthetic pigment synthesis and oxidative enzymes in microalgae: A new threat to primary producers in aquatic environment. *Journal of Hazardous Materials Advances* 17, 100613 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100613>
- Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. *Global Change Biology* 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>
- Savoca, M. S., Wohlfeil, M. E., Ebeler, S. E. & Nevitt, G. A. Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. *Sci. Adv.* 2, e1600395 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>
- Schmidt, C. et al. A multidisciplinary perspective on the role of plastic pollution in the triple planetary crisis. *Environment International* 193, 109059 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109059>
- Schmidt, C., Krauth, T. & Wagner, S. Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea. *Environ. Sci. Technol.* 51, 12246–12253 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02368>
- Schymanski, D., Goldbeck, C., Humpf, H.-U. & Fürst, P. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water. *Water Research* 129, 154–162 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.011>

Science News Explores. Seafloor hosts surprising number of deep-sea vents. (2016) <https://www.snexplores.org/article/seafloor-hosts-surprising-number-deep-sea-vents> (Дата доступу: 10.05.2025).

ScienceDirect. Food allergy. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/food-allergy> (Дата доступу: 01.05.2025).

ScienceDirect. Inflammatory bowel disease. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/inflammatory-bowel-disease> (Дата доступу: 01.05.2025).

ScienceDirect. Ingestion. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/ingestion> (Дата доступу: 01.05.2025).

Scott C. Doney, D. Shallin Busch, Sarah R. Cooley and Kristy J. Kroeker. The Impacts of Ocean Acidification on Marine Ecosystems and Reliant Human Communities. Annual Review of Environment and Resources 45, 83–112 (2020). <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083019>

Senathirajah, K. et al. Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment. Journal of Hazardous Materials 404, 124004 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124004>

Shafea, L. et al. Microplastics in agroecosystems: A review of effects on soil biota and key soil functions. J. Plant Nutr. Soil Sci. 186, 5–22 (2023). <https://doi.org/10.1002/jpln.202200136>

Shanwei Government. Content on environmental health. Microplastics found in the human body for the first time, are they harmful to health? Here's the answer. https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post_550539.html (Дата доступу: 01.05.2025).

Shapiro-Mendoza, C. K. et al. Sudden Unexpected Infant Deaths: 2015–2020. Pediatrics 151, e2022058820 (2023). <https://doi.org/10.1542/peds.2022-058820>

Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. Cureus 16, e60712 (2024). <https://doi.org/10.7759/cureus.60712>

Sharqawy, M. H., Lienhard, J. H. & Zubair, S. M. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. Desalination and Water Treatment 16, 354–380 (2010). <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1079>

Shaw, D. B., Li, Q., Nunes, J. K. & Deike, L. Ocean emission of microplastic. PNAS Nexus 2, pgad296 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad296>

Smith, A. L. M., Whitehall, J. C. & Greaves, L. C. Mitochondrial DNA mutations in ageing and cancer. Molecular Oncology 16, 3276–3294 (2022). <https://doi.org/10.1002/1878-0261.13291>

Sofield, C. E., Anderton, R. S. & Gorecki, A. M. Mind over Microplastics: Exploring Microplastic-Induced Gut Disruption and Gut-Brain-Axis Consequences. Current Issues in Molecular Biology 46, 4186–4202 (2024). <https://doi.org/10.3390/cimb46050256>

- Sori, M. M. & Bramson, A. M. Water on Mars, With a Grain of Salt: Local Heat Anomalies Are Required for Basal Melting of Ice at the South Pole Today. *Geophysical Research Letters* 46, 1222–1231 (2019). <https://doi.org/10.1029/2018GL080985>
- Stallings, E. B. et al. National population-based estimates for major birth defects, 2016–2020. *Birth Defects Research* 116, e2301 (2024). <https://doi.org/10.1002/bdr2.2301>
- Strass, V. H., Rohardt, G., Kanzow, T., Hoppema, M. & Boebel, O. Multidecadal warming and density loss in the Deep Weddell Sea, Antarctica. *Journal of Climate* 33, 9863–9881 (2020). <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0271.1>
- Su, M. et al. Toxicity Mechanisms of Microplastic and Its Effects on Ruminant Production: A Review. *Biomolecules* 15, 462 (2025). <https://doi.org/10.3390/biom15040462>
- Sun, D., Li, F., Jing, Z., Hu, S., & Zhang, B. (2023). Frequent marine heatwaves hidden below the surface of the global ocean. *Nature Geoscience*, 16(12), 1099–1104. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01325-w>
- Sun, Q. et al. Association of Urinary Concentrations of Bisphenol A and Phthalate Metabolites with Risk of Type 2 Diabetes: A Prospective Investigation in the Nurses' Health Study (NHS) and NHSII Cohorts. *Environ Health Perspect* 122, 616–623 (2014). <https://doi.org/10.1289/ehp.1307201>
- Sun, R. et al. Preliminary study on impacts of polystyrene microplastics on the hematological system and gene expression in bone marrow cells of mice. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 218, 112296 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112296>
- Sun, XD., Yuan, XZ., Jia, Y. et al. Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Nat. Nanotechnol.* 15, 755–760 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0707-4>
- Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y. & Miyazaki, A. Alkaline extraction yields a higher number of microplastics in forest canopy leaves: implication for microplastic storage. *Environ Chem Lett* 22, 1599–1606 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3>
- Susanti, R., Yuniastuti, A. & Fibriana, F. The Evidence of Microplastic Contamination in Central Javanese Local Ducks from Intensive Animal Husbandry. *Water Air Soil Pollut* 232, 178 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05142-y>
- Sustainable Plastics. Scientists find microplastics in clouds above Mount Fuji. Sustainable Plastics. <https://www.sustainableplastics.com/news/scientists-find-microplastics-clouds-above-mount-fuji> (Дата доступу: 01.05.2025).
- Symeonides, C., Vacy, K., Thomson, S. et al. Male autism spectrum disorder is linked to brain aromatase disruption by prenatal BPA in multimodal investigations and 10HDA ameliorates the related mouse phenotype. *Nat Commun* 15, 6367 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48897-8>
- Taylor, R., Turnbull, D. Mitochondrial DNA mutations in human disease. *Nat Rev Genet* 6, 389–402 (2005). <https://doi.org/10.1038/nrg1606>

The Cool Down. 'Experts raise concerns about record-breaking phenomenon observed in Atlantic Ocean: 'It's just astonishing'. (2024) <https://www.thecooldown.com/outdoors/ocean-temperature-pollution-sudden-spike/> (Accessed May 10, 2025)

The European Space Agency (ESA). <https://www.esa.int> (Дата доступу: 01.05.2025).

The Guardian. Autism could be diagnosed with stool sample, scientists say. <https://www.theguardian.com/science/article/2024/jul/08/autism-could-be-diagnosed-with-stool-sample-microbes-research> (Дата доступу: 01.05.2025).

The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019) <https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (Дата доступу: 10.05.2025).

The Guardian. Mental health overtakes cancer and obesity as Britons' biggest health worry. (2024) <https://www.theguardian.com/society/2024/sep/20/mental-health-overtakes-cancer-and-obesity-as-britons-biggest-health-worry> (Дата доступу: 01.05.2025).

The Guardian. Scientists unveil bionic robo-fish to remove microplastics from seas. <https://www.theguardian.com/environment/2022/jun/22/scientists-unveil-bionic-robo-fish-to-remove-microplastics-from-seas> (Дата доступу: 01.05.2025).

The Guardian. Shanna Swan: 'Most couples may have to use assisted reproduction by 2045'. (2021) <https://www.theguardian.com/society/2021/mar/28/shanna-swan-fertility-reproduction-count-down> (Дата доступу: 01.05.2025).

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1> (Дата доступу: 01.05.2025).

The International Union for Conservation of Nature (IUCN). Ocean deoxygenation. <https://iucn.org/resources/issues-brief/ocean-deoxygenation> (Дата доступу: 01.05.2025).

The Ocean Foundation. Ocean conservation. The Ocean Foundation. <https://oceanfdn.org> (Дата доступу: 01.05.2025).

The Pennsylvania State University Research. Microplastics impact cloud formation, likely affecting weather and climate. (2024) <https://www.psu.edu/news/research/story/microplastics-impact-cloud-formation-likely-affecting-weather-and-climate> (Дата доступу: 01.05.2025).

Thompson, R. C. et al. Twenty years of microplastic pollution research—what have we learned? Science 386, eadl2746 (2024). <https://doi.org/10.1126/science.adl2746>

Tikhonova, D. A., Karetnikov, S. G., Ivanova, E. V. & Shalunova, E. P. The Vertical Distribution of Microplastics in the Water Column of Lake Ladoga. Water Resour 51, 146–153 (2024). <https://doi.org/10.1134/S009780782370063X>

Trasande, L. et al. Prenatal phthalate exposure and adverse birth outcomes in the USA: a prospective analysis of births and estimates of attributable burden and costs. The Lancet Planetary Health 8, e74–e85 (2024). [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00270-X](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00270-X)

- Tsujimura, A. et al. Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan. *The World Journal of Men's Health* 43, 239–248 (2025). <https://doi.org/10.5534/wjmh.240137>
- Tuna, A., Taş, B.M., Başaran Kankılıç, G. et al. Detection of microplastics in patients with allergic rhinitis. *Eur Arch Otorhinolaryngol* 280, 5363–5367 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00405-023-08105-7>
- U.S. Department Of Health And Human Services. 2022 National Healthcare Quality and Disparities Report. Rockville, MD: Agency for Healthcare Research and Quality. (2022) <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK587174> (Дата доступу: 01.05.2025).
- United Nations Development Programme. Ocean hypoxia: Dead zones. <https://www.undp.org/publications/issue-brief-ocean-hypoxia-dead-zones> (Дата доступу: 01.05.2025).
- United Nations Environment Programme (2021). From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. Nairobi. <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution> (Дата доступу: 01.05.2025)
- United Nations Environment Programme (UNEP) Beat plastic pollution <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (accessed: 1 May 2025)
- United Nations Environment Programme. Chemicals in Plastics - A Technical Report (2023). <https://www.unep.org/resources/report/chemicals-plastics-technical-report> (Дата доступу: 01.05.2025)
- United Nations Environment Programme. Monitoring Plastics in Rivers and Lakes: Guidelines for the Harmonization of Methodologies. (2020) <https://www.unep.org/resources/report/monitoring-plastics-rivers-and-lakes-guidelines-harmonization-methodologies> (Дата доступу: 01.05.2025)
- United Nations Environment Programme (UNEP). Beat plastic pollution <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (accessed: 1 May 2025)
- United Nations Malaysia. Policy brief on solid waste management. UN Malaysia. https://malaysia.un.org/sites/default/files/2022-02/POLSOLSum_1.pdf (Дата доступу: 01.05.2025).
- University of Newcastle. Plastic ingestion by people could be equating to a credit card a week. <https://www.newcastle.edu.au/newsroom/featured/plastic-ingestion-by-people-could-be-equating-to-a-credit-card-a-week> (Дата доступу: 01.05.2025)
- University of Stirling. Hitch-hiking viruses can survive on microplastics in freshwater, new study finds. (2022) <https://www.stir.ac.uk/news/2022/june-2022-news/hitch-hiking-viruses-can-survive-on-microplastics-in-freshwater-new-study-finds> (Дата доступу: 01.05.2025).

- Valero, D., Belay, B. S., Moreno-Rodenas, A., Kramer, M. & Franca, M. J. The key role of surface tension in the transport and quantification of plastic pollution in rivers. *Water Research* 226, 119078 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119078>
- Van der Veen, I., van Mourik, L.M., van Velzen, M.J.M., Groenewoud, Q.R., & Leslie, H.A. Plastic particles in livestock feed, milk, meat and blood: A pilot study. Report EH22-01, 29 April 2022. <https://vakbladvoedingsindustrie.nl/storage/app/media/Rapporten/rapporten%202022/07-juli/VOE-2022-JUL-PLASTICSOUP.pdf> (Дата доступу: 01.05.2025)
- Van Schependom, J. & D'haeseleer, M. Advances in Neurodegenerative Diseases. *Journal of Clinical Medicine* 12, 1709 (2023). <https://doi.org/10.3390/jcm12051709>
- Van Sebille, E., England, M. H. & Froyland, G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters. *Environ. Res. Lett.* 7, 044040 (2012). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044040>
- Vanuytsel, T., Bercik, P. & Boeckxstaens, G. Understanding neuroimmune interactions in disorders of gut–brain interaction: from functional to immune-mediated disorders. *Gut* 72, 787–798 (2023). <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2020-320633>
- Vieira, F., & Hamza, V. M. Global heat flow: New estimates using digital maps and GIS techniques. *Int. J. Terr. Heat Flow Appl. Geotherm.* 1, 6–13 (2018).
- Villarrubia-Gómez, P., Carney Almroth, B., Eriksen, M., Ryberg, M. & Cornell, S. E. Plastics pollution exacerbates the impacts of all planetary boundaries. *One Earth* 7, 2119–2138 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.017>
- Viterito, A. 1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History. *Int. J. Environ. Sci. Nat. Res.* 29, 556271 (2022). <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2022.29.556271>
- Völker, J., Ashcroft, F., Vedøy, Å., Zimmermann, L. & Wagner, M. Adipogenic Activity of Chemicals Used in Plastic Consumer Products. *Environ. Sci. Technol.* 56, 2487–2496 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06316>
- VRT NWS. Brain contains “full plastic spoonful” of microplastics. (2025) <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2025/02/04/microplastics-in-de-hersenen> (Дата доступу: 01.05.2025).
- Wan, Y., Wu, C., Xue, Q. & Hui, X. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of The Total Environment* 654, 576–582 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>
- Wang, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>
- Wang, Y. et al. Robust, Healable, Self-Locomotive Integrated Robots Enabled by Noncovalent Assembled Gradient Nanostructure. *Nano Lett.* 22, 5409–5419 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c01375>

- Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>
- Wei, W. et al. Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects — Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022. *CCDCW* 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>
- Welch, B. M. et al. Associations Between Prenatal Urinary Biomarkers of Phthalate Exposure and Preterm Birth: A Pooled Study of 16 US Cohorts. *JAMA Pediatrics* 176, 895–905 (2022). <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2022.2252>
- Windheim, J. et al. Micro- and Nanoplastics' Effects on Protein Folding and Amyloidosis. *International Journal of Molecular Sciences* 23, 10329 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijms231810329>
- Winiarska, E., Jutel, M. & Zemelka-Wiacek, M. The potential impact of nano- and microplastics on human health: Understanding human health risks. *Environmental Research* 251, 118535 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118535>
- Wong, A. P. S. et al. Argo Data 1999–2019: Two Million Temperature-Salinity Profiles and Subsurface Velocity Observations From a Global Array of Profiling Floats. *Front. Mar. Sci.* 7, 00700 (2020). <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00700>
- Wong, M. H. et al. Evolution of the Horizontal Winds in Jupiter's Great Red Spot From One Jovian Year of HST/WFC3 Maps. *Geophysical Research Letters* 48, e2021GL093982 (2021). <https://doi.org/10.1029/2021GL093982>
- Woods Hole Oceanographic Institution. Warming ocean. WHOI Argo. <https://www2.whoi.edu/site/argo/impacts/warming-ocean> (Дата доступу: 01.05.2025).
- World Energy Council. World Energy Resources: Solar 2013. (2013) <https://www.worldenergy.org/publications> (Дата доступу: 10.05.2025).
- World Health Organization. 1 in 10 babies worldwide are born early, with major impacts on health and survival. (2023) <https://www.who.int/news/item/06-10-2023-1-in-10-babies-worldwide-are-born-early--with-major-impacts-on-health-and-survival> (Дата доступу: 01.05.2025).
- World Health Organization. 1 in 6 people globally affected by infertility. (2023) <https://www.who.int/news/item/04-04-2023-1-in-6-people-globally-affected-by-infertility> (Дата доступу: 01.05.2025).
- World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024) <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services> (Дата доступу: 01.05.2025).
- World Health Organization. Mental disorders. WHO Fact Sheets. (2022) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders> (Дата доступу: 01.05.2025).

World Health Organization. Obesity and overweight. WHO Fact Sheets. (2025) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight> (Дата доступу: 10.05.2025).

World Health Organization. The top 10 causes of death. WHO Fact Sheets. (2024) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death> (Дата доступу: 01.05.2025).

World Health Organization. WHO releases first-ever list of health-threatening fungi. (2022) <https://www.who.int/news/item/25-10-2022-who-releases-first-ever-list-of-health-threatening-fungi> (Дата доступу: 01.05.2025).

World Meteorological Organization (WMO) confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level. <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level> (Дата доступу: 01.05.2025).

World Meteorological Organization (WMO). State of the Global Climate 2024. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024> (Дата доступу: 01.05.2025).

Wu, Y. et al. Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae. Journal of Hazardous Materials 374, 219–227 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.04.039>

WWF-Australia. How many birds die from plastic pollution? <https://wwf.org.au/blogs/how-many-birds-die-from-plastic-pollution> (Дата доступу: 01.05.2025).

Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. Twenty-Year Trends in Diagnosed Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Among US Children and Adolescents, 1997-2016. JAMA Network Open 1, e181471 (2018). <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471>

Xu, M. et al. Internalization and toxicity: A preliminary study of effects of nanoplastic particles on human lung epithelial cell. Science of The Total Environment 694, 133794 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133794>

Yadav, A., Vuković, L. & Narayan, M. An Atomic and Molecular Insight into How PFOA Reduces α -Helicity, Compromises Substrate Binding, and Creates Binding Pockets in a Model Globular Protein. J. Am. Chem. Soc. 146, 12766–12777 (2024). <https://doi.org/10.1021/jacs.4c02934>

Yee, M. S.-L. et al. Impact of Microplastics and Nanoplastics on Human Health. Nanomaterials 11, 496 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11020496>

Yöntem, F. D. & Ahbab, M. A. Mitochondria as a target of micro- and nanoplastic toxicity. Cambridge Prisms: Plastics 2, e6 (2024). <https://doi.org/10.1017/plc.2024.6>

Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). Science 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

Yu, H., Zhang, Y., Tan, W. & Zhang, Z. Microplastics as an Emerging Environmental Pollutant in Agricultural Soils: Effects on Ecosystems and Human Health. Front. Environ. Sci. 10, 855292 (2022). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.855292>

- Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. *Sustainability* 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>
- Zaheer, J. et al. Pre/post-natal exposure to microplastic as a potential risk factor for autism spectrum disorder. *Environment International* 161, 107121 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107121>
- Zajac, M. et al. Exposure to polystyrene nanoparticles leads to changes in the zeta potential of bacterial cells. *Sci Rep* 13, 9552 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36603-5>
- Zeidan, J. et al. Global prevalence of autism: A systematic review update. *Autism Research* 15, 778–790 (2022). <https://doi.org/10.1002/aur.2696>
- Zhang, J., Wang, L., Trasande, L. & Kannan, K. Occurrence of Polyethylene Terephthalate and Polycarbonate Microplastics in Infant and Adult Feces. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 8, 989–994 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00559>
- Zhang, W. et al. The mechanism for adsorption of Cr(VI) ions by PE microplastics in ternary system of natural water environment. *Environmental Pollution* 257, 113440 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113440>
- Zhang, Y. et al. Selective bioaccumulation of polystyrene nanoplastics in fetal rat brain and damage to myelin development. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 278, 116393 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116393>
- Zhang, Y., Wang, J., Yang, H. & Guan, Y. The potential mechanisms underlying phthalate-induced hypospadias: a systematic review of rodent model studies. *Front. Endocrinol.* 15, (2024). <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1490011>
- Zhang, Y.-W. et al. Bridging relevance between microplastics, human health and bone metabolism: Emerging threats and research directions. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 6, 422–435 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.08.006>
- Zhong, Y. et al. Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019. *Gen Psych* 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>
- Zhu, R. et al. A global estimate of multiecosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>
- Zuin, M. et al. Trends in Sudden Cardiac Death Among Adults Aged 25 to 44 Years in the United States: An Analysis of 2 Large US Databases. *JAHA* 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.035722>