

ДОКЛАД

НАНОПЛАСТМАСАТА В БИОСФЕРАТА

ОТ МОЛЕКУЛЯРНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ
ДО ПЛАНЕТАРНА КРИЗА

МИКРОПЛАСТМАСАТА
И НАНОПЛАСТМАСАТА

Годишен обем на производството
на смоли и влакна

милиона
тона

1000

800

600

400

200

1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020 2030 2040 2050

ДОКЛАД

НАНОПЛАСТМАСАТА В БИОСФЕРАТА

ОТ МОЛЕКУЛЯРНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ
ДО ПЛАНЕТАРНА КРИЗА

АВТОРИ



Международно обществено движение „АЛЛАТРА“

ИНСТИТУЦИОНАЛЕН ПРЕГЛЕД Академично сътрудничество



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
BOLIVIANA

Боливийският католически университет „Сан Пабло“ (УСВ)
Факултет по екологично инженерство и научни изследвания



DICYT
Departamento de Investigación,
Ciencia y Tecnología - UAJMS.

Автономен университет „Хуан Мисаел Сарачо“ (УАЈМС)
Департамент по изследвания, наука и технологии

НАУЧЕН УЧАСТНИК



CREATIVE
SOCIETY

Международен проект „Съзидателно общество“

Анотация.....	5
Последствия от замърсяването с пластмаси: микро- и нанопластмасата (МНП)	
като нов фактор в планетарната криза.....	7
Количествени оценки и тенденции в глобалното производство на пластмасови отпадъци.....	7
Великият тихоокеански континент от боклук.....	12
Процеси на образуване на микро- и наночастици от пластмаса.....	12
Разпространение на МНП в околната среда	18
Екологични и климатични последици от замърсяването с микро- и нанопластмаса.....	23
Как МНП разрушава екосистемите на молекулярно ниво.....	23
Влияние на МНП върху климата.....	46
Въздействие на микро- и нанопластмасата върху човешкото здраве.....	71
МНП като нов рисков фактор за развитието на епидемиите от ХХІ век.....	71
Молекулярни механизми на токсичността на МНП.	
Увреждане на ДНК, митохондрии и клетъчни мембрани.....	72
Участие на МНП в механизмите на преждевременно стареене и онкогенеза.....	84
Дестабилизация на хормоналната система под влиянието на МНП.....	87
Електростатичният заряд на нанопластмасата като ключов фактор за повишената ѝ токсичност за човешкия организъм.....	93
Системно въздействие на МНП върху органите и функционалните системи на човека.....	100
Механизми на увреждане на дихателната система при вдишване на МНП.....	101
Невротоксично действие на МНП. Увреждане на централната и периферната нервна система.....	102
Участие на МНП в патогенезата на сърдечно-съдови заболявания.....	114
Нарушаване на функциите на храносмилателната система, причинено от МНП.....	116
Въздействие на МНП върху имунната система.....	117
Онкогенно действие на МНП. Механизми на мутации и развитие на метастази.....	120
Влияние на МНП върху калциевия обмен и костната структура.....	121
Репродуктивни разстройства, асоциирани с въздействието на МНП.	
Безплодие и еректилна дисфункция.....	122
Проникване на МНП през плацентарната бариера и влиянието му върху развиващия се организъм.....	126
Последици от въздействието на МНП и връзката му с вродени аномалии.....	130
Изводи и перспективи. Възможно ли е да се намали въздействието на МНП върху човешкото здраве?.....	133
Анализ на съвременните подходи за минимизиране на замърсяването с пластмаса.....	134
Технологии за отстраняване на големи пластмаси от водните екосистеми.....	134
Текущи методи за почистване на микро - и нанопластмаса.....	139
Подходи на научната общност "АЛЛАТРА" за борба с епидемията от микро - и нанопластмаса.....	142
Технологии за атмосферни генератори на вода (АГВ) за почистване на океана от МНП.....	142
Иновативен научен подход за намаляване на токсичността на микро - и нанопластмасата.....	148
Фактор Х. Въздействието на микро - и нанопластмасата върху динамиката на цикъла на природните бедствия.....	151
Изводи. Нанопластмасата-предизвикателство, което не трябва да се пренебрегва.....	171
Източници.....	173

АНОТАЦИЯ

„Ако Земята водеше дневник, за последния век щеше да пише с черни букви: „Епохата на пластмасата!“ От микроскопични частици, проникващи в клетките на живите организми, до гигантски острови от боклук в океана – пластмасата се е превърнала в неразделна част от геоложката летопис. Но на каква цена?

Ежегодно в света се произвеждат над 400 милиона тона пластмасови отпадъци, от които около 11 милиона тона попадат в Световния океан. В океана вече са натрупани над 200 милиона тона пластмаса. Анализът на проби от повърхностните води разкриват, че масата на пластмасата надвишава тази на зоопланктона 6 пъти. Според прогнози, до 2050 година масата на пластмасата в океана ще надхвърли тази на рибата.

Пластмасата се разгражда в продължение на стотици, дори хиляди години, но под въздействието на вълните, солената вода и ултравиолетовите лъчи тя се разпада на малки частици – микро- и нанопластмаса. Морският въздух и валежите ги пренасят, пресичайки държави, континенти и океани, те се натрупват в горите и присъстват в храната и водата. Микропластмасата е проникнала дори в отдалечените ъгли на планетата, като Марианската падина и на връх Еверест.

В този доклад е представена задълбочена аналитична оценка на въздействието на пластмасовото замърсяване върху околната среда, човешкото здраве и устойчивостта на жизненоважните системи на обществото. Докладът изследва влиянието на микро- и нанопластмасата, притежаващ статичен заряд и съдържащ токсични химични съединения, върху екосистемите. Особено внимание се отделя на неговата роля в закисляването на океана, дестабилизацията на хранителните вериги и заплахата за биологичното разнообразие. Изложена е хипотеза за влиянието на микро- и нанопластмасата върху промяната на свойствата на водата, което води до ускорено затопляне на океана и задълбочава природните катаклизми.

Един от най-актуалните и тревожни проблеми, разглеждани в доклада, е въздействието на микро- и нанопластмасата (МНП) върху човешкото здраве. Пластмасовите частици, благодарение на малките си размери, са способни да преодоляват биологичните бариери, предизвиквайки окислителен стрес, увреждане на ДНК, възпалителни реакции и нарушения в клетъчните функции. Особено внимание е отделено на потенциалната корелация между въздействието на МНП и нарастващото разпространение на невродегенеративни и невропсихични заболявания. В доклада се показва, че въздействието на МНП върху развиващия се организъм през пренаталния и постнатален периоди води до нарушения в когнитивните функции и психичното здраве , което представлява сериозна заплата за бъдещето на човечеството.

Нарастването на броя на заболяванията, свързани с микро- и нанопластмасата, вече осезаемо влошава качеството на живот на населението, особено в региони с високо ниво на пластмасово замърсяване.

В доклада са обозначени зоните с повишен риск, както и тези, които засега остават относително безопасни. Влошаването на ситуацията, в комбинация с липсата на ефективни методи за защита, може да принуди хората да напускат замърсените територии в търсене на по-безопасни условия за живот. Това би създавало предпоставки за неконтролирана масова миграция, което от своя страна би могло да усилва социалната напрегнатост, да увеличи натоварването върху градската инфраструктура и да дестабилизира икономиките на засегнатите страни.

Следователно, екологичният проблем на пластмасовото замърсяване постепенно се превръща в макроикономически и геополитически.

Докладът акцентира внимание върху необходимостта от решаване на проблема с микропластмасата, като предлага нов поглед върху неговото разпространение, въздействие и последици. Уникалността на изследването се крие в междудисциплинарен подход, обединяващ данни за физичните, химичните и биологичните аспекти на пластмасовото замърсяване. Това прави доклада актуален за изследователи и учени от различни области, които се интересуват от разработването на устойчиви решения за безопасно бъдеще на човечеството и планетата.

ПОСЛЕДСТВИЯ ОТ ПЛАСТМАСОВОТО ЗАМЪРСЯВАНЕ: МИКРО- И НАНОПЛАСТМАСАТА (МНП) КАТО НОВ ФАКТОР НА ПЛАНЕТАРНАТА КРИЗА

Пластмасата стана неразделна част от съвременния живот. Опаковки, съдове, дрехи, обувки, предмети за хигиена, медицински изделия, транспорт и средства за комуникация — повечето предмети, обграждащи човека, са изработени от пластмаса. Въпреки това тя съществува не само във вид на големи обекти, но също така и под формата на микроскопични частици, които се отделят от тези изделия, — микро- и нанопластмаса. Микропластмасата — това са частици пластмаса с размер под 5 мм, които могат да бъдат различени с невъоръжено око. Нанопластмасата, напротив, има размери под 1 мкм (една милионна от метъра), поради което повечето такива частици не могат да се видят дори под стандартен микроскоп.

Пластмасовите материали биват различни видове, но всички те са базирани на полимери — природни или синтетични съединения, състоящи се от големи молекули, свързани помежду си. Благодарение на уникалните си химични свойства полимерите се отличават с висока издръжливост и устойчивост към въздействие.

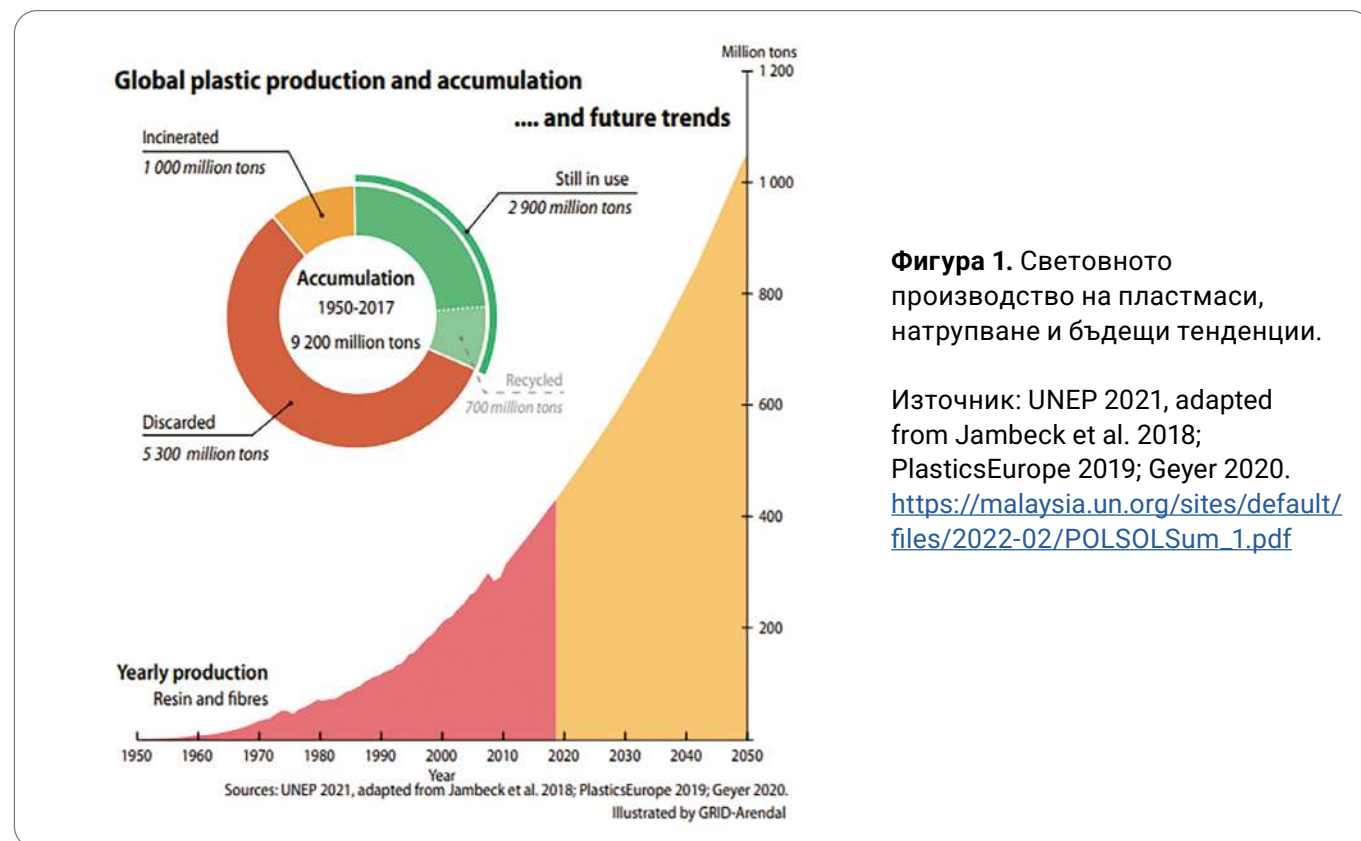
Така пластмасата, благодарение на своята здравина, универсалност и ниска себестойност, стана основен материал за масово производство, включително предмети за еднократна употреба¹. Но неправилното използване на пластмасовите отпадъци превърна пластмасата в най-значим по обем замърсител на околната среда в света.

Количествени оценки и тенденции на глобалното производство на пластмасови отпадъци

От 1950-те години в света са произведени около 9,2 млрд тона пластмаса. От тях в момента се използват 2,9 млрд тона, включително 2,7 млрд тона първична пластмаса и около 0,2 млрд тона преработен материал. 5,3 млрд тона са се озовали на сметищата, а 1 млрд тона са изгорени. Също е известно, че 1,75–2,5 млрд тона се смятат за „неправилно управлявани“, което означава, че те могат неконтролируемо да попадат в околната среда (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

Днес в пластмасовите изделия са добавени около 640 млн тона допълнителни химикали². По данни на UNEP³, ежегодно в света се произвеждат повече от 400 млн тона пластмасови отпадъци.



Фигура 1. Световното производство на пластмаси, натрупване и бъдещи тенденции.

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

Само 9% от пластмасовите отпадъци се преработват, 19% — се изгарят, а всичко останало остава в околната среда, включително в сметища и океани⁴ (рис. 2).

Дял на методите за обезвреждане	в световен мащаб, 2023 г.
Riciclaggio	9%
Incenerimento	19%
Smaltimento improprio	22%
Seppellimento	49%

Фигура 2. Годишни пластмасови отпадъци по метода на утилизация, 2000–2023 година.
Източник на данни: Our World in Data <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate>

Всяка година в Световния океан попадат около 11 млн тона пластмаса⁵. Това е еквивалентно на повече от един боклукчийски камион с пластмаса, изсипван в океана всяка минута.

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>

³United Nations Environment Programme (UNEP) Beat plastic pollution <https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution> (Accessed: 1 May 2025)

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

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>

В настоящия момент в океаните вече са натрупани повече от 200 млн тона големи пластмасови отпадъци и 35 540 тона микропластмаса⁶. Годишният обем на пластмасовите отпадъци, изхвърляни в околната среда от наземни източници, се оценява различно, в зависимост от приложените методи на анализ. При обикновен сценарий и при отсъствие на необходимите мерки количеството на пластмасовите отпадъци, които попадат във водните екосистеми, може почти да се утрои: приблизително от 9–14 млн тона годишно през 2016 година до 23–37 млн тона годишно до 2040 година.

Според друг метод на анализ количеството на отпадъците може да се увеличи повече от два пъти: приблизително от 19–23 млн тона годишно през 2016 година до 53 млн тона годишно до 2030 година⁷.

Според изследванията, при запазване на съществуващите тенденции, до 2050 година пластмасата в океана ще бъде около 12 000 млн тона⁸, което по тегло ще бъде сравнимо с цялата маса на рибите в океана (около 10 000 млн тона⁹).

В зависимост от вида, пластмасата се разлага от 100 до 1 000 години (фиг. 3). В океана пластмасата се разлага значително по-бавно, а в тъмните и студени условия на морските дълбини скоростта на нейното деградиране още повече намалява¹⁰.



Фигура 3. Приблизителни срокове на разлагане на някои видове пластмасови отпадъци, изхвърлени в морето

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>

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>

⁹Irigoien, 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>

С изключение на материалите, които са били изгорени, всички обикновени пластмаси, които някога са попадали в околната среда, дори сега остават неразложени под формата или на цели изделия, или във фрагментирана форма¹¹. Този боклук практически никъде не изчезва, а продължава да се натрупва. Подобна ситуация може да се сравни с боклукчийски контейнер, в който постоянно биват добавяни отпадъци, но никога не се извозват. Въпросът какво ще се случи с такъв контейнер след месец илюстрира мащаба на проблема на глобалното натрупване на пластмасови отпадъци.

Великият тихоокеански континент от боклук

Пластмасовият боклук, намиращ се във водната маса и на повърхността ѝ, се улавя от океанските течения, премества се в централните региони на океана и образува обширни натрупвания, наричани „острови“.

“Великият тихоокеански континент от боклук” представлява най-голямата концентрация на пластмаса на планетата, демонстрираща устойчиво нарастване (фиг. 4). Континента от боклук обхваща обширна територия между Северна Америка и Япония. Наблюденията показват, че през 2018 година нейната площ е съставлявала приблизително 1,6 млн квадратни километра¹², макар че тази величина подлежи на вариации.



Фигура 4. Схематичен процес на образуване на петно от боклук в Тихия океан

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>

Изследванията показват, че до 80%¹³ от съдържанието на петната от боклук се състои именно от пластмасови отпадъци¹⁴. В петното от боклук се съдържа не по-малко от 80 000 тона боклук¹⁵. Обаче това е само видимата част от проблема. До 94% от пластмасата, която попада в океана, се оказва на морското дъно¹⁶. Именно там може да се крие и да се натрупва значително количество боклук.

Точният обем на Големото тихоокеанско петно от боклук остава неизвестен, тъй като Северно-Тихоокеанският субтропичен кръговрат притежава твърде големи размери за всестранно научни изследвания при настоящото ниво на технологични възможности.

Динамика на натрупване на пластмаса в океана

Инструменталните измервания демонстрират експоненциално увеличение на обемите на Големото тихоокеанско петно от боклук. В периода от 2015 до 2022 година средната маса на пластмасовите отпадъци в този район се е увеличила 5 пъти¹⁷. Особена загриженост предизвиква фактът, че количеството на малките фрагменти пластмаса за същия период се е увеличило 10 пъти, което свидетелства за интензивен процес на фрагментация на големите пластмасови обекти.

Големото тихоокеанско петно от боклук фактически формира седмия „континент“ на нашата планета. Въпреки това е важно да се отбележи, че това явление не е уникално. В момента научната общност идентифицира 5 големи натрупвания на боклук в Световния океан¹⁸: Две в Атлантическия океан, две в Тихия океан и едно в Индийския океан¹⁹ (фиг. 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>

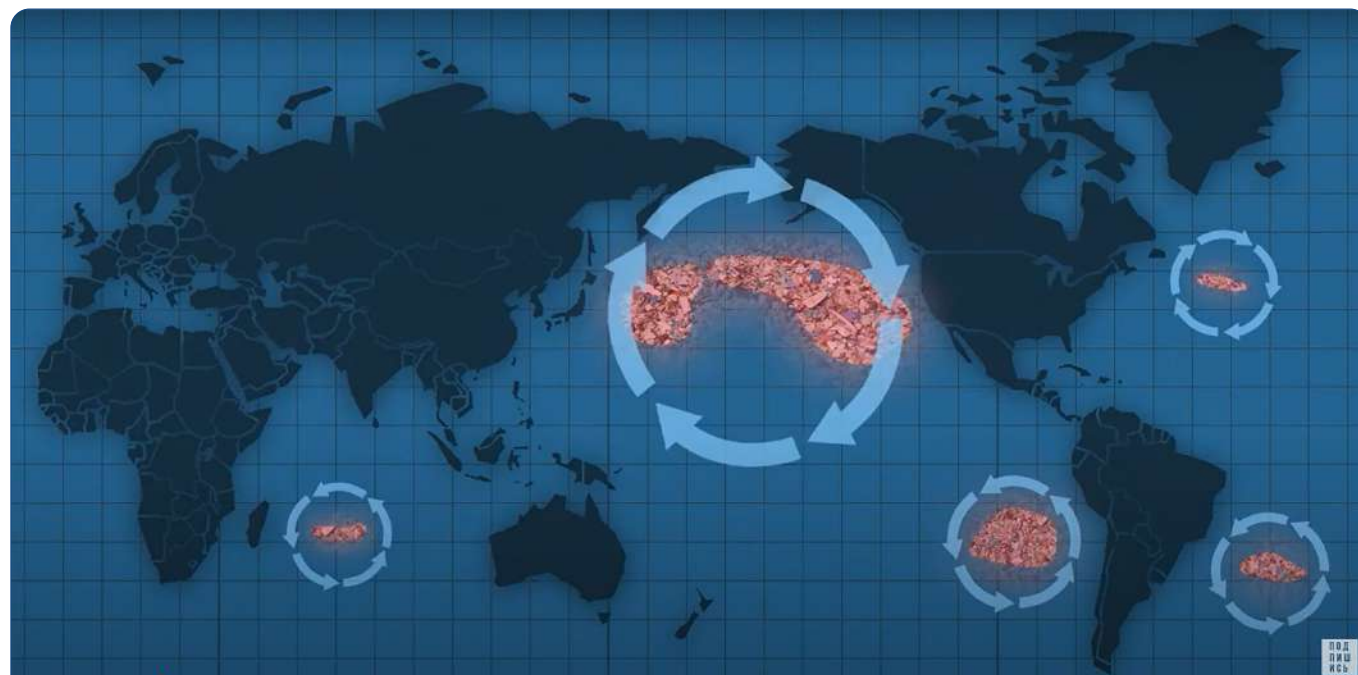
¹⁵Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F. et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. Sci Rep 8, 4666 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>

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>



Фигура 5. Схематично изображение на петте големи натрупвания на боклук в Световния океан: две в Атлантическия океан, две в Тихия океан и едно в Индийския океан. В океаните циркулират милиони тона пластмаса и други отпадъци от антропогенен произход. Петната от боклук растат в катастрофална прогресия.

Процеси на образуване на микро- и наночастици пластмаса

Пластмасовият боклук е много устойчив към биоразлагане, но под въздействието на вълни, солена вода и слънчево излъчване той се разпада на малки частици — микро- и нанопластмаса²⁰, които могат да бъдат невидими за невъоръжено око. Тези частици запазват своята полимерна структура²¹, а процесът на разпад продължава чак до нанониво (фиг. 6–7). В резултат пластмасовите отпадъци стават постоянен компонент на екосистемата на планетата.

Освен това микро- и нанопластмасата съдържа опасни химични вещества, които се добавят по време на производството на пластмаса.

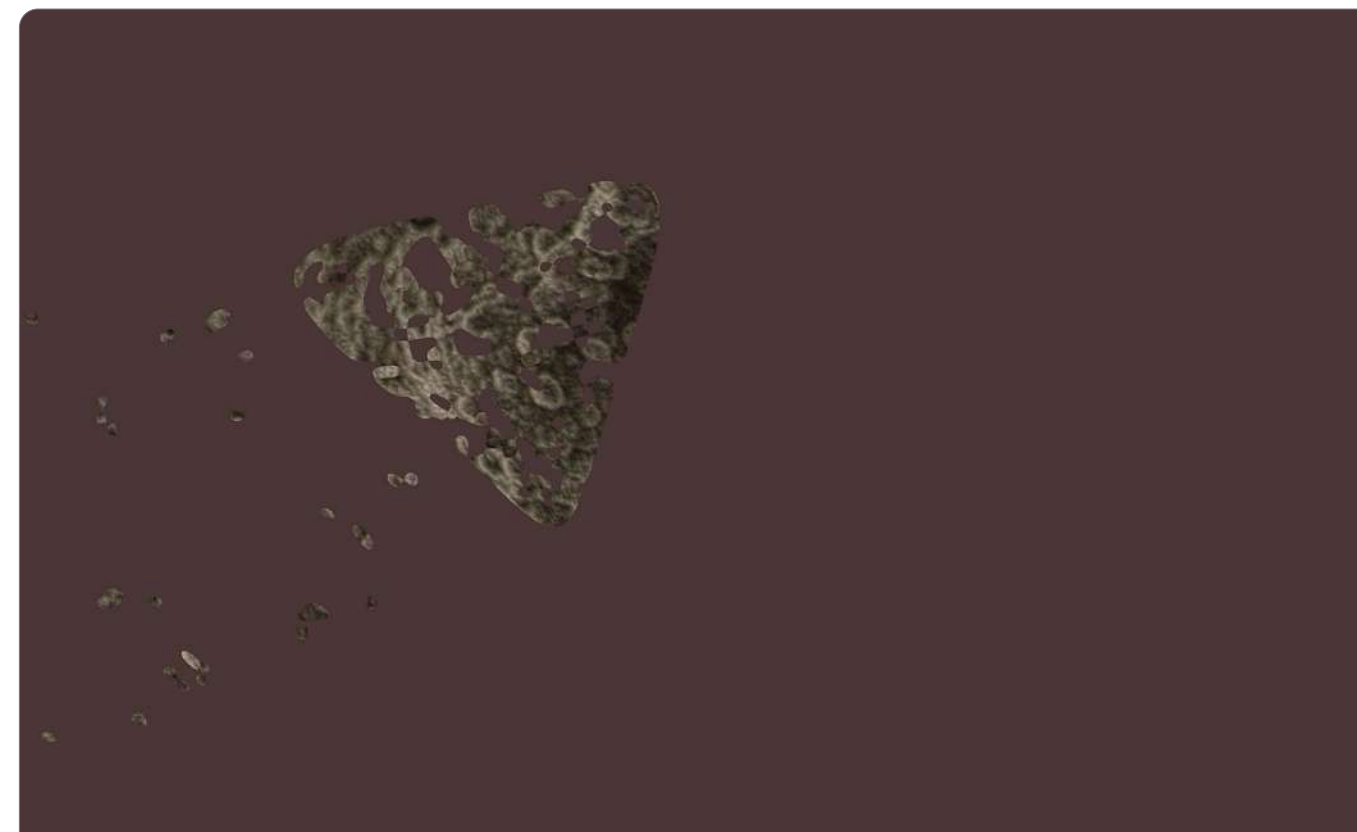


„Пластмасата съдържа около 16 000 химични вещества. Известно е, че повече от 4 200 от тях са устойчиви в околната среда, натрупват се в живите организми, пренасят се на големи разстояния или представляват потенциална опасност“ — казва професор Аника Янке, химик-еколог от Центъра „Хелмхолц“ за изследване на околната среда²².

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>

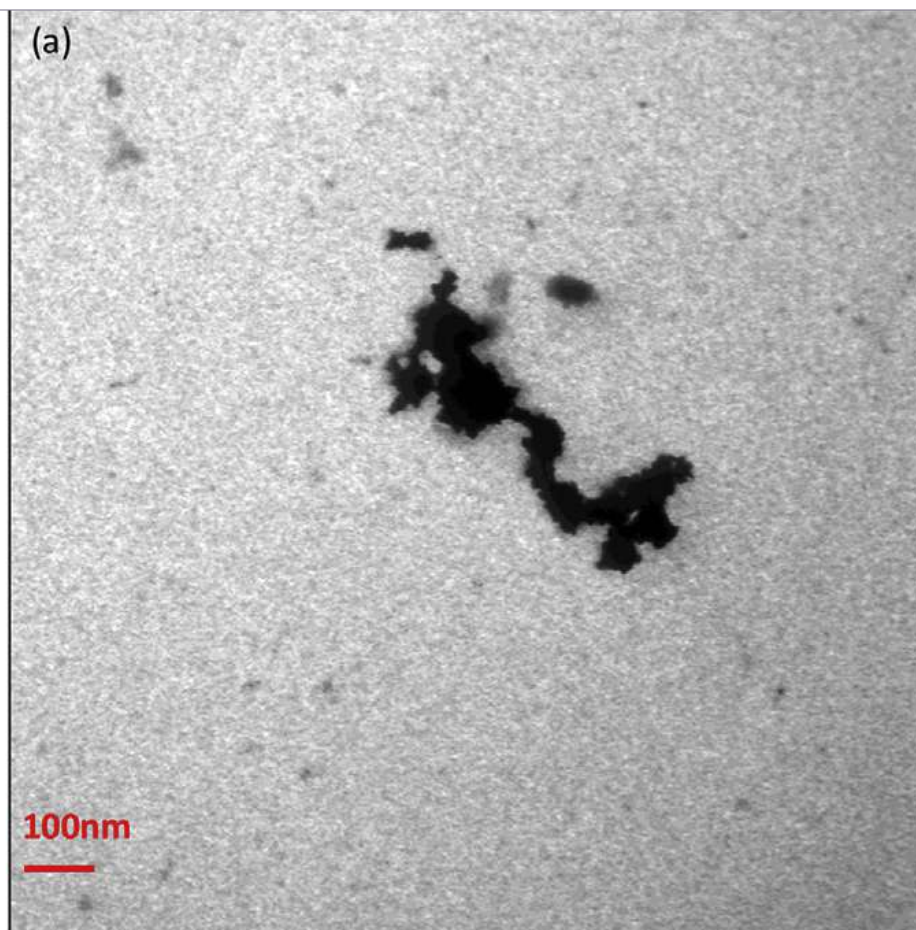
²²Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ. Environmental Impacts of Plastics: Moving beyond the perspective on waste. https://www.ufz.de/index.php?en=36336&webc_pm=44/2024



Фигура 6. Фрагментиране на пластмасовите частици до наночастици, като същевременно се запазва тяхната полимерна структура

Фигура 7. Трансмисионна електронна микроскопия на екологично значими нанопластмаси от полиетилен, разградени от ултравиолетови лъчи от стари микропластмаси, взети от проби в Северния Атлантически океан

Източник: 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>



Разпространение на МНП в океана

Най-голямата концентрация на пластмаса се наблюдава в зоните на петната от боклук. Тези океански сметища действат като своеобразни фабрики, където се осъществява непрекъснато образуване на микро- и нанопластмаса. Подобно на разпространението на вируса в организма чрез кръвта, микропластмасата се пренася от океанските течения из целия Световен океан, което подчертава глобалния мащаб на този проблем.

Въпреки техническите затруднения при откриването на микропластмаса, които затрудняват точното определяне на нейното количество в океаните, теоретичните изчисления позволяват да се оценят мащабите на този проблем.

Практически във всички проби на океанска вода е открита микропластмаса, а в някои региони концентрацията ѝ е десетки пъти по-висока от средното ниво.

Океанските кръговрати способстват за глобалното разпространение на микропластмаса, включително и в отдалечени региони като Арктика. Изследвания на ледени ядра показаха, че нивото на замърсяване с микропластмаса в Северния ледовит океан е 100 пъти по-високо, отколкото във водите на Атлантическия океан северно от Шотландия или във водите на северния Тихоокеански субтропичен кръговрат²³. Това свидетелства за мащаба на проблема и неговия трансграничен характер.

Повечето глобални изследвания, посветени на замърсяването на морската среда с пластмаса, са съсредоточени върху повърхностния слой на океана. Според оценки през 2019 година повърхностния слой на океана е съдържал между 82 до 358 трилиона пластмасови частици²⁴.

Въпреки това се появяват все повече доказателства, че в дълбоководните зони и в дънните утайки количеството микропластмасови частици достига неизчислими трилиони²⁵.

Леките пластмаси плуват на повърхността, докато по-плътните или тези, колонизирани от морски организми потъват на морското дъно²⁶. Оценките показват, че около 50% от градските пластмасови отпадъци са по-плътни от морската вода, което им позволява да се утаят бързо. На дъното те се разпространяват чрез дълбоководни течения, натрупвайки се в жлебове и панини. Микропластмаса е открита дори в най-дълбоката точка на океана — на дъното на Марианската падина²⁷ (фиг. 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>

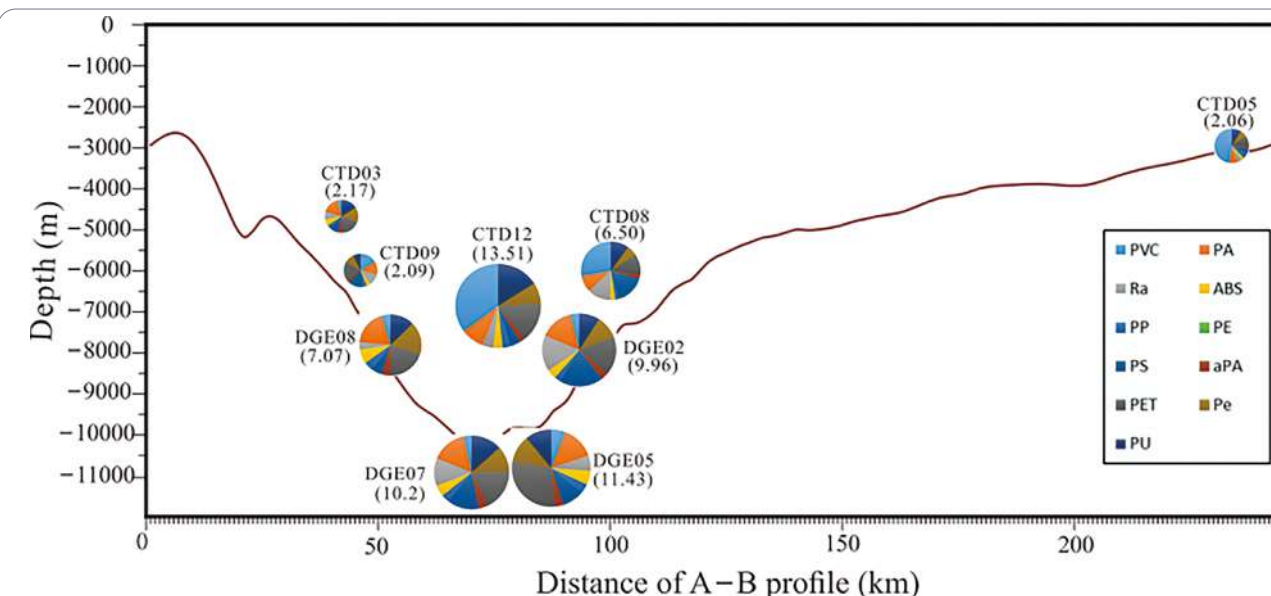
²⁴Eriksen, M. et al. A growing plastic smog, now estimated to be over 170 trillion plastic particles afloat in the world's oceans—Urgent solutions required. *PLoS ONE* 18, e0281596 (2023). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596>

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

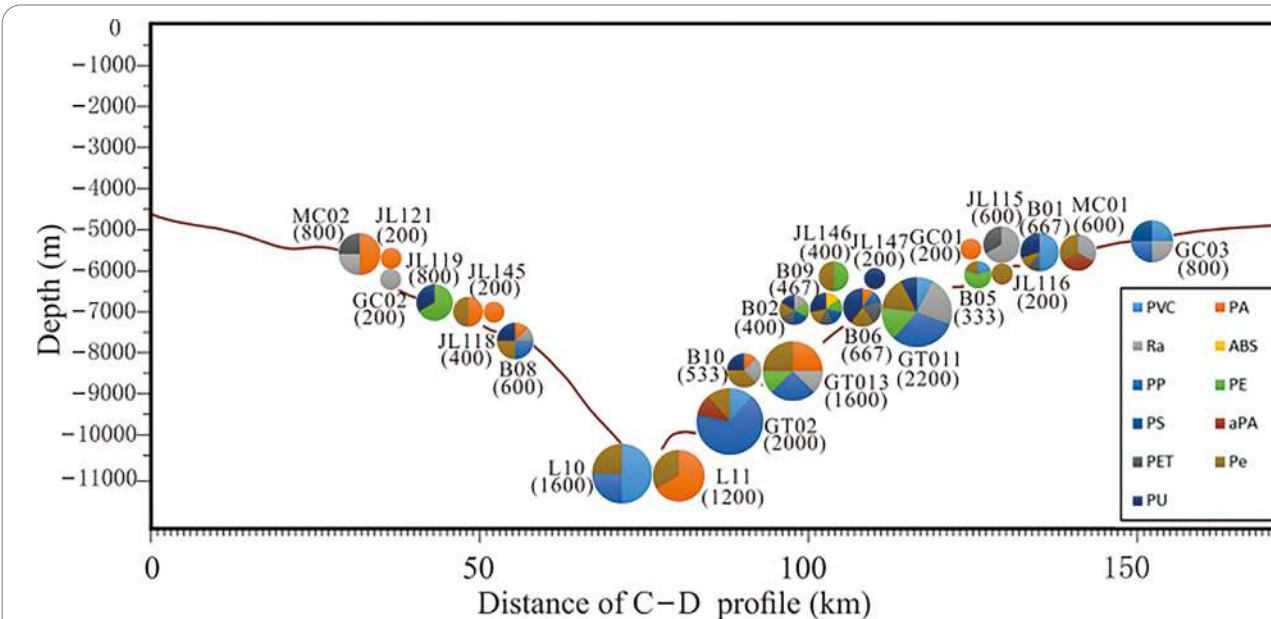
²⁶Lusher, A. (2015). Microplastics in the Marine Environment: Distribution, Interactions and Effects. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (eds) *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_10

²⁷Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018).

<https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

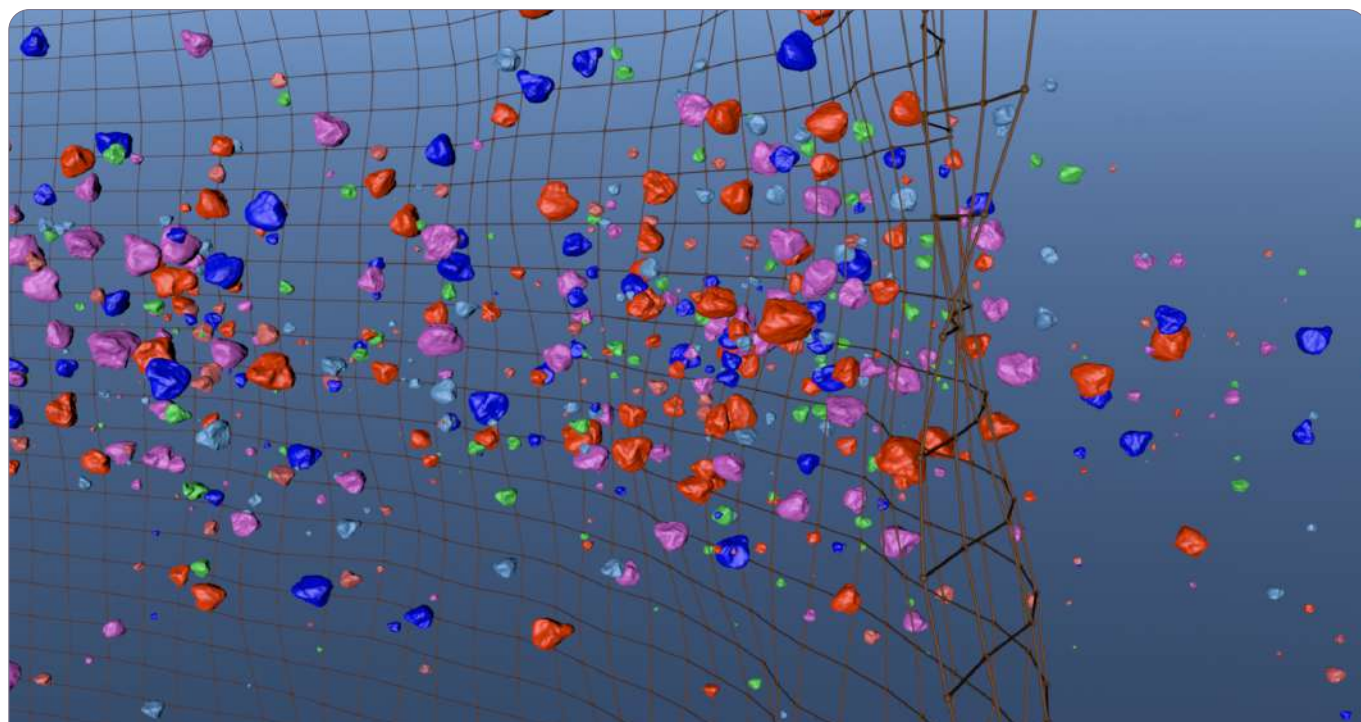


Фигура 8. Профил на разпространеността и състава на микропластмасата в проби от вода от Марианската падина. Кръговите диаграми представят състава на микропластмасата, а числата в скоби — разпространеност на микропластмаса в единици брой частици на литър. ПВХ (поливинилхлорид), ПА (полиамид), Ра (вискоза), АБС (акрилонитрил-бутадиен-стирен), ПП (полипропилен), ПЕ (полиетилен), ПС (полистирол), АПА (ароматен полиамид), ПЕТ (полиетилентерефталат), ПЕ (полиестер), ПУ (полиуретан). Оста X съответства на напречната линия от точка А (12° с.ш., 142,5° и.д.) до точка В (9,8° с.ш., 141,43° и.д.). Източник: 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>



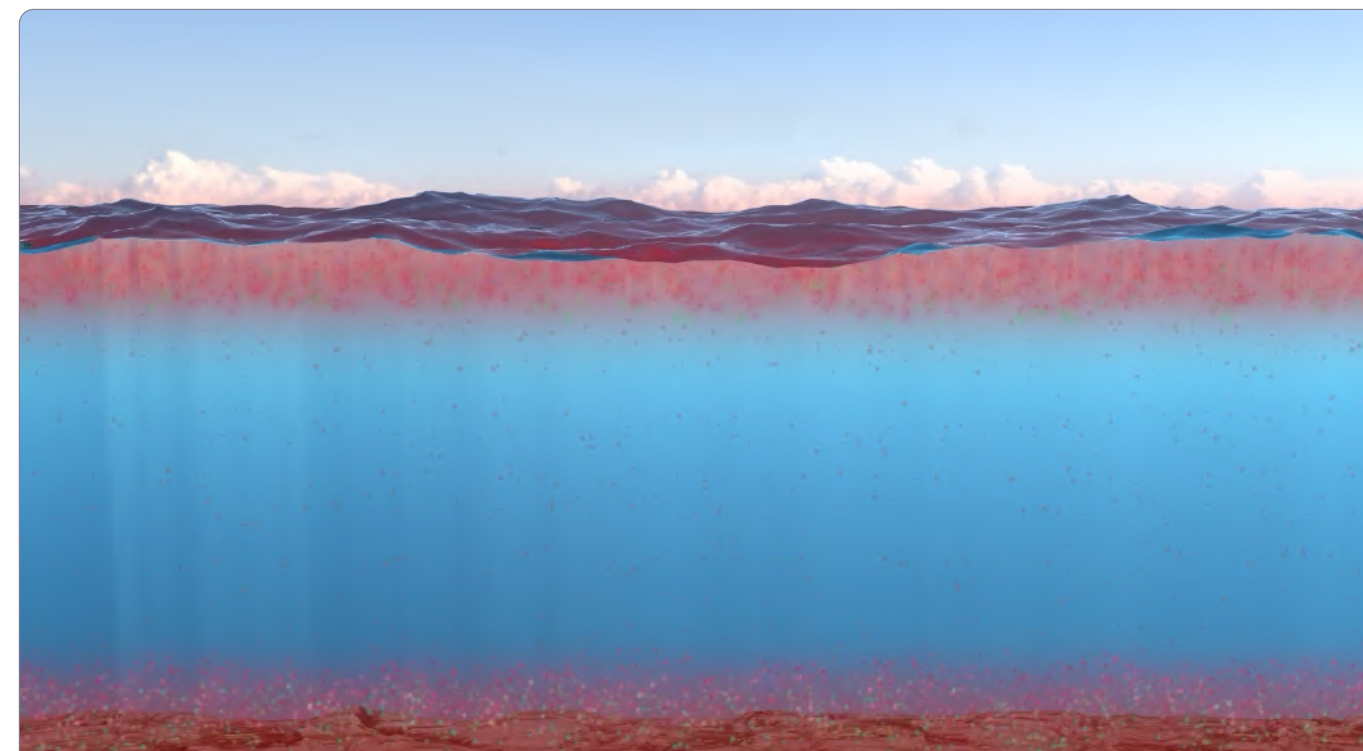
Фигура 9. Профил на разпространеността и състава на микропластмасата в проби от утайки от Марианската падина. Кръговите диаграми представят състава на микропластмасата, а числата в скоби — разпространеност на микропластмаса в единици брой частици на литър. ПВХ (поливинилхлорид), ПА (полиамид), Ра (вискоза), АБС (акрилонитрил-бутадиен-стирен), ПП (полипропилен), ПЕ (полиетилен), ПС (полистирол), АПА (ароматен полиамид), ПЕТ (полиетилентерефталат), ПЕ (полиестер), ПУ (полиуретан). Оста X съответства на напречната линия от точка С (12° с.ш., 141,9° и.д.) до точка D (10,5° с.ш., 141,3° и.д.). Източник: 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>

Фактически основното място за натрупване на микропластмаса не е повърхността на океана, а дълбокото морско дъно. Постепенно цялото океанско дъно се покрива със слой пластмаса. Въпреки това данните за замърсяването на океана с микропластмаса вероятно са занижени и реалната ситуация може да бъде значително по-лоша. Както отбелязва Мелани Бергман, биолог от Института за полярни и морски изследвания „Алфред Вегенер“ (Германия): „Не всеки има достъп до сложни и скъпи уреди за вземане на проби.“ Според нейните оценки до 90 % от морските микропластмасови частици могат да останат незабелязани при използването на стандартни методи за вземане на проби, тъй като размерите им са твърде малки за откриване²⁸ (фиг. 10).

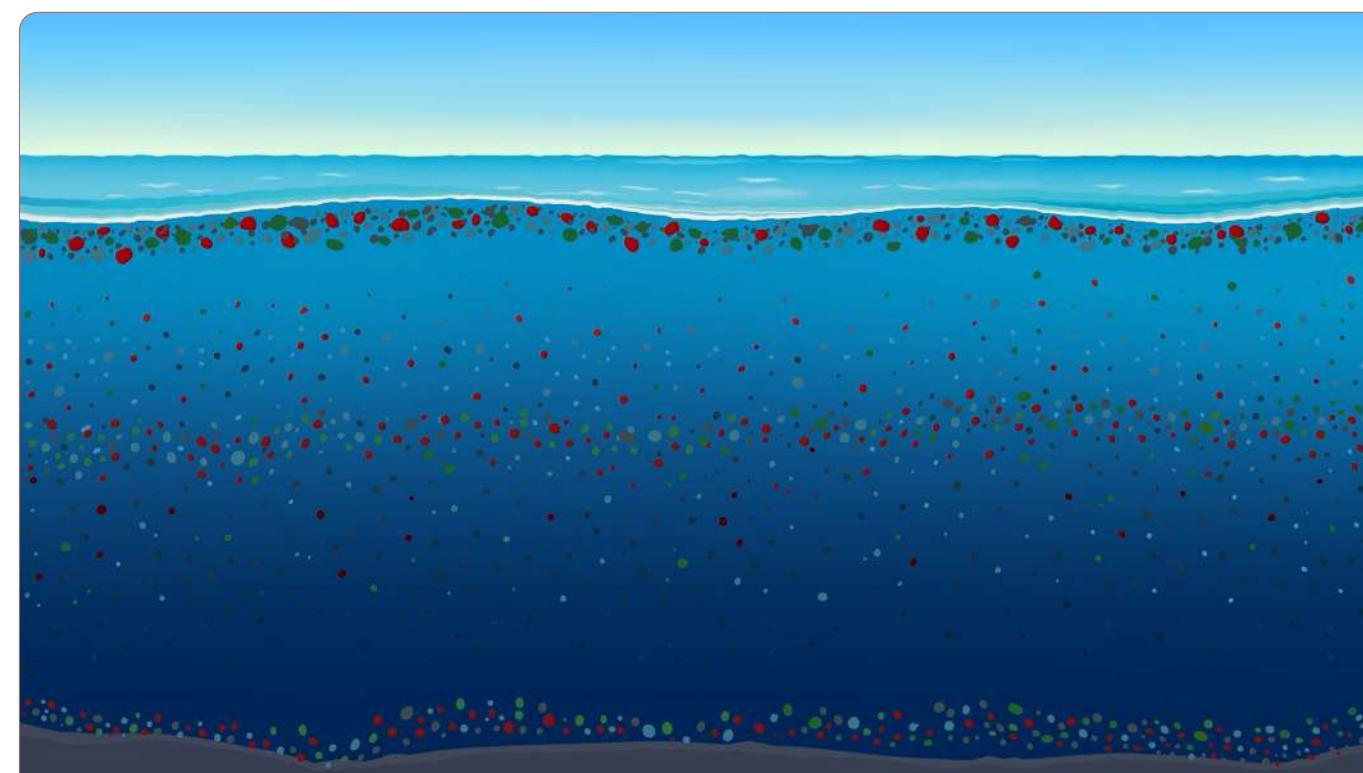


Фигура 10. Схематично изображение на несъвършените аналитични методи за улавяне на микро- и нанопластмаса

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>



Фигура 11. Схематично изображение на повърхностния и дънния слой на замърсяване с микро- и нанопластмаса

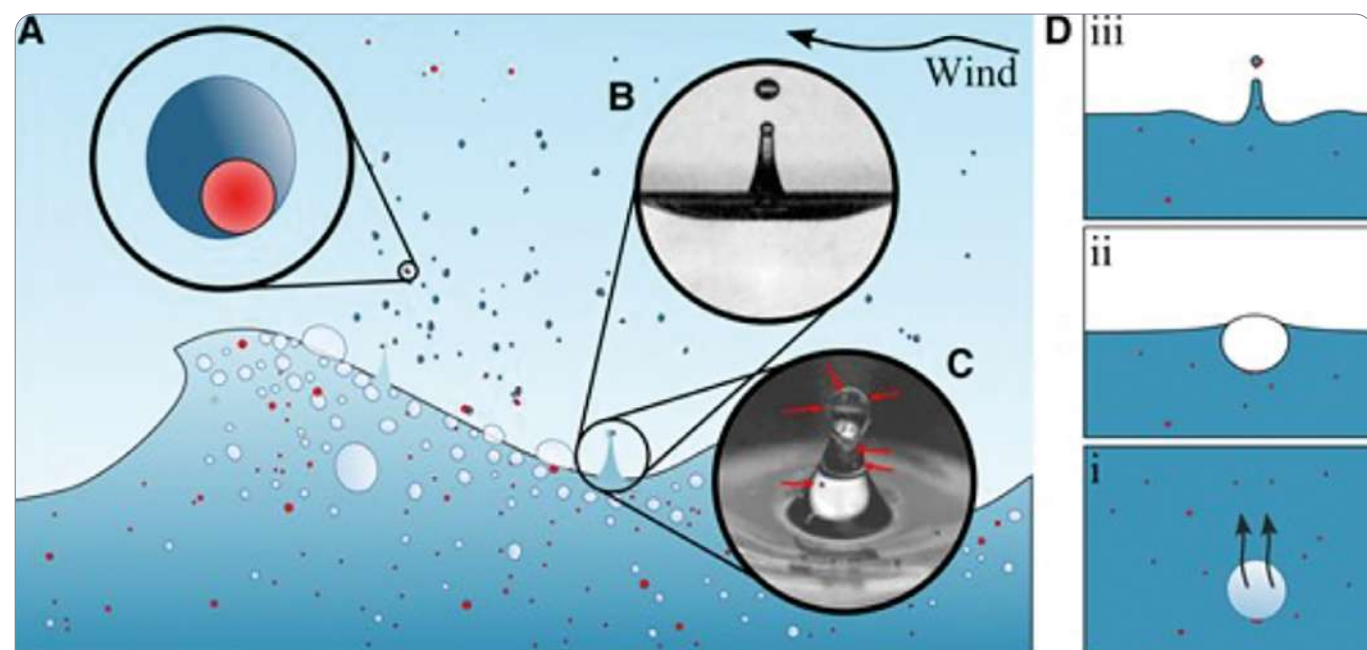


Фигура 12. Схематично изображение на разположението на микро- и нанопластмасата в повърхностния, дънния слой и зоната на термоклина

Освен повърхностния и дънния слой на замърсяване (фиг. 11), концентрацията на микро- и нанопластмаса значително се увеличава в областта на термоклина²⁹ (фиг. 12) – слой вода, в който се наблюдава рязка промяна на температурата. Високият градиент на плътността в този слой спомага частиците микро- и нанопластмаса да се задържат в тези зони и да остават там за дълго време. Океанът може да се представи като многослойна торта, където всеки слой притежава уникална температура и плътност, а микропластмасата се натрупва на границите между тези слоеве.

Освен това, микропластмасата се разпространява в океана чрез живи организми, които я поглъщат, смилат и отделят³⁰.

Разпространение на МНП в околната среда



Фигура 13. Изображение на съответните процеси на изпускане на микропластмаса от океана. А) Микропластмасата (червен / по-тъмен цвят) в океана се пренася в атмосферата с капки морска вода. В) Спукващите се мехурчета създават малки капки или аерозоли, такива като струйни капки. С) Микропластмасата, присъстваща в течността, може да се пренася в образуващите се струйни капки. Стрелките посочват частици микропластмаса с размер 100 μm . Образоващите се капки могат да бъдат подхванати от вятъра и да пренасят микропластмасовия материал в атмосферата. Течността в крайна сметка се изпарява, оставяйки микропластмасовите частици. D) Съответните физични процеси, свързани с изпускането на микропластмаса при спукване на мехурчета, започват с улавянето на частици по време на издигането на мехурчето. Di) След достигане на повърхността Di) мехурчето в крайна сметка приема равновесната си форма, която след спукване фокусира капиллярните вълни в основата си, образувайки струйни капки Di), пренасящи микропластмасовия материал.

Източник: 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>

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>

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>

Когато водата се изпарява³¹, микропластмасата се издига в атмосферата от повърхността на океана³². Също така, съчетанието от морски пръски, вятър и вълни образува във водата въздушни мехурчета, съдържащи микропластмаса. Когато мехурчетата се пукат, частиците попадат в атмосферата (фиг. 13). Годишно с морския бриз само по крайбрежията се пренасят около 136 хиляди тона микропластмаса³³. А до 25 милиона метрични тона микро- и нанопластмаса годишно се пренасят на хиляди километри чрез морски въздух, пръски, сняг и мъгла, прекосявайки държави, континенти и океани.



„Въздухът е много по-динамична среда от водата. В резултат микро- и нанопластмасата може много по-бързо да прониква в тези региони на нашата планета, които са най-отдалечени и все още в значителна степен незасегнати“, казва д-р Мелани Бергман, биолог от Института „Алфред Вегенер“ в Германия. След като попаднат там, частиците могат да повлияят на климата на повърхността и на здравето на местните екосистеми³⁴.

Микропластмаса е била открита на различни места – от повърхността на морето до дълбоководни отлагания, от селскостопански земи до най-високите ни планини, а също така и в морския лед, езерата и реките. Тя е била открита при 1300 водни и сухоземни вида, от безгръбначни в основата на хранителната верига до висши хищници, с доказателства за въздействие на всички нива на биологичната организация – от клетъчно до екосистемно. Микропластмасата е широко разпространена в храната, която ядем, водата, която пием, и въздуха, който дишаме (фиг. 14). Тя е била открита в много тъкани и органи на човешкото тяло и се появяват доказателства за нейното негативно въздействие³⁵.



Фигура 14. Повсеместно присъствие на микропластмасата в храната, водата и въздуха.

Източник: <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>

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>

По този начин придвижването към отдалечени и дори полярни региони може да се обясни с комбинация от атмосферен и морски пренос. Следователно е важно да се разбере взаимодействието между атмосферата и океана, за да се определи какви размери частици се пренасят и в какви количества.

Например, наскоро група изследователи откри в облаците на върховете на планини в Япония пластмасови гранули имащи хидрофилна (привличаща вода) повърхност³⁶. След това те анализираха пробите и стигнаха до извода, че нискоразположените и по-плътни облаци съдържат по-голямо количество микропластмаса. Наличието на полимери като ядра за кондензация **играе ключова роля в бързото образуване на облаци**, което в крайна сметка може да повлияе на общия климат³⁶.

Пластмасовите частички в облаците подпомагат задържането на по-голямо количество вода, което забавя валежите. Когато накрая завали дъжд, той е по-интензивен, тъй като в облаците се е натрупала повече вода. Освен това микропластмасата, подложена на ултравиолетовата светлина и филтрираната вода от облаците, има по-груба повърхност, която спомага за натрупването на повече олово, живак и кислородосъдържащи групи³⁷ по повърхността му.

Атмосферата основно пренася малки частици микропластмаса, което я прави много по-бърз транспортен път, който може да доведе до значителни отлагания в широк спектър на екосистеми. Дадените изследвания показват, че горите играят ролята на бариери за микропластмасата, пренасяна от вятъра. Листата, клоните и стволите задържат микропластмаса, която се отлага по повърхностите им. В резултат пластмасовите микрочастици, пренасяни от вятъра и валежите, остават по растенията или се утаяват на земята.

Ограниченият въздушен поток под плътната гора способства за устойчиво натрупване на тези частици в горските масиви. Листата на горния слой служат като дългосрочен резервоар за въздушната микропластмаса³⁸. Проучванията показват, че от есента на 2017 година до лятото на 2019 година в 11 природни паркове и резервати в западните щати на САЩ заедно с валежите са паднали над 1000 тона пластмасови частици. Това количество е достатъчно за производството на 120 милиона пластмасови бутилки³⁹. Подобна ситуация се наблюдава и в други региони на света. Например, дъбовите гори (*Quercus serrata*) в Япония, заемащи площ около 32 500 км², ежегодно улавят в короните си около 420 трилиона частици микропластмаса⁴⁰, пренасяни по въздуха.

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>

За разлика от горите, в градовете, благодарение на доброто проветряване и наличието на по-тежки частици от автомобилни изгорели газове и промишлен смог, част от микро- и нанопластмасата се утаява. Днес въздухът в горите е по-богат на нанопластмаса, отколкото в големите градове.

Светът се промени! И сега, когато хората плуват в океана, пекат се на слънце на плажа или бягат покрай брега или в парка, разхождат се в гората с цел подобряване на здравето, те всъщност излагат организма си на допълнително въздействие на микропластмаса. Микропластмаси от Африка и Северна Америка са открити в отдалечени и на пръв поглед девствени места, такива като френските Пиренеи. Това свидетелства за глобалното разпространение на микропластмасата, която се пренася с въздушните течения и валежите, преодолявайки огромни разстояния.

Микро- и нанопластмасата попада в градските водоеми чрез дъждовни оттоци, промишлени емисии и дъждовна вода, която улавя частици от атмосферата. Например, при едно пране на синтетични тъкани в отпадъчните води могат да попаднат до 1,5 милиона частици микропластмаса⁴¹. Тези частици, попаднали в отпадъчните води, след това се вливат в реки и океани, където ги поглъщат риби и други водни организми. Анализирайки отпадъците, открити в реките и околния ландшафт, изследователи успяха да изчислят, че само 10 речни системи пренасят от 88 до 95 % от пластмасата, която попада в океана от реките⁴².

В рамките на друго изследване учените преразгледаха общоприетите предположения за транспортирането на пластмаса в реките и стигнаха до извода, че фактическото количество пластмасови отпадъци в реките може да е с 90 % повече, отколкото се е смятало досега⁴³.

Пластмасата също присъства и в повечето големи езера по света. Плътността на пластмасовите отпадъци в езерата може дори да бъде по-висока, отколкото в най-големите океански „петна“ от боклук, и дори езера, разположени в незасегнати райони, съдържат значително количество отпадъци. Това бе потвърдено в рамките на голямо международно изследване, проведено под ръководството на Барбара Леони и Вероника Нава от Миланския университет Бикока⁴⁴. Според доклад на Програмата на ООН за околната среда (UNEP) от 2021 година, микропластмаса е била открита във всички изследвани пресноводни водоеми, включително реки, езера и водохранилища⁴⁵. Например, изследователите установиха, че почти 10 000 метрични тона, или 22 милиона паунда пластмасови отпадъци годишно попадат във Великите езера от Съединените щати и Канада⁴⁶.

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>

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>

В крайна сметка микропластмасата се връща при човека чрез консумация на риба или морски продукти.

Италиански учени откриха, че плодовете и зеленчуците също съдържат милиони частици микропластмаса. Високи концентрации са открити в ябълки, круши, моркови, картофи, зелена салата и броколи. При това в плодовете концентрацията на частици се оказва 2–3 пъти по-висока, отколкото в зеленчуците: от 52 хиляди частици на грам в салата до 223 хиляди в ябълките⁴⁷.

В хода на изследването беше установено, че 81% от 159 проби чешмяна вода, взети по целия свят, съдържат микропластмаса⁴⁸. Други изследвания потвърждават тези заключения, отбелязвайки наличието на микропластмасови частици и в минералната вода. Интересно е, че количеството частици е приблизително същото както в стъклени, така и в полиетилентерефталатни (ПЕТ) бутилки, като количеството достига до 6 292 частици на литър^{49, 50, 51}.

Учени от Университета в Нюкасъл (Австралия) проведоха изследване⁵², за да оценят колко пластмаса средно поема съвременният човек. Резултатите показаха, че човек изядва около 250 г пластмаса годишно, което е еквивалентно на 50 пластмасови торбички⁵³.

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>

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>

ЕКОЛОГИЧНИ И КЛИМАТИЧНИ ПОСЛЕДСТВИЯ ОТ ЗАМЪРСЯВАНЕТО С МИКРО- И НАНОПЛАСТМАСА

Как микро- и микропластмасата разрушава екосистемите на молекулярно ниво

Пластмасовите отпадъци присъстват навсякъде: от океаните и реките до почвата, въздуха и дори ледниците⁵⁴. Многогодишни наблюдения потвърждават, че пластмасата, за разлика от растителните и животинските вещества, не претърпява активно естествено разлагане. Тя се запазва в околната среда, без да участва в природните цикли на биodeградация⁵⁵. Създадена да устоява на процесите на разпад, пластмасата се превърна в постоянен елемент на глобалната екосистема. Тази устойчивост, първоначално смятана за технологичен успех, сега води до значителен екологичен дисбаланс.

В производството на пластмаси се използват над 13 000 химични вещества. От тях повече от 3 200, включително мономери, добавки и помощни вещества за преработка, са потенциално опасни поради токсичните си свойства⁵⁶.

Влияние на МНП върху свойствата на почвата и деградацията на екосистемите

Изследванията показват, че замърсяването с микропластмаса на наземните екосистеми, особено на селскостопанските почви, може да надвишава нивото на замърсяване на водната среда с 4–23 пъти⁵⁷, което сочи за значително натрупване на пластмаса в почвите. Пластмасата се натрупва в почвата по различни начини, включително пречиствателни съоръжения, мулчиране, атмосферни отлагания и продукти за ежедневна употреба. Безбройното използване на еднократни пластмасови изделия е тясно свързано със сериозно замърсяване на почвата с микро- и микропластмаса. Естествени и антропогенни фактори спомагат⁵⁸ за проникването на малки частици микропластмаса в почвата, което изменя важни екологични процеси⁵⁹.

Наблюденията потвърждават пагубното въздействие на микропластмасата върху екосистемата, засягащо структурата и функциите на микроорганизмите, растенията и почвите (фиг. 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> (Accessed May 1, 2025)

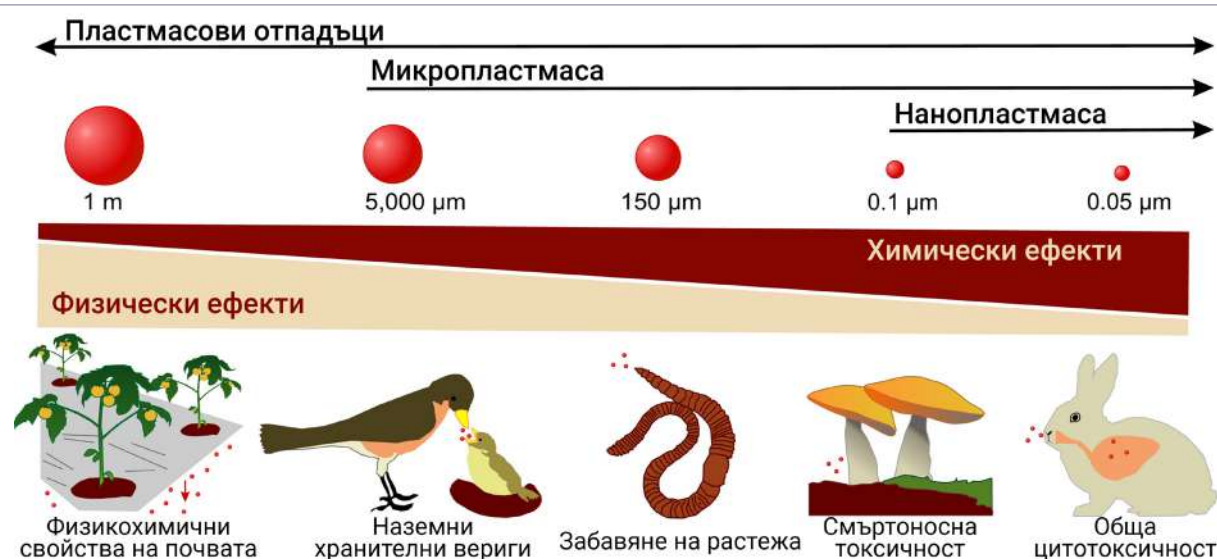
⁵⁷Yu, H., Zhang, Y., Tan, W. & Zhang, Z. Microplastics as an Emerging Environmental Pollutant in Agricultural Soils: Effects on Ecosystems and Human Health. *Front. Environ. Sci.* 10, 855292 (2022). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.855292>

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>

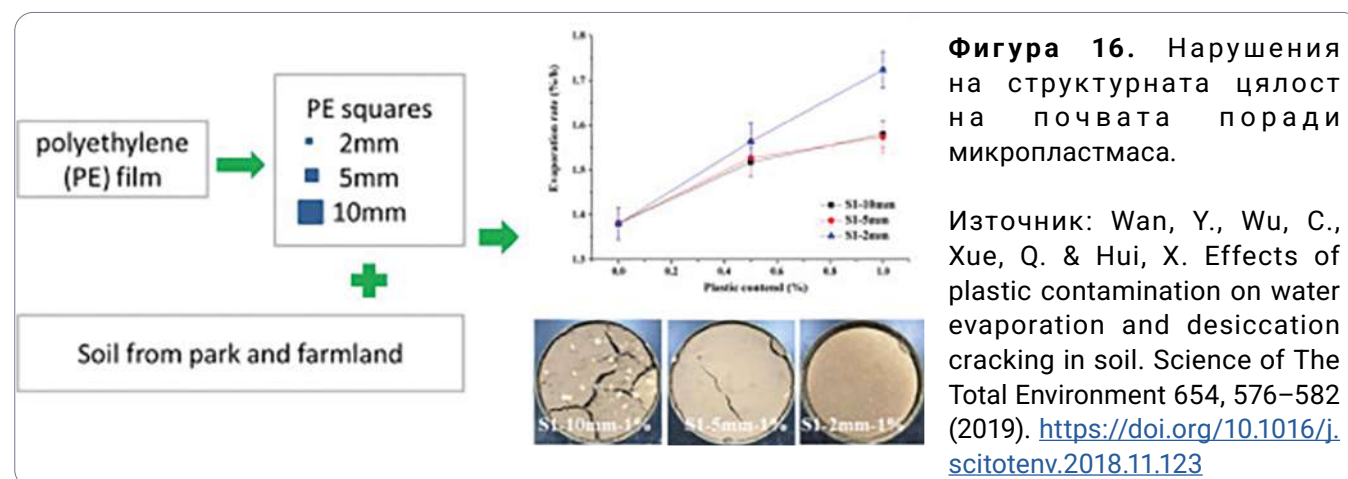


Фигура 15. Микропластмасата като пусков механизъм на комбинирани физични и химични.

Биогеохимия на почвата, свързана със селскостопанско мулчиране, консумация от земноводни и континентални птици, намаляване на растежа на дъждовни червеи, летална токсичност за гъби, възпаление на белите дробове при бозайници и широка цитотоксичност на нанопластмасата.

Източник: 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>

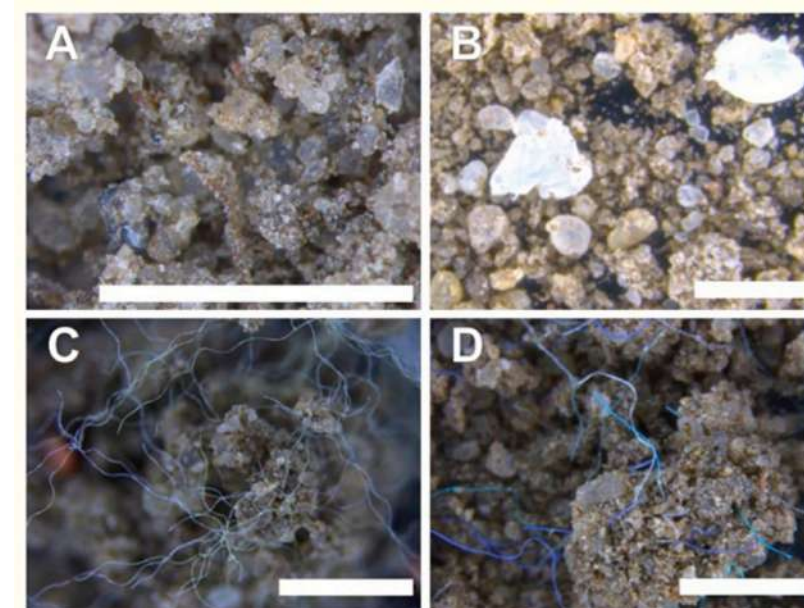
Резултатите от изследване на Китайската академия на науките показаха, че наличието на пластмасово фолио с различни размери в почвата значително увеличава скоростта на изпарение на водата. Особено силен ефект се наблюдава при добавяне на частици с размер 2 mm. По-големите пластмасови фрагменти (5–10 mm) водят до напукване на почвата, разрушаване на нейната структурна цялост. Тези данни сочат, че замърсяването с пластмаса нарушава водния цикъл в почвите, което може да задълбочи недостига на вода в почвата и да повлияе на вертикалния пренос на замърсяващи вещества⁶⁰ (фиг. 16–17).



Фигура 16. Нарушения на структурната цялост на почвата поради микропластмаса.

Източник: 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>



Фигура 17. Интеграция на микропластмасови частици в биофизичната среда на почвата.

Структурата на контролна почва (A) визуално не се различаваше под стереомикроскоп от почвата, замърсена с полиамидни топчета (SI S1D). Полиетиленовите фрагменти (B) и полиестерните (C) или полиакрилните влакна (D) доведоха до визуално различни признаци в почвата. Бялата линия на всяка панелка показва размер 1 mm.

Източник: 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>

Изследванията също така потвърждават неблагоприятното въздействие на пластмасата върху почвената биота — разнообразна общност, включваща микроорганизми (например, бактерии и гъби) и фауна (микроскопични и макроскопични животни). Тези организми взаимодействат помежду си, с корените на растенията и с околната среда, образувайки почвени хранителни вериги (фиг. 18), необходими за кръговрата на хранителните вещества и здравето на растенията.

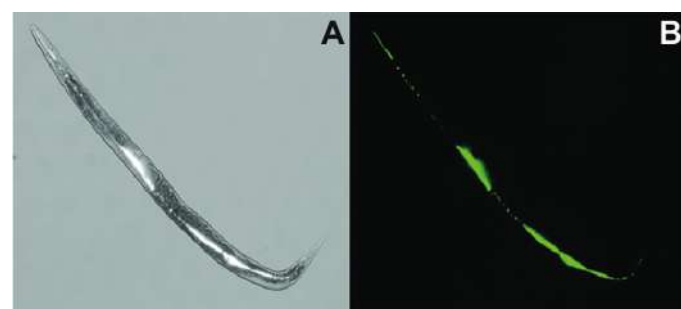


Фигура 18. Схематично изображение на процеса на образуване на почвени хранителни вериги.

Източник: 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>

Различни видове наземна биота служат като биоиндикатори за замърсяване с микропластмаса. Анализът на всички проби показва наличие на частици микропластмаса и потенциално токсични елементи (Sb, As, Fe, Al, Se, Zn) в различни концентрации, което свидетелства⁶¹ за възможна токсичност на микропластмасата⁶².

Изследвания показаха, че полистиролни гранули могат да бъдат поглъщани от почвения организъм нематода *Caenorhabditis elegans* (фиг. 19); това също така означава, че частици полистирол могат да се натрупват в почвената хранителна верига⁶³.



Фигура 19. Изображения в светло поле (А) и флуоресцентни изображения (В) на възрастен червей *Caenorhabditis elegans*, който е натрупвал 0,5 μm микросфери с жълто-зелена флуоресценция в продължение на 15 мин. при 20 °C. Снимките са направени при увеличение $\times 100$.
Източник: 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>

Почвената биота — това не е просто „биологичният двигател на Земята“, а многофункционална система, от която зависят всички наземни екосистеми. Нейната роля в поддържането на живота на планетата е съпоставима с функциите на океаните и атмосферата, което се потвърждава от изследванията на почвоведи, еколози и климатолози. Затова всяка промяна, предизвикана от токсичност, може да повлияе на много критични процеси в почвите и на хранителната верига, предизвиквайки екологичен дисбаланс⁶⁴.

Данните сочат способността на микропластмасата бързо да се адсорбира на повърхността на почвите благодарение на малкия си размер, голямата специфична повърхност, високата хидрофобност и устойчивост на биodeградация⁶⁵. Това улеснява нейното лесно поглъщане от организмите и натрупване в тях, което създава потенциална заплаха за здравето на човека. Този процес не се ограничава само до почвения слой, а се разпространява върху растенията, където продължава своето пагубно въздействие.

МНП в хранителните продукти

Антропогенните замърсители могат да оказват значително въздействие върху екосистемите, особено когато попадат в растенията. Потвърдено е, че МНП могат да се абсорбират и преместват в различни органи на растенията.

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. & Mohammedin, 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. & Mohammedin, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. *Coatings* 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>

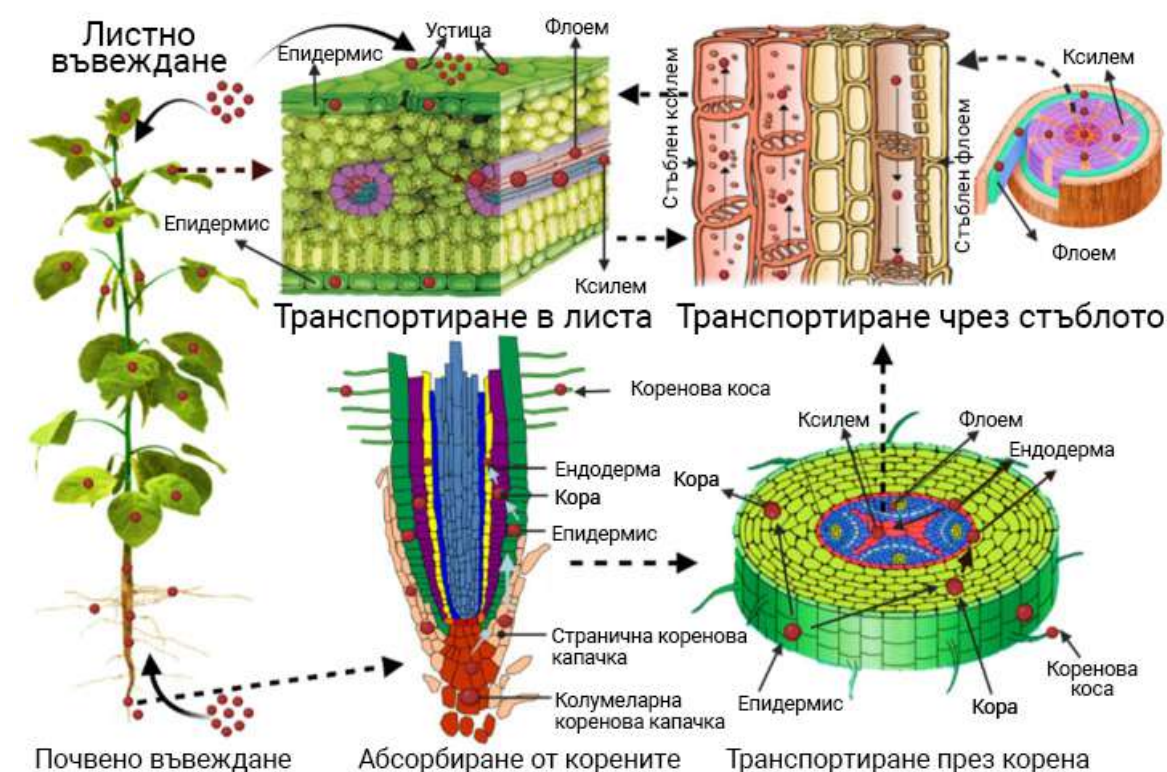
⁶⁵Sajjad, M. et al. Microplastics in the soil environment: A critical review. *Environmental Technology & Innovation* 27, 102408 (2022).

<https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102408>

Данните от изследвания сочат, че микропластмасата се натрупва в растителните системи по различни пътища, оказвайки неблагоприятно въздействие върху растенията, земеделските култури и хранителните продукти.

Нанопластмасата, благодарение на малкия си размер, е способна директно да прониква в растителната тъкан⁶⁶. Растенията абсорбират нанопластмасата от хранителната среда, след което тя се транспортира към надземните части чрез ксилемата — система от проводящи съдове, които транспортират вода и хранителни вещества от корените към стъблата и листата.

Микропластмасата, утаила се върху листата, прониква през устицата и може да се придвижва към корените по съдовите сночета. Както микро-, така и нанопластмасата проявява токсично въздействие върху физиологичните процеси и ензимната активност на земеделските растения (фиг. 20).⁶⁷



Фигура 20. Механизми на поглъщане на микро- и нанопластмаса в растенията.

Механизъм на поглъщане на пластмаса от растенията при попадане в почвата чрез абсорбция от корените; транспортни пътища от корена към стъблото и транспорт от стъблото към листата и плодовете. Внекоренното приложение показва проникване на пластмаса през устица на листата и последващо пренасяне в други части на растението. Плътната стрелка указва достъпността на пластмасата за растението, а пунктираната стрелка указва транспортирането вътре в растението.

Източник: 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>

Системата за транспорт на вода в растенията е способна бързо да пренася нанопластмаса към стъблата, листата и, възможно, плодовете. Според данни, получени при изследване на растения тютюн (*Nicotiana tabacum*), нанопластмаса с размер 100 nm не прониква в растителните клетки, докато частици с размер от 20 до 40 nm се абсорбират успешно⁶⁸.

Освен това някои пластмасови частици притежават собствен заряд, което може да засили тяхната адсорбция в корените на растенията чрез електростатично привличане, повлиявайки имобилизацията на хранителни вещества или процесите на фотосинтеза⁶⁹. Отрицателно заредените микропластмаси с по-голяма вероятност проникват в кората на корена⁷⁰.

В агроecosистеми със силно замърсяване с пластмасови частици се наблюдава забавяне на растежа⁷¹ и развитието на растенията, както и краткосрочно и преходно въздействие върху скоростта на поникване и развитието на корените⁷².

Изследванията потвърждават наличие на микропластмаса в търговски достъпен мед, произведен както индустриално, така и локално. Последващият анализ разкрива широко разпространение на микропластмаса в съцветията на различни видове растения^{73, 74}.

През последните години състоянието на популациите на пчелите по целия свят рязко се влоши. Изследванията показват, че една от недооценените причини за това може да бъде замърсяването на околната среда с микропластмаса (МП) и нанопластмаса (НП). Изследванията показаха, че пчелите „събират“ микропластмаса от въздуха, водата, растенията и почвата, а след това я носят в кошера. Пчелите събират нектар и прашец от растения, както и вода от естествени източници — а всички тези среди вече съдържат микропластмаса. Косъмчетата по тялото на пчелите играят ролята на „капан“ за частиците. Частици пластмаса се натрупват и по крачетата, особено в сгъвките и между сегментите — те влизат в контакт с повърхности на растения, почва, вода и дори със самия кошер.



„Медоносната пчела е много добър биологичен индикатор за замърсяване на околната среда, тъй като е повсеместна, покрита с косъмчета, които улавят примеси и частици, присъстващи във въздуха, чувствителна е към замърсители, много подвижна е и има широк радиус на полет, наред с други неща.“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>

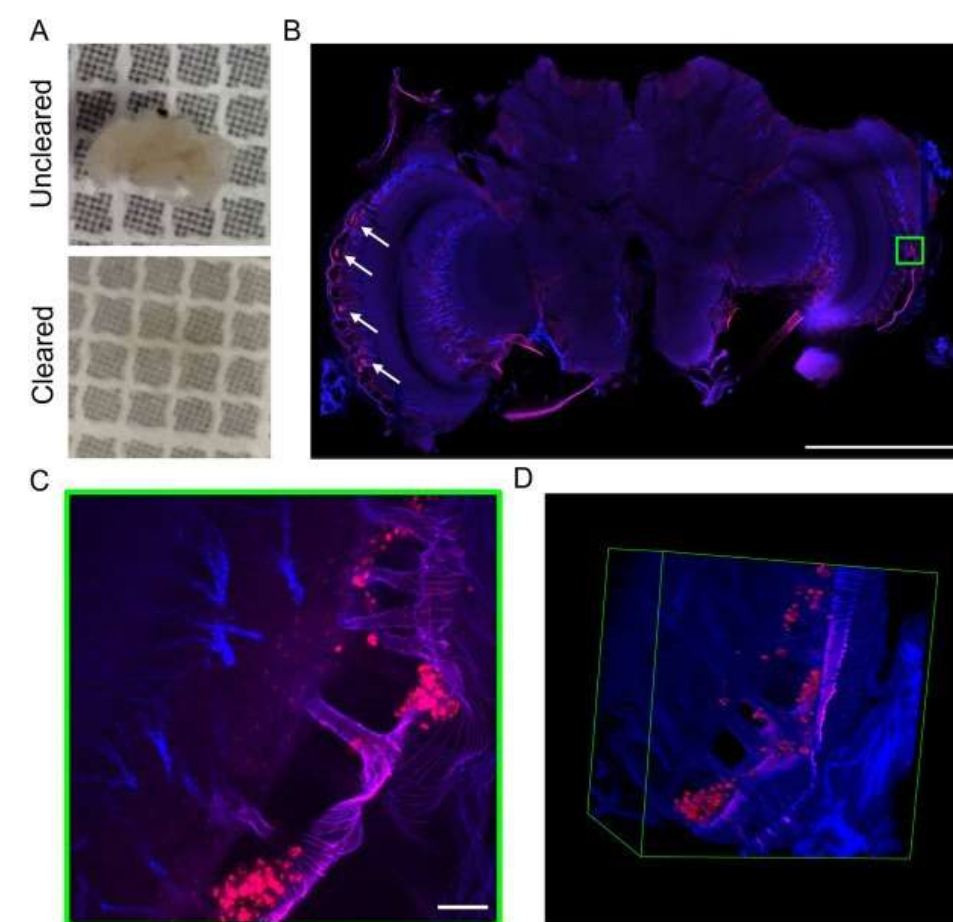
⁷²Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P. & Vijver, M. G. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere* 226, 774–781 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>

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>

В организма на пчелата микро- и нанопластмасата навлиза също и през кутикулата (външната обвивка на тялото). След като частиците пластмаса попаднат в тялото на пчелата, още след 3 дни те достигат до мозъка, причинявайки нарушения на паметта, ориентацията и когнитивните функции, които са от решаващо значение за намирането на храна и навигацията⁷⁶. Въздействието на микропластмасата върху мозъка води също така до намалена способност за възстановяване на паметта. Това е критично, тъй като пчелите се ориентират чрез познати ориентири в пространството. Нанопластмасата в мозъка на пчелите води и до загуба на способността да запомнят къде се намират източниците на нектар, по-слаба реакция на ароматите на цветята и отклонения по пътя обратно към кошера. Такива когнитивни нарушения пряко намаляват ефективността на опрашването и могат да дестабилизируют цялата колония⁷⁶.



Фигура 21. Откриване на значително количество микропластмаса в мозъка на медоносна пчела.

A) Снимки на дисециран мозък преди и след изясняване чрез метода iDISCO.

B) Единичен оптичен срез (дълбочина ~200 μm) от 3D реконструкция на целия мозък, получена чрез двуфотонна флуоресцентна микроскопия с обектив 10x; резолюция — 0,51 × 0,51 × 2 μm³. Синьото представлява автофлуоресценция на тъканта, червеното — микропластмаса с червена флуоресценция (обозначена с бели стрелки). Скала: 1000 μm.

C) Вложка с висока резолюция от очертаната в зелено област на изображението B, получена с обектив 63x. Изображението представлява проекция на максималната интензивност от стекова серия с дълбочина 150 μm и резолюция 0,17 × 0,17 × 1 μm³. Скала: 20 μm.

D) 3D визуализация на стековата серия, представена в C. Размери: 170 × 170 × 150 μm³.

Източник: 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>

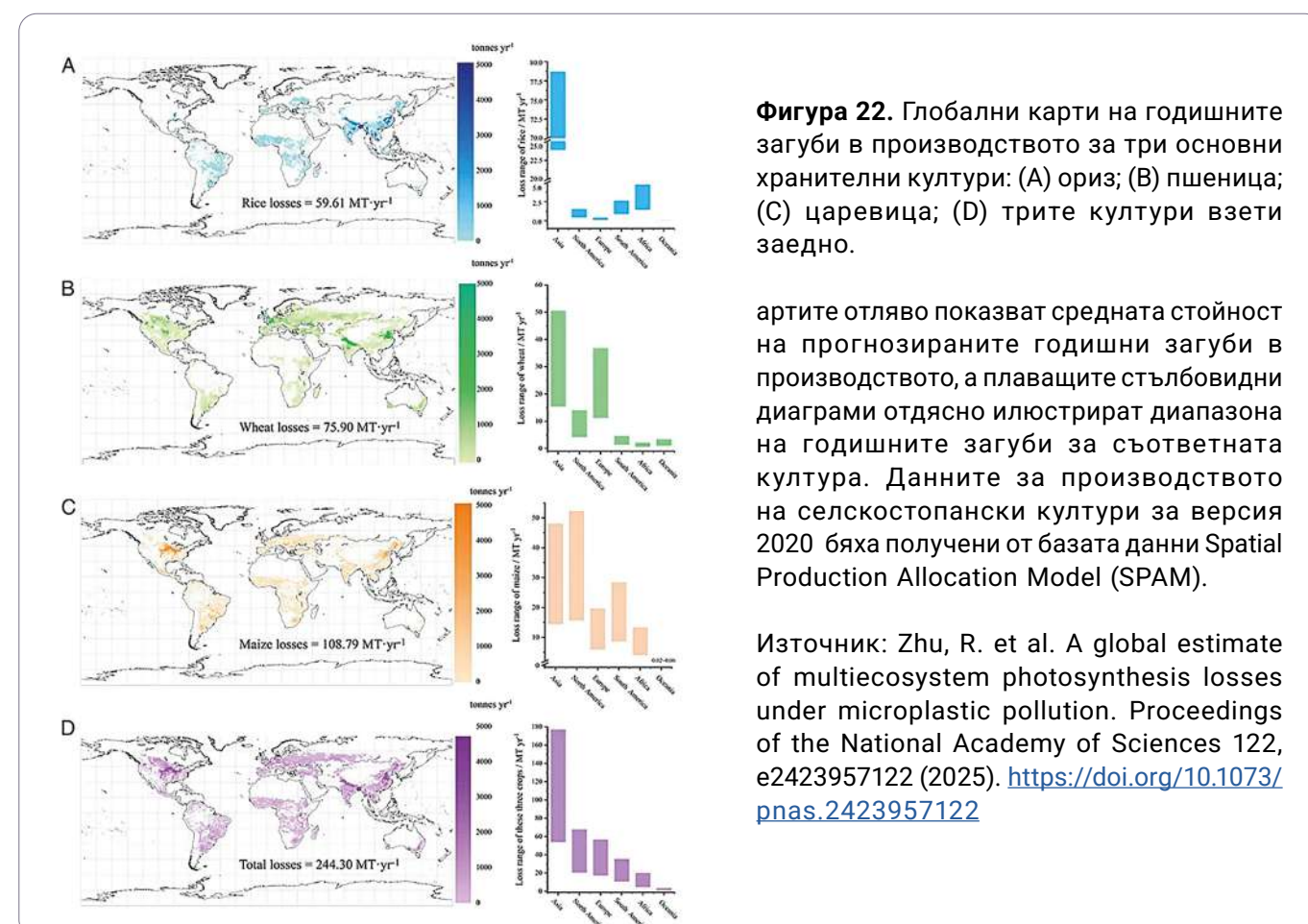
⁷⁶Pasquini, E. et al. Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition. *Science of The Total Environment* 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>

Попадайки в организма на пчелата, нанопластмасата също така причинява увреждане на червата, отслабване на имунната система и повишава чувствителността към вируси, което може да доведе до смърт на пчелите дори при липса на остра токсичност на пластмасата^{75, 77}. Освен това, фрагменти от пластмаса се натрупват не само в пчелите, но и в меда, восъка и ларвите, което създава затворен цикъл на пластмасово замърсяване вътре в кошера⁷⁵.

Това потенциално може да има сериозни последици не само за пчелите, но и за продоволствената сигурност. Пчелите са ключови опрашители и тяхното отслабване пряко влияе върху добивите на земеделски култури.

Увреждането на мозъка, загубата на телесна маса и отслабването на имунитета водят до намаляване на опрашвателната активност, което, както предупреждават учените, може да задълбочи кризата в глобалното производство на храни⁷⁷. Пчелите действат като активни биоиндикатори на замърсяването и вече сега микропластмаса е открита в значителни количества в меда, независимо от страната на производство⁷⁸.

Също така въздействието на МП намалява общото съдържание на хлорофил с 5,63–17,42 %, което води до загуба в световното производство на ориз, пшеница и царевица. Тази загуба възлиза на 4,11–13,52 % от общото годишно световно производство на тези култури, което има съществени последици за продоволствената сигурност⁷⁹ (фиг. 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>

Горите като акумулатори на МНП

Анализът разкри наличие на нанопластмаса в корените, стъблата, листата и иглите при всички изследвани концентрации и времеви интервали. Концентрациите на нанопластмаса в корените превишаваха тези в надземните части като минимум 10 пъти.

Пластмасовото замърсяване оказва негативно влияние върху функционирането както на вечнозелените иглолистни, така и на широколистните видове дървета, предизвиквайки оксидативен стрес и намалявайки ефективността на фотосинтезата, което може да доведе към забавянето на растежа и дори до загиване на растението. Изследванията показват, че нарушенията в етапите на фотосинтезата водят до натрупване на излишна светлинна енергия, която, без да се преобразува в химическа, причинява фотоокислителен стрес и увреждане на тъканите на растенията. За защита растенията активират фотозащитни механизми, в които каротиноидите разсейват излишната енергия във вид на топлина⁸⁰.

Нарушавайки фотосинтезата, предизвиквайки оксидативен стрес и намалявайки физиологичната активност на растенията, пластмасовото замърсяване повишава уязвимостта на екосистемите към климатичните промени. Тези данни подчертават мащаба на въздействието на пластмасовото замърсяване върху растителните съобщества, което от своя страна поставя въпроса за неговото влияние върху сухоземните животни, зависещи от тези екосистеми.

Как нанопластмасата разрушава фауната

Данни от многобройни изследвания свидетелстват, че натрупването на микро- и нанопластмаса в околната среда, включително в растенията, оказва влияние върху развитието на животновъдството⁸¹, засягайки хранителните вериги и здравето на животните. Наблюдения във ферма за млекопроизводство в Италия показаха, че всички проби от райграсено сено съдържат микропластмасак⁸². Изследване в Индия установи замърсяване с микропластмаса от полиетилентерефталат в 100 % от пробите на дажбата на млечни крави, с концентрации от 89 до 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. - 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>

Анализът потвърди наличие на микропластмаса във фоликуларната течност на едър рогат добитък⁸⁴, млякото⁸⁵, изпражненията на овце⁸⁶, говеждото месо и кръвта⁸⁷, което показва значително въздействие върху преживните животни. Според данните, 50–60 % от чуждите тела, извлечени от заклани животни⁸⁸, включително дребни преживни, такива като кози и овце, представляват пластмасови материали. Освен това, микропластмаса е открита във вътрешни тъкани на градски кучета и котки⁸⁹, в червата на домашни патици⁹⁰ и в белодробната тъкан на прасетай⁹¹.

Данните от изследвания потвърждават, че микропластмасата нанася вреда на животните не само сама по себе си, но и чрез добавките, използвани при нейното производство, както и замърсители, които тя абсорбира от околната среда, причинявайки увреждания с различна степен⁹². Наблюденията показват, че микропластмасата предизвиква при животните токсични ефекти, включително оксидативен стрес, увреждане на червата, имунна токсичност, както и репродуктивна токсичност и невротоксичност⁹³ (фиг. 23). Освен това, микропластмасата служи като носител за такива замърсители като тежки метали, антибиотици, устойчиви органични съединения и пестициди, което увеличава потенциалните рискове за екосистемите, здравето на животните и човека⁹⁴.

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/VOF-2022-JUL-PLASTICSUP.pdf>

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>

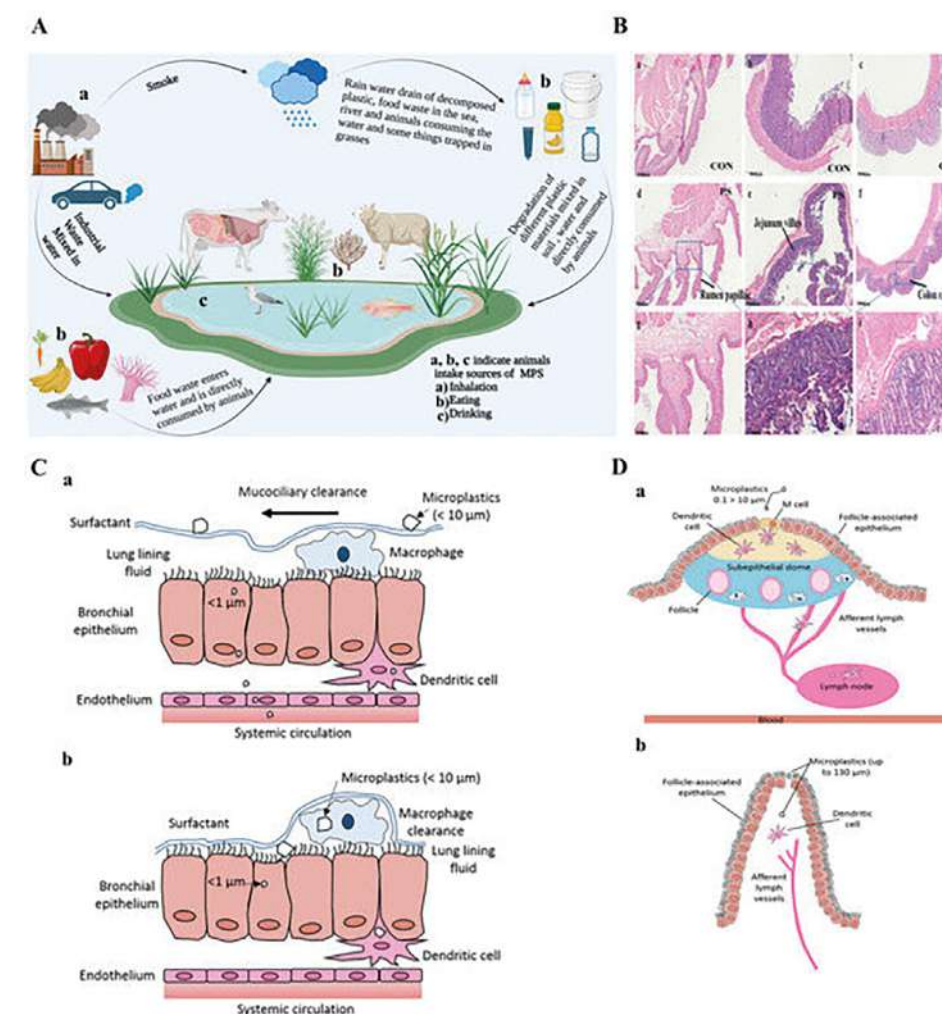
⁹⁰Susanti, R., Yuniastuti, A. & Fibrina, F. The Evidence of Microplastic Contamination in Central Javanese Local Ducks from Intensive Animal Husbandry. Water Air Soil Pollut 232, 178 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05142-y>

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>



Фигура 23. Схематично изображение на пътищата на постъпване на микропластмаса в организма на животните и нейното въздействие върху стомашно-чревния тракт.

(A) Пътища на постъпване на микропластмаса (МП) в организма на животните.

(B) Състояние на стомашно-чревния тракт при въздействие на полистиролни частици (ПС) преди и след експозиция:

Изображения, оцветени с хематоксилин-еозин (H&E), на стомаха (a), тънкото черво (b) и дебелото черво (c) в контролната група (КГ).

(d) H&E-изображение на стомаха от групата с полистиролни частици с малък размер (Малък ПС).

(e) H&E-изображение на тънкото черво от групата с полистиролни частици с голям размер (Голям ПС).

(f) H&E-изображение на дебелото черво от групата с полистиролни частици с голям размер (Голям ПС).

(g–i) Локално увеличени изображения, съответстващи на (d–f) съответно.

(C) Потенциални механизми за абсорбция и извеждане на микропластмаса (с размер от 0,1 до 10 μm) в белите дробове: (a) В горните дихателни пътища (централната част на белите дробове), където белодробната мембрана е по-дебела, белодробните течности (сърфактант и слуз) намаляват вероятността от придвижване на микропластмасата. Частиците с размер над 1 μm се отстраняват от ресничестата лигавица. Частиците под 1 μm могат да се абсорбират от епитела. (b) Ако аеродинамичният диаметър на микропластмасата й позволява да достигне до дълбоките отдели на белите дробове, тя може да прониква през по-тънкия слой белодробна течност и да влиза в контакт с епитела, разпространявайки се чрез дифузия или активен клетъчен захват

(D) Предполагаеми пътища за абсорбция на микропластмаса от стомашно-чревния тракт (СЧТ): (a) Абсорбция на микропластмаса (с размер от 0,1 до 10 μm) от лумена на СЧТ чрез М-клетки на Пайеровите лимфни възли посредством ендоцитоза. М-клетките улавят и транспортират частиците от лумена на червата към лимфоидната тъкан на лигавицата. (b) Микропластмасата се абсорбира от лумена на СЧТ чрез параклетъчна абсорбция. Неразградими частици, като микропластмаса, могат механично да се внедряват в подлежащите тъкани чрез слаби връзки в еднослойния епител. Дендритните клетки могат да улавят тези частици и да ги транспортират към лимфните съдове и вени, разположени отдолу. Частиците могат да се разпределят във вторични тъкани, включително черен дроб, мускули и мозък.

Източник: 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>

Данните от наблюденията свидетелстват, че дивите животни погрешно приемат пластмасовите отпадъци за храна. Това води до тяхното натрупване в червата. В Зимбабве⁹⁵ и в Шри Ланка⁹⁶ слонове, които са се хранили на открито сметище, са загинали от неусвоима пластмаса. В японския парк Нара дива елени умирали от усложнения, предизвикани от поглъщане на пластмасови отпадъци, оставени от туристи⁹⁷. Изследване на повече от 30 000 камили в близост до Дубай в Обединените арабски емирства установи, че 1 % от животните вероятно са загинали поради пластмаса, натрупала се в храносмилателния им тракт⁹⁸. Учени въведоха термина „полибезоар“ за описание на плътна маса от неусвоими материали, такива като пластмаса, въжета, отпадъци и солни отлагания, която формира камъкоподобен конкремент в стомаха или червата, особено при преживни животни. Терминът съчетава „поли“ (синтетично вещество) и „безоар“ (каменисто образувание). Наблюденията потвърждават, че полибезоарите предизвикват запушване на стомашно-чревния тракт, сепсис от растеж на бактерии, обезводняване и недохранване (фиг. 24).



Фигура 24. Полибезоари, открити вътре в мъртви камили в пустинята, недалеч от Дубай. Най-големият от анализиранияте за новото изследване тежал почти 64 кг (141 фунт). Източник: 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>

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>

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>

Предаване на МНП по хранителните вериги – от планктона до човека

Натрупването на пластмаса в океана оказва значително негативно въздействие върху морските екосистеми. Научни наблюдения през последните четири десетилетия са открили микропластмаса практически във всички морски местообитания по света⁹⁹. Изследванията потвърждават, че пластмасовите отпадъци застрашават морското биоразнообразие, засягайки най-малко 690 вида, включително китообразни, тюлени, морски птици, костенурки, риби и ракообразни¹⁰⁰. Поглъщането на пластмаса излага животните на въздействието на допълнителни токсини. Химични вещества от пластмасата се извличат в организма след консумация, предавайки се по хранителните вериги от плячката към хищника. Последиците от заплитане или поглъщане варират от летални до сублетални, предизвиквайки нарушения в храненето, проблеми с храносмилането, недохранване, заболявания, намалена репродуктивна способност, забавен растеж и съкратяване на продължителността на живота¹⁰¹. Заради малкия си размер микропластмасата се абсорбира от планктона – ключово звено в морските хранителни вериги. Планктонът се консумира от много морски видове, а тези, които не се хранят директно с него, изяждат организми, които вече са употребили планктон. Така микропластмасата се интегрира в хранителните вериги (фиг. 25–26).

През 1999 година анализ на проби от повърхностни води в централния кръговрат на северната част на Тихия океан установил, че масата на пластмасата надвишава масата на зоопланктона – основния източник на храна в екосистемата – шесткратно¹⁰², което подчертава доминацията на пластмасата над живите организми в океана.

Изчисления, базирани на наблюдателни данни, показват, че концентрацията на микропластмаса се увеличава с нарастването на размера на рибата. Данните показват, че най-голямото животно – китът – поглъща ежедневно до 43,6 кг пластмаса, при това 98,5 % от този обем постъпва чрез храната, а не директно от водата, тъй като микропластмасата вече се съдържа в плячката¹⁰³.

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>

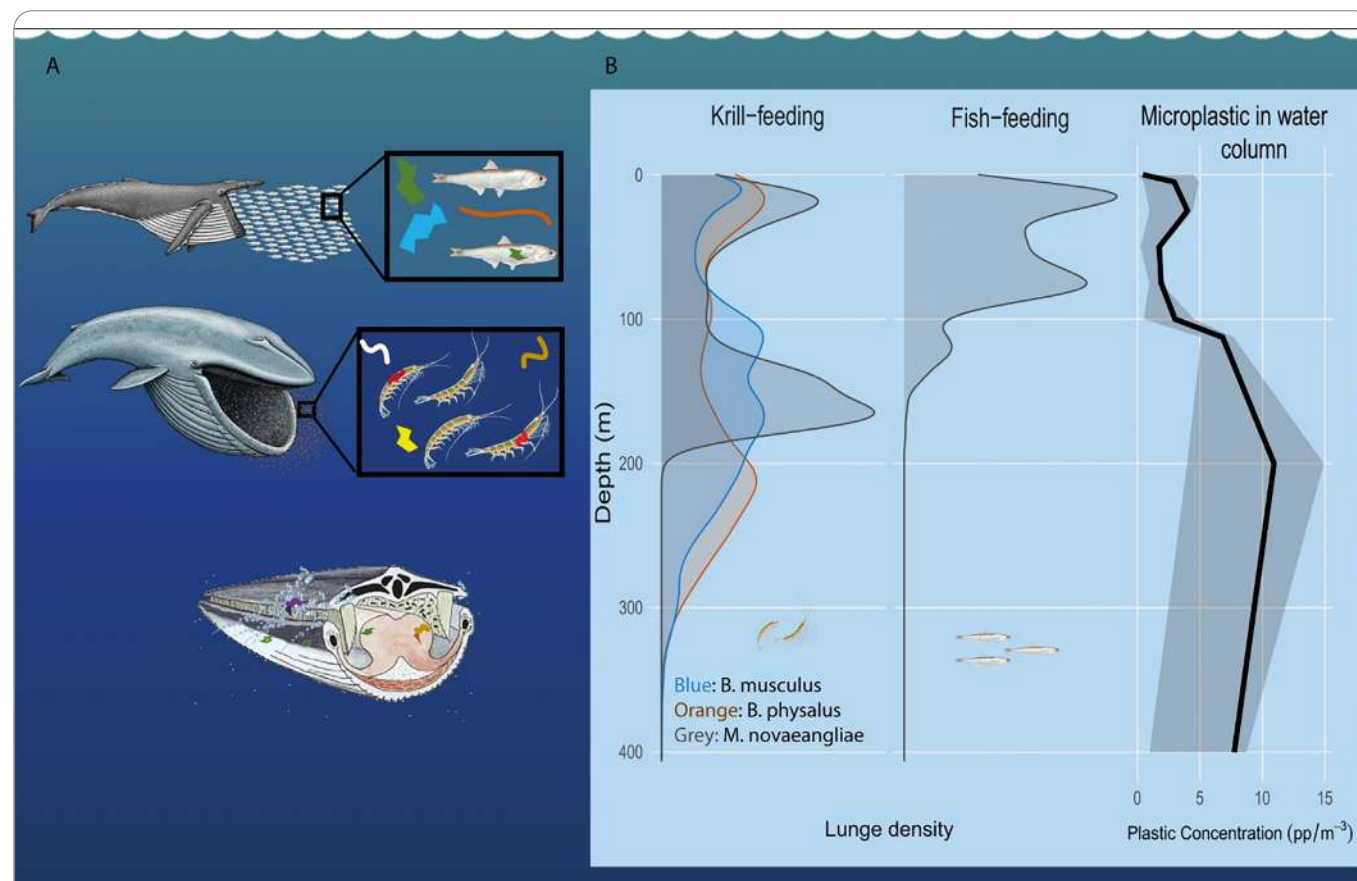
¹⁰⁰O'Hanlon, N. J., James, N. A., Masden, E. A. & Bond, A. L. Seabirds and marine plastic debris in the northeastern Atlantic: A synthesis and recommendations for monitoring and research. *Environmental Pollution* 231, 1291–1301 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.101>

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>

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>



Фигура 25. Дълбочина на хранително поведение на полосатите китове в зависимост от концентрацията на микропластмаса във водния стълб.

а — Пластмаса, поглъщана от китовите на ден, моделирана като сума от (i) пластмаса, филтрирана от водата на ден, и (ii) пластмаса, погълната чрез плячката на ден. Диапазон на възможния риск от въздействие при поглъщане на пластмаса: нисък, среден и висок — тъй като за някои променливи липсват изчерпателни данни;

б - Дълбочина на гмуркане спрямо разположения в залива Монтерей, съответстваща на дълбочинния профил на концентрацията на пластмаса в залива Монтерей. Китове и обекти на плячка са илюстрирани от Алекс Боерсма, а диаграмата на филтрация в напречен разрез — от Скот Лендри от Центъра за крайбрежни изследвания.

Източник: 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>

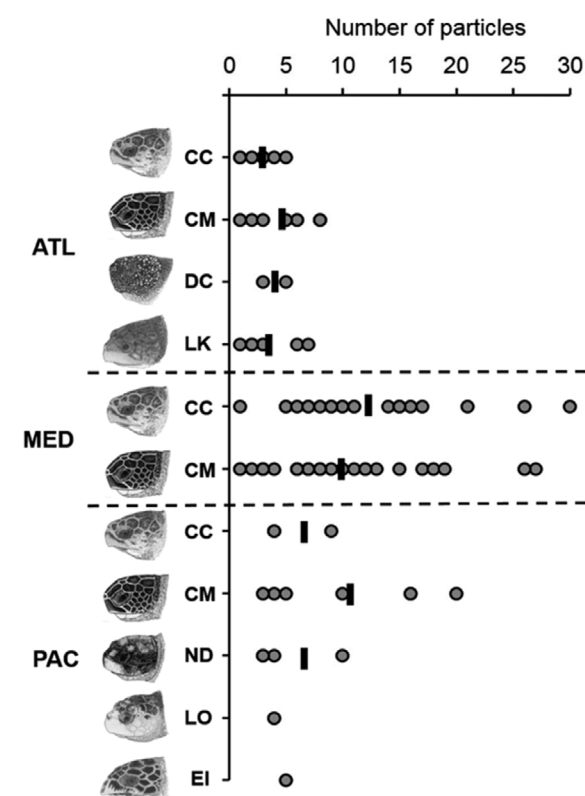


Фигура 26. Схематично изображение на проникването на пластмаса в хранителните вериги

Пластмасата убива морските организми

Годишно от замърсяването загиват около 1 милион морски птици и 100 000 морски бозайници¹⁰⁴. Наблюденията потвърждават връзката между погълнатите отпадъци и смъртността при морските птици. Изследване на 1 733 екземпляра от 51 вида установи, че в 557 птици (32,1 %) са открити морски отпадъци — от 1 до 40 предмета, с максимално тегло 3 340 мг и с обем 3 621 мм³¹⁰⁵.

Отделни данни показват, че някои пластмаси отделят диметилсулфид — химическо вещество, което имитира обонятелния сигнал, използван от морските птици за идентифицирането на храната¹⁰⁶. Нови изследвания също така са установили, че поглъщането на пластмаса причинява на малките птички поражения на бъбреците, черния дроб и стомаха, както и увреждания на мозъка, подобни на болестта на Алцхаймер. Това подчертава разрушителното въздействие на пластмасовото замърсяване върху морската фауна¹⁰⁷. При всеки екземпляр от всички седем вида костенурки в трите океански басейна бяха открити синтетични частици¹⁰⁸ (фиг. 27).



Фигура 27. Поглъщане на синтетични микропластмаси от всички видове морски костенурки в трите океански басейна. Общото количество частици, идентифицирани във всяка подпроба с обем 100 мл за всеки вид във всеки океански басейн. Черната линия показва средното количество частици. Фигурите на черепи на морски костенурки са използвани с разрешението на WIDECAST; оригиналните рисунки са на Том Макфарланд.

Източник: 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://www.wwf.org.au/blogs/how-many-birds-die-from-plastic-pollution>.

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>

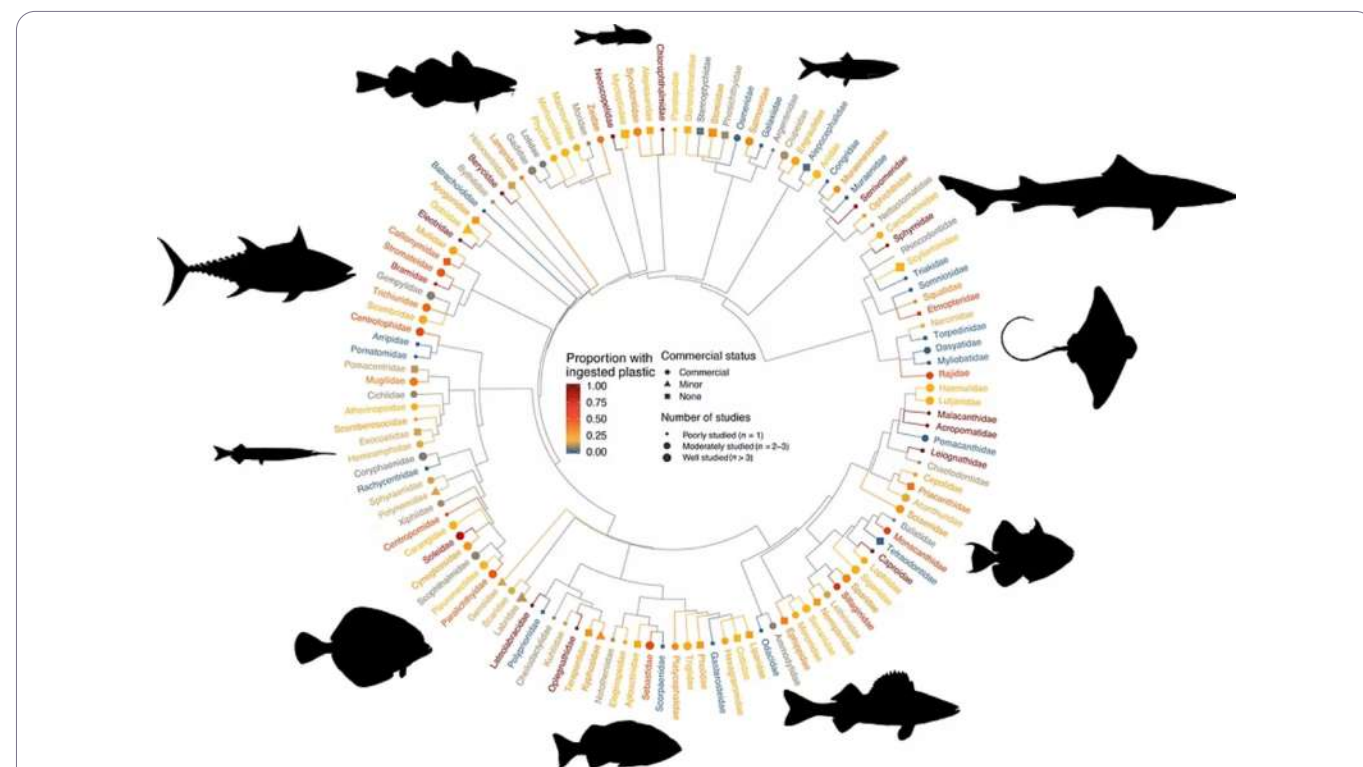
¹⁰⁶Savoca, M. S., Wohlfeil, M. E., Ebeler, S. E. & Nevitt, G. A. Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. Sci. Adv. 2, e1600395 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>

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>

Изследвания на 171 774 екземпляра от 555 вида морски риби показват, че 386 вида морски риби, включително 210 с търговско значение, консумират пластмасови отпадъци¹⁰⁹. Честотата на поглъщане на микропластмаса от рибите, според данните от изследванията, е 26 %, като се е удвоила през последното десетилетие (фиг. 28). Анализът разкри положителна корелация между изобилието на пластмаса във водите на повърхността (фиг. 29) и нейното потребление от морските организми (фиг. 30).

Лабораторните изследвания показват, че съединенията от пластмаса, прониквайки в тъканите на рибите, намаляват активността им, нарушават функцията на черния дроб, увреждат мозъка, а също така и забавят растежа и влошават репродуктивната функция^{109, 110, 111}.



Фигура 28. Семейства риби и поглъщане на пластмаса.

Филогенетични връзки между семейства на морски риби ($n = 131$), оцветени в зависимост от честотата на поглъщане на пластмаса. Формите на всяко връхче обозначават дяла на видовете в рамките на семейството в набора от данни, които се ловят за търговски цели (0 — няма видове, ловени за търговски цели; незначителни — 25 % от видовете, ловени за търговски цели; търговски — > 25 % от видовете, ловени за търговски цели). Размерът на върха указва броя на изследванията, проведени по видовете в това семейство. Това откроява 15 семейства, които са добре изучени ($n > 10$ екземпляра, > 2 вида) с висока честота на поглъщане на пластмаса ($FO_{plastic} > 0,25$); 67 от тези семейства с регистрирано поглъщане на пластмаса също са търговски.

Източник: 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>

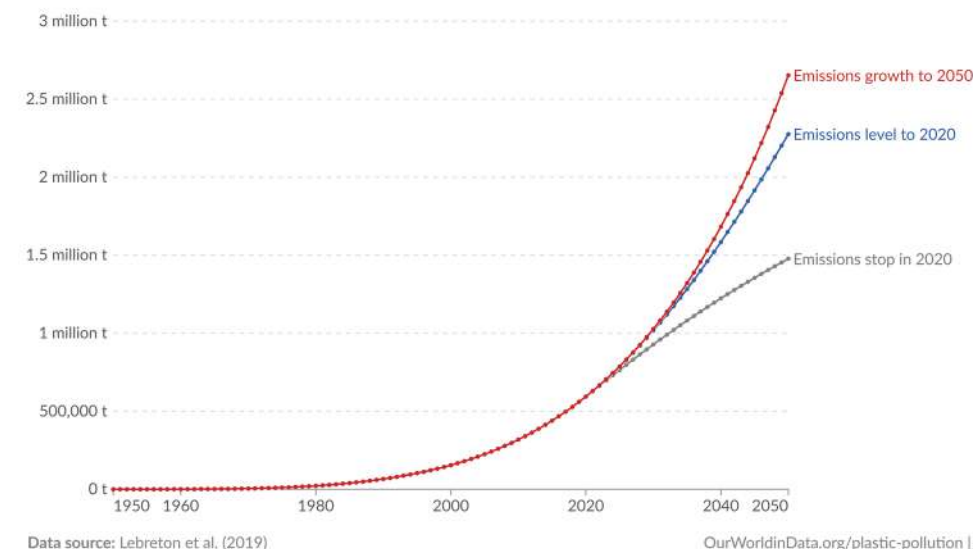
¹⁰⁹Savoca, M. S., McInturf, A. G. & Hazen, E. L. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. *Global Change Biology* 27, 2188–2199 (2021). <https://doi.org/10.1111/gcb.15533>

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., 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>

Microplastics in the surface ocean, 1950 to 2050

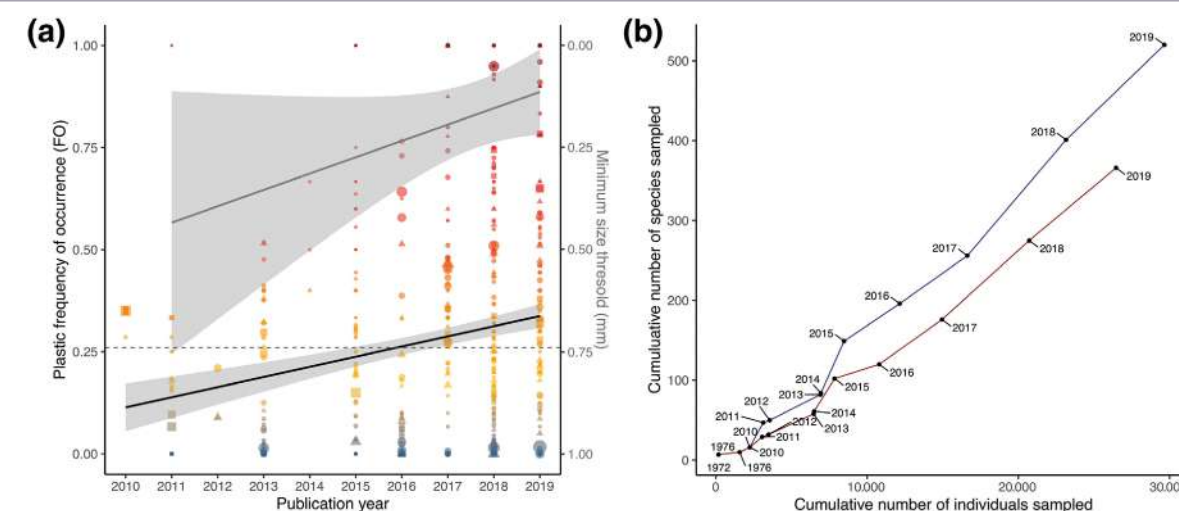
Microplastics are buoyant plastic materials smaller than 0.5 centimeters in diameter. Future global accumulation in the surface ocean is shown under three plastic emissions scenarios: (1) emissions to the oceans stop in 2020; (2) stagnate at 2020 rates; or (3) continue to grow until 2050 in line with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



Фигура 29. Графика на растежа на количеството микропластмаса на повърхността на океана с прогноза до 2050 година.

Източник: <https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean> (Accessed May 1, 2025)

Източник данни: 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>

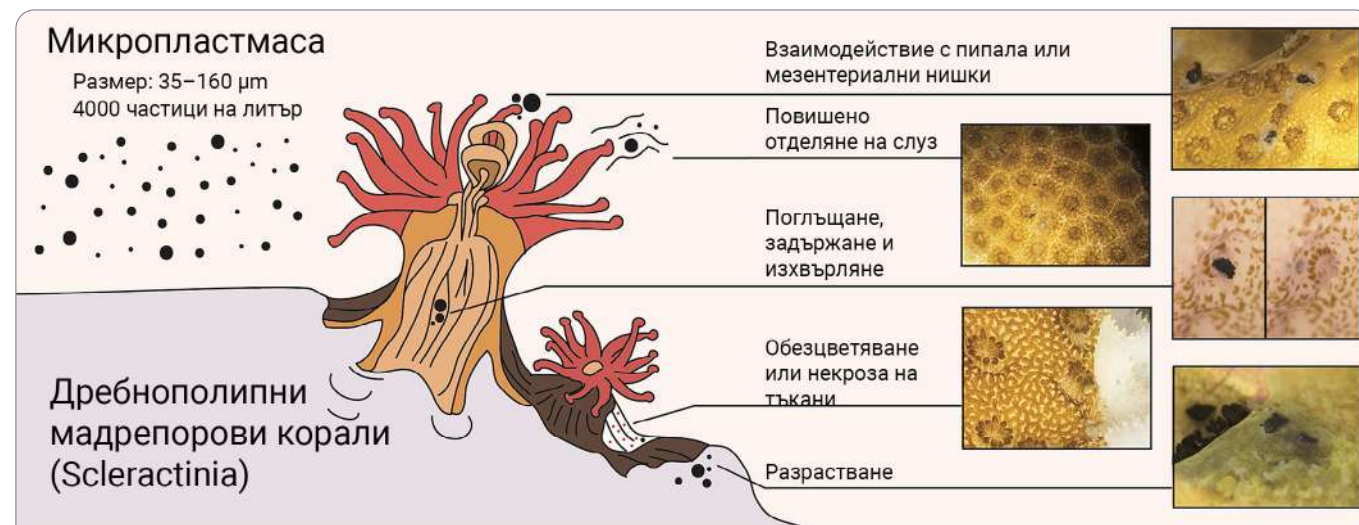


Фигура 30. Времени тенденции на поглъщане на пластмаса от риби. (а) Горната сива линия показва, че от 2011 година се наблюдава тенденция към откриване на все по-дребни частици. Долната черна линия показва увеличаване на честотата на срещане на пластмаса (FO) сред всички видове риби в периода от 2010 до 2019 година. През този период честотата на поглъщане на пластмаса значително се е увеличила с темп от 2,4 % годишно. Хоризонталната пунктирна линия представлява $FO_{0,26}$ — средната честота на поглъщане на пластмаса от риби по света. (б) Крива на натрупване на видове, където синята линия показва кумулативния брой видове, изследвани с течение на времето, включително видове, открити с погълната пластмаса и такива без нея, а червената линия изобразява само видовете които са погълнали пластмаса. Липсата на асимптота при червената линия показва високата вероятност през следващите години да продължат да се откриват допълнителни видове, които поглъщат пластмаса. Източник: 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>

Коралите под удар: микрозаплаха от глобален мащаб

Пластмасовото замърсяване създава нарастваща опасност за кораловите рифове, прониквайки в техните хранителни вериги и засилвайки разпространението на болести и разрушаването на структурата на рифовите общности. Анализът установи наличие на антропогенни отпадъци в 77 от 84 изследвани рифа, включително изолирани атоли в централната част на Тихия океан¹¹². При пет от шестте изследвани вида са регистрирани негативни последици за здравето¹¹³, такива като избледняване и некроза на тъканите¹¹⁴ (фиг. 31).

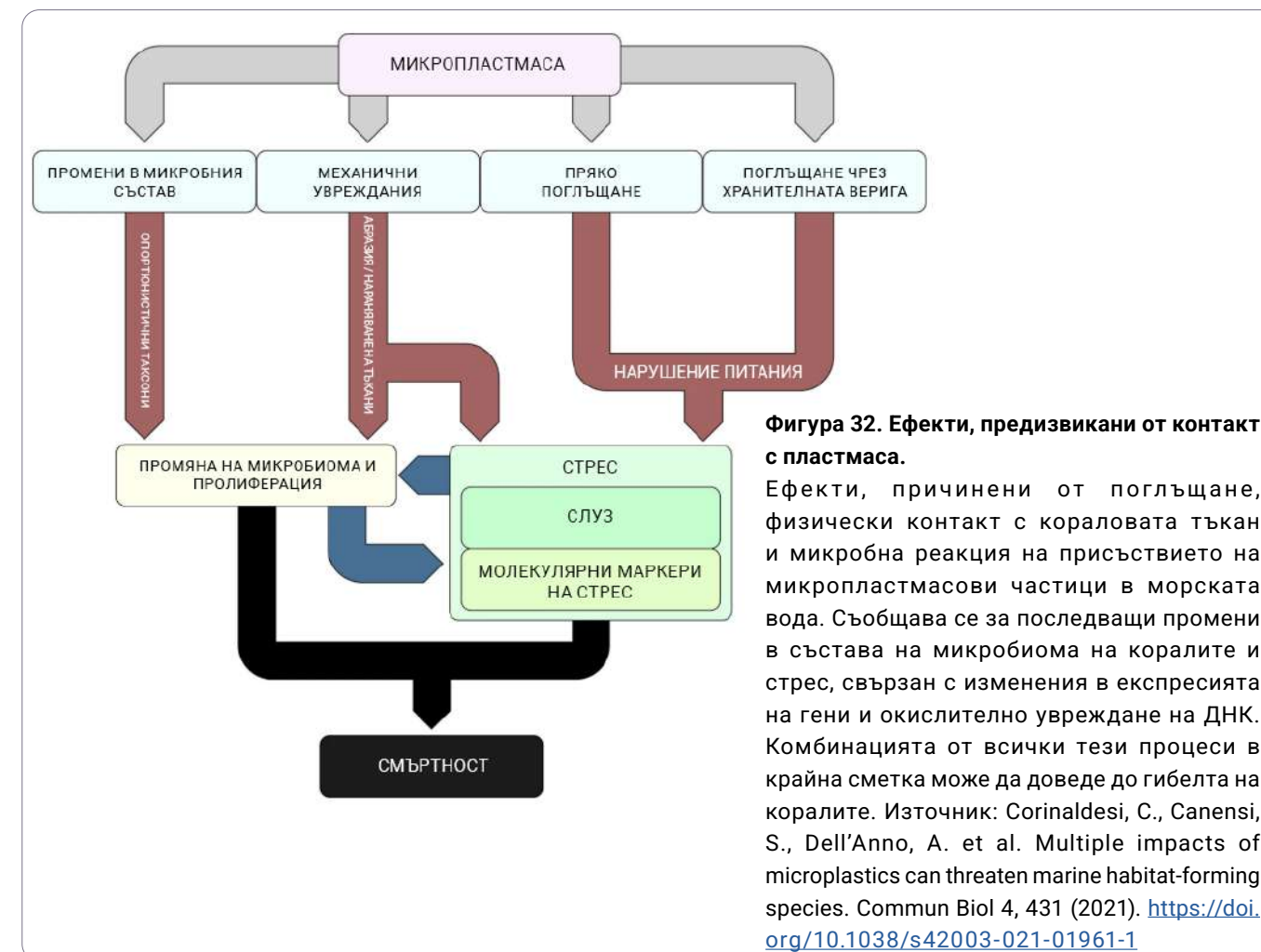
По-големите пластмасови фрагменти способстват за предаването на заболявания и физически увреждания, увеличавайки уязвимостта на коралите към патогени¹¹⁵. Тези ефекти засягат скелетния микробиом, който играе ключова роля в поддържането на здравето на кораловите колонии¹¹⁶ (фиг. 32). Изследванията също така откриват, че биофилмите върху микропластмасата, известни като „пластисфери“¹¹⁴, могат да предизвикват дисбиоза на микробиома на коралите¹¹⁷. При контакт с пластмаса рискът от заболявания при коралите нараства от 4 до 89 % (фиг. 33). Гибелта на кораловите рифове оказва съществено влияние върху намаляването на биологичното разнообразие, тъй като те осигуряват среда за обитаване на една четвърт от морските видове¹¹⁵.



Фигура 31. Въздействие на пластмасата върху състоянието на кораловите рифове. Коралите могат да реагират на пластмасови частици чрез различни механизми за почистване (например реснично действие, производство на слуз или разширяване на тъканите), задържане на частиците чрез разрастване или отделяне на погълнатите по погрешка частици.

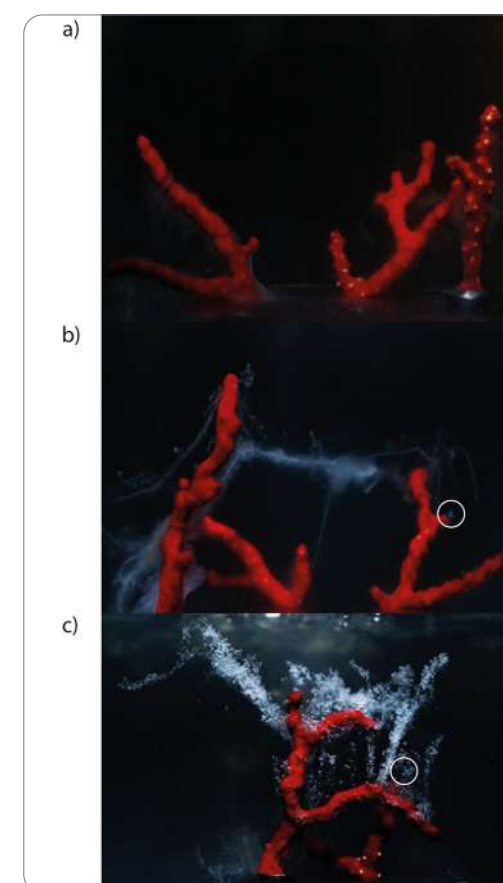
Източник: Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution* 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>

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>



Фигура 32. Ефекти, предизвикани от контакт с пластмаса.

Ефекти, причинени от поглъщане, физически контакт с кораловата тъкан и микробна реакция на присъствието на микропластмасови частици в морската вода. Съобщава се за последващи промени в състава на микробиома на коралите и стрес, свързан с изменения в експресията на гени и окислително увреждане на ДНК. Комбинацията от всички тези процеси в крайна сметка може да доведе до гибелта на коралите. Източник: 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>



Фигура 33. Отделянето на слуз се увеличава с нарастването на концентрацията на микропластмасови частици.

а — ниска, б — средна и с — висока концентрация на микропластмасови частици. Отделянето на слуз се увеличава с нарастването на концентрацията на микропластмасови частици. Белите кръгове обозначават микропластмасови частици, уловени в слузта (частици полиетилен).

Източник: 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>

Влияние на МНП върху кислородния баланс на екосистемите

Наблюденията показват, че пластмасата в околната среда се разгражда предимно под въздействието на слънчевата радиация. Този процес променя нейния химичен състав и структура. Изследванията потвърждават, че реакциите, предизвикани от слънчевата светлина, усилват измиването на разтворени органични съединения, което влияе върху биогеохимията на морската вода и стимулира растежа на хетеротрофни бактерии¹¹⁸ (фиг. 34).

Заплахите от микропластмасата в морската



Фигура 34. Заплахи, създавани от морската микропластмаса.

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

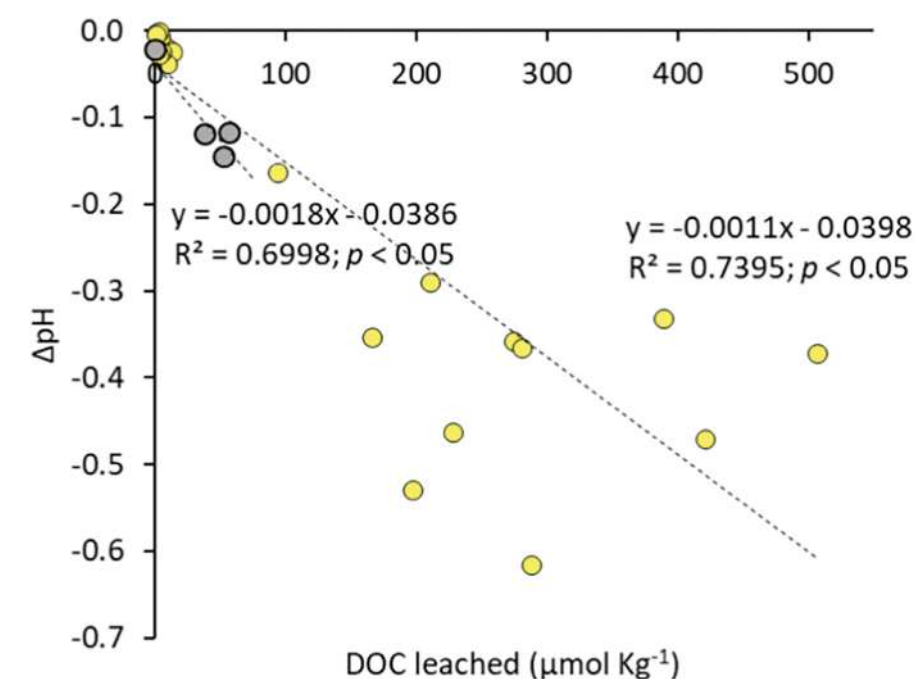
Многогодишни изследвания показват, че химичните съединения, отделяни от пластмасата в морската вода при нейното разлагане, произхождат или от самия материал, или от добавките, използвани за придаване на цвят или устойчивост на полимера. Някои от тези съединения представляват органични киселини, което обяснява тяхната роля в понижаването на pH. По този начин пластмасата усилва окисляването на океана (фиг. 35), а това от своя страна може съществено да наруши функционирането на природните системи на Земята¹¹⁹.

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>

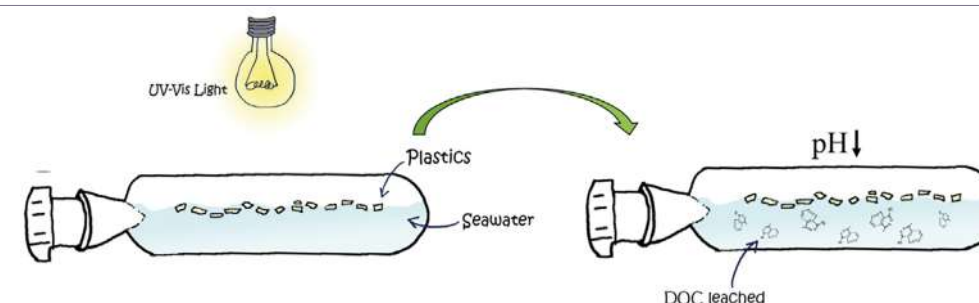


Фигура 35. Взаимовръзки между промяната в pH и DOC, извлечен от пластмасата, са нанесени на графика за всяка отделна повторна проба от всички експерименти. Също така са включени контролни проби без пластмаса за всеки експеримент. Жълтите точки съответстват на облъчени обработки, а сивите точки — на тъмни обработки.

Източник: 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>

66

„Благодарение на това изследване успяхме да докажем, че в силно замърсени с пластмаса райони на океанската повърхност разграждането на пластмасата ще доведе до понижаване на нивото на pH с до 0,5 единици, което е съпоставимо със спада в pH, очакван при най-лошите сценарии на антропогенни емисии до края на XXI век“, отбелязва Кристина Ромера-Кастийо, научен сътрудник в Института по морски науки (ICM-CSIC) (фиг. 36).¹²⁰



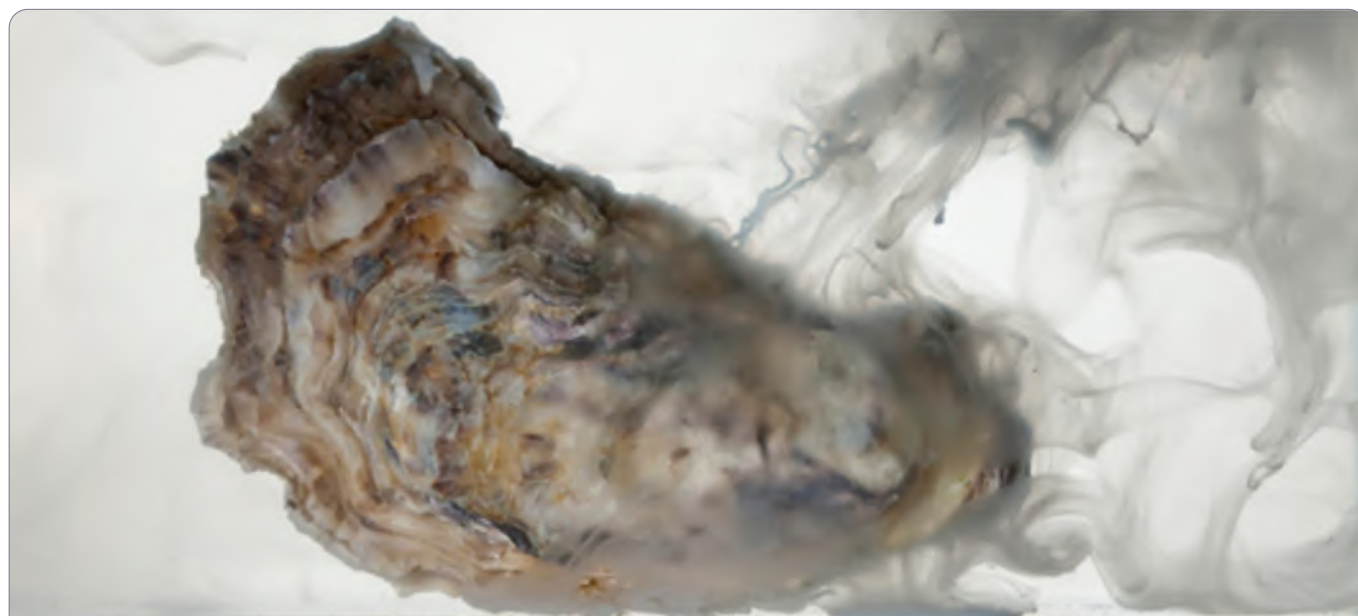
Фигура 36. Измиването на пластмаса може да доведе до понижение на pH на морската вода с до 0,5 единици. Източник: Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

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> (Accessed May 1, 2025)

Океанското окисляване е нарушение на условията на морската среда — устойчив и нарастващ екологичен натиск¹²¹. Последниците за екосистемите се проявяват в продължение на десетилетия, столетия и по-дълго. Наблюденията потвърждават намаляване на биологичното разнообразие в крайбрежните системи поради понижаването на рН^{122, 123}. Това намалява устойчивостта на екосистемите, застрашава техните функции, включително местообитанията, кръговрата на хранителни вещества и съхранението на въглерод¹²³.

Изследванията показват, че при окисляване на океана мидите (*Mytilus edulis*) растат по-бавно и имат по-ниска преживяемост (фиг. 37). Това намалява тяхната численост, което понижава способността им да филтрират водата и да поддържат качеството на крайбрежната среда¹²⁴.

Съвременните нива на рН на повърхността на океана са безпрецедентни поне за последните 26 000 години¹²⁵. Този процес оказва значително въздействие върху кораловите рифове, дълбоководните и високоширотните екосистеми, които зависят от уникални видове. Тези видове изпълняват незаменими роли и тяхното изчезване нарушава ключови функции на екосистемите, тъй като не съществуват аналози, способни да ги заменят¹²⁶.



Фигура 37. Тихоокеанска стрида изпуска мътен сперматозоиден разтвор в стридена ферма „Whiskey Creek“ в Орегон. В някои крайбрежни води окисляването вече е достигнало сериозно ниво; тук то е намалило производството наполовина, забавяйки растежа на ларвите на стридите.

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

¹²¹Scott 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>

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> (Accessed May 1, 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>

Стридите и мидите значително намаляват по численост по градиенти на спадаща карбонатна наситеност. Окисляването на океана може да доведе до намаляване на числеността на стридите и на екосистемните услуги, които те предоставят в дивата природа; то също така може да влоши качеството им като морска храна. Изследванията потвърждават значително негативно въздействие на микропластмасата върху биологичните параметри на микроводораслите, включително растежа¹²⁷, съдържанието на хлорофил, активността на фотосинтезата и нивото на активните форми на кислорода^{128, 129}.

Според изследване, въздействието на микропластмасата води до глобално намаляване на фотосинтезата с 7,05–12,12 % при морски и сладководни водорасли¹³⁰. Известно е, че фотосинтезата е основният процес на Земята, който произвежда молекулярен кислород (O₂), който се отделя в атмосферата.

Освен това микропластмасата в морските отлагания променя микробните съобщества и нарушава кръговрата на азота, потенциално засилвайки предизвикани от човека проблеми такива като токсичното цъфтене на водорасли. Промените в съобществата на планктона по повърхността на океана могат да задълбочат деоксигенацията (намаляване на количеството кислород във водата), лишавайки морските организми от кислород¹³¹.

Данните свидетелстват, че в периода от 1960 до 2010 година океанът е загубил 2 % от разтворения кислород поради повишаването на температурата на водата и натрупването на замърсители, включително промишлени, битови и селскостопански отпадъчни води¹³². Намаляването на кислорода води до образуване на мъртви зони — участъци от океана, в които морската флора и фауна практически са изчезнали. Наблюденията показват, че през 60-те години на XX век в Световния океан е имало 45 мъртви зони, докато към 2011 година техният брой се е увеличил приблизително до 700¹³³. Според данни, публикувани на уебсайта на UNDP, броят на мъртвите зони се удвоява на всеки десет години от 60-те години насам. Въз основа на тази тенденция може с висока степен на увереност да се предполага, че до 2025 година техният брой може да достигне 1500¹³⁴.

Замърсяването с пластмаса влияе на множество процеси в земната система. Според изследвания, то може да засили такива остри екологични проблеми като загубата на биологично разнообразие и изменението на климата¹³⁵.

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.jhazadv.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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 2025)

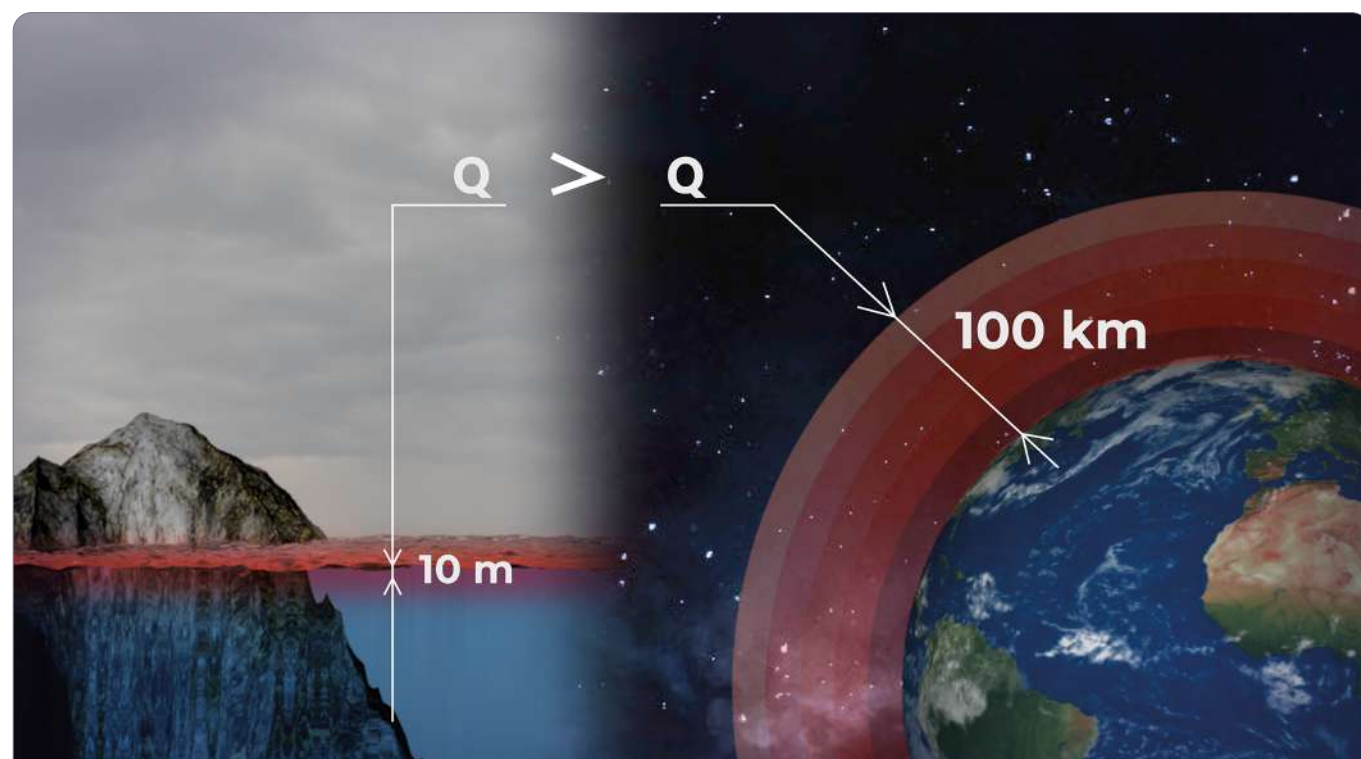
¹³⁴United Nations Development Programme. Ocean hypoxia: Dead zones. <https://www.undp.org/publications/issue-brief-ocean-hypoxia-dead-zones> (Accessed May 1, 2025)

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>

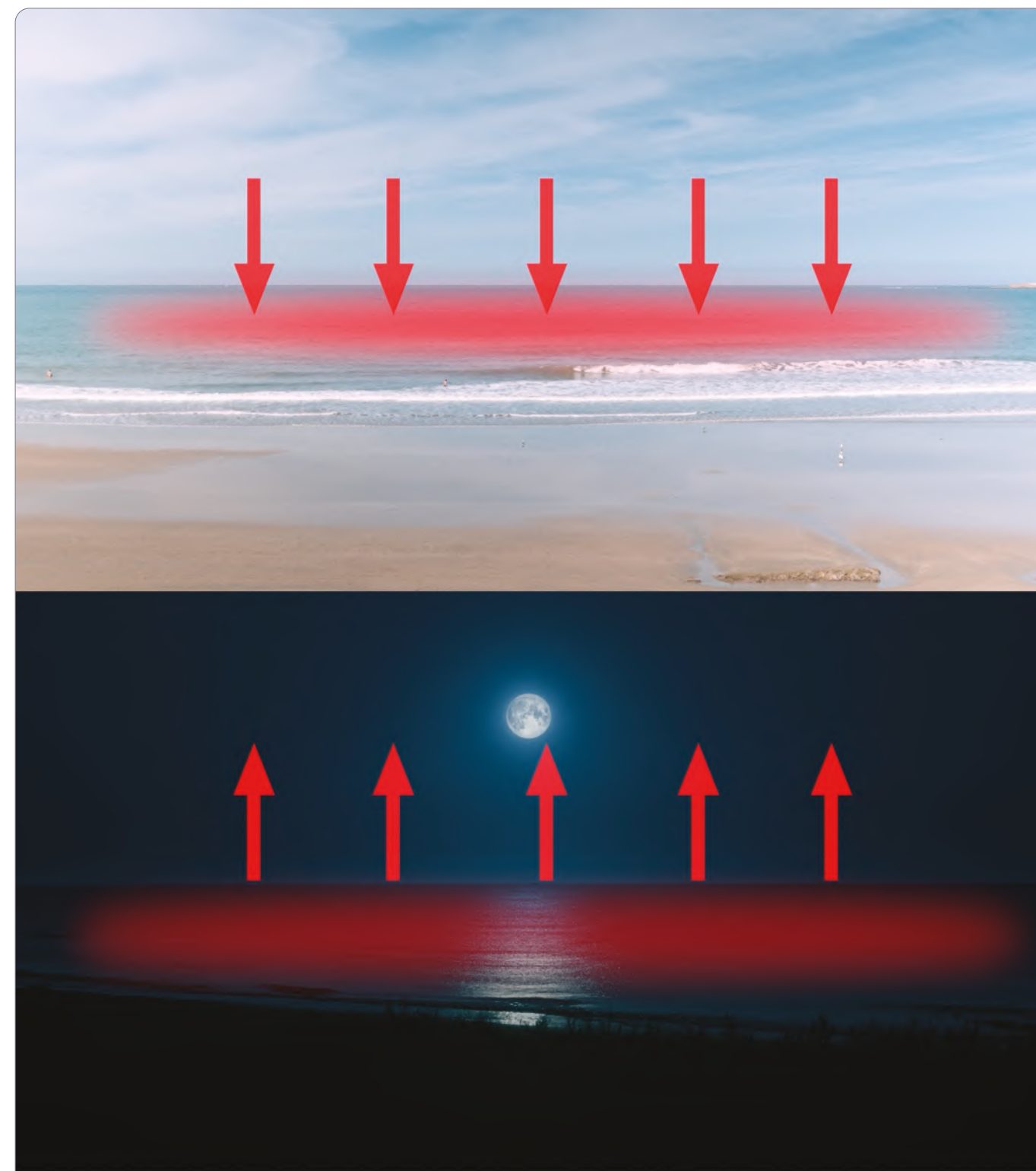
ВЛИЯНИЕ НА МИКРОПЛАСТМАСАТА (МНП) ВЪРХУ КЛИМАТА

Функции на океана

Океанът играе ключова роля в поддържането на климатичното равновесие на планетата, функционирайки като естествен „климатик“. Уникалната му способност да акумулира и постепенно освобождава топлина позволява да се смекчават температурните колебания на планетата. Само десетметров слой океанска вода е способен да поглъща повече топлина от цялата атмосфера на Земята (фиг. 38). Това намалява температурните амплитуди както през деня и нощта (фиг. 39), така и през сезоните — лято и зима.



Фигура 38. Схематично изображение на сравнителната топлемост на океана и атмосферата: въпреки по-малката маса на въздуха, океанът е способен да натрупва и задържа десетки пъти повече топлина, играейки ключова роля в регулирането на климата на Земята



Фигура 39. Схематично представяне на денонощния топлообмен: океанът поглъща топлина през деня и я отдава през нощта, изглаждайки температурните колебания на въздуха

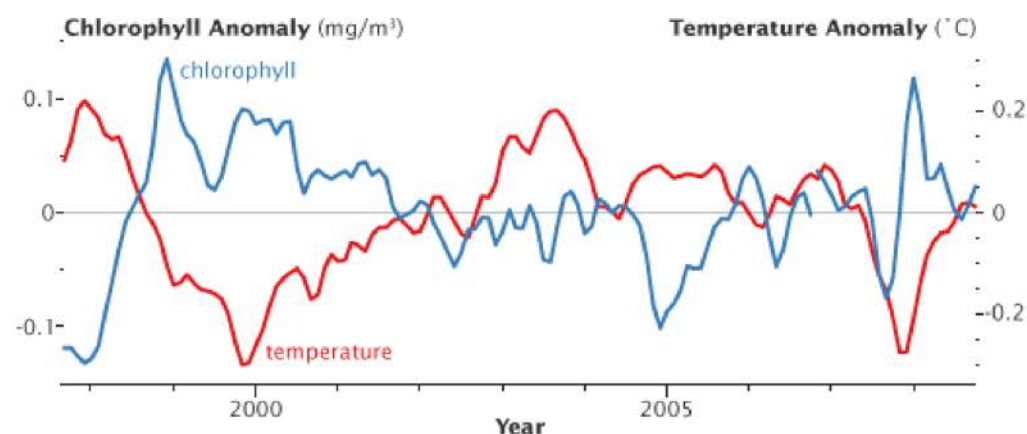
Океанските течения пренасят топла вода от тропиците към по-студени региони, например към северните ширини. Това помага за смекчаване на климата в крайбрежните зони. Студените течения, обратно, връщат охладената вода обратно към екватора. По този начин океанът регулира климата на планетата. Океанът оказва значително влияние върху атмосферните процеси, играейки ключова роля във формирането на облаци и валежи. Всеки ден от неговата повърхност се изпарява огромно количество вода, която впоследствие се кондензира в облаци и се връща на Земята под формата на дъжд или сняг. Този процес е важен за попълването на водните ресурси на реките, езерата и почвата с прясна вода.

Микроскопичните водорасли в океана, такива като фитопланктона (фиг. 40), произвеждат над 50 % от кислорода¹³⁶. Много модели на океанската химия и биология прогнозираят, че с повишаването на температурата на океанската повърхност в отговор на увеличаването на парниковите газове в атмосферата, продуктивността на фитопланктона ще намалява^{137, 138} (фиг. 41).



Фигура 40. Фитопланктонът е изключително разнообразен: от фотосинтезиращи бактерии (цианобактерии) до диатомови водорасли, наподобяващи растения, и бронирани коколитофориди (илюстрациите не са в мащаб). (Колажът е адаптиран от рисунки и микрофотографии на Сали Бенсусен, Научно бюро на проекта NASA EOS.)

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



Фигура 41. Около 70 % от океана е постоянно стратифициран на слоеве, които слабо се смесват. За периода от края на 1997 година до средата на 2008 година сателитни наблюдения показват, че по-високи от средните температури (червена линия) водят до по-ниска от средната концентрация на хлорофил (синя линия) в тези области. (Графиката е адаптирана от Behrenfeld et al. 2009, Робърт Симън). Източник: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton>

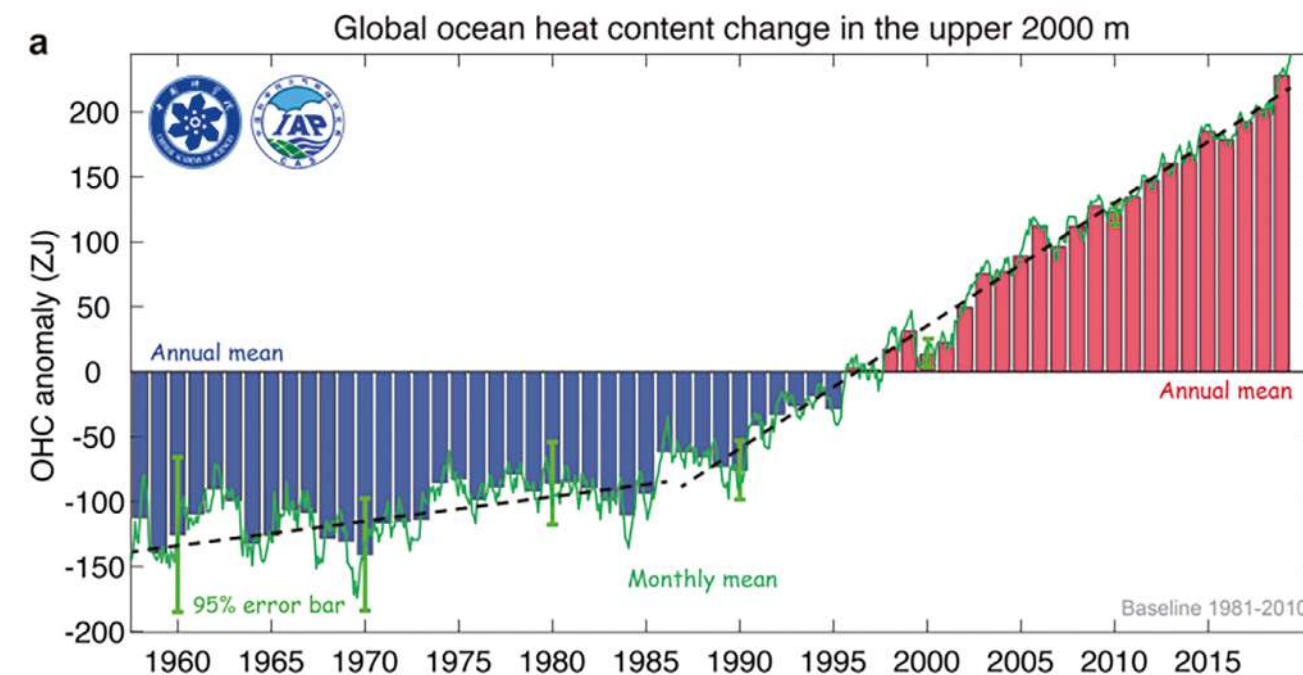
¹³⁶NOAA. How much oxygen comes from the ocean? <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-oxygen.html> (Accessed May 1, 2025)

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>

Промяна в температурния режим на океана

Докладът за състоянието на Световния океан за 2024 година демонстрира тревожна картина — безпрецедентно затопляне на океана. Изследванията показват, че в периода от 1960 до 1986 година се наблюдава устойчиво покачване на температурата на океаните. Въпреки това, през последните няколко десетилетия този процес се ускори двойно¹³⁹ (фиг. 42).



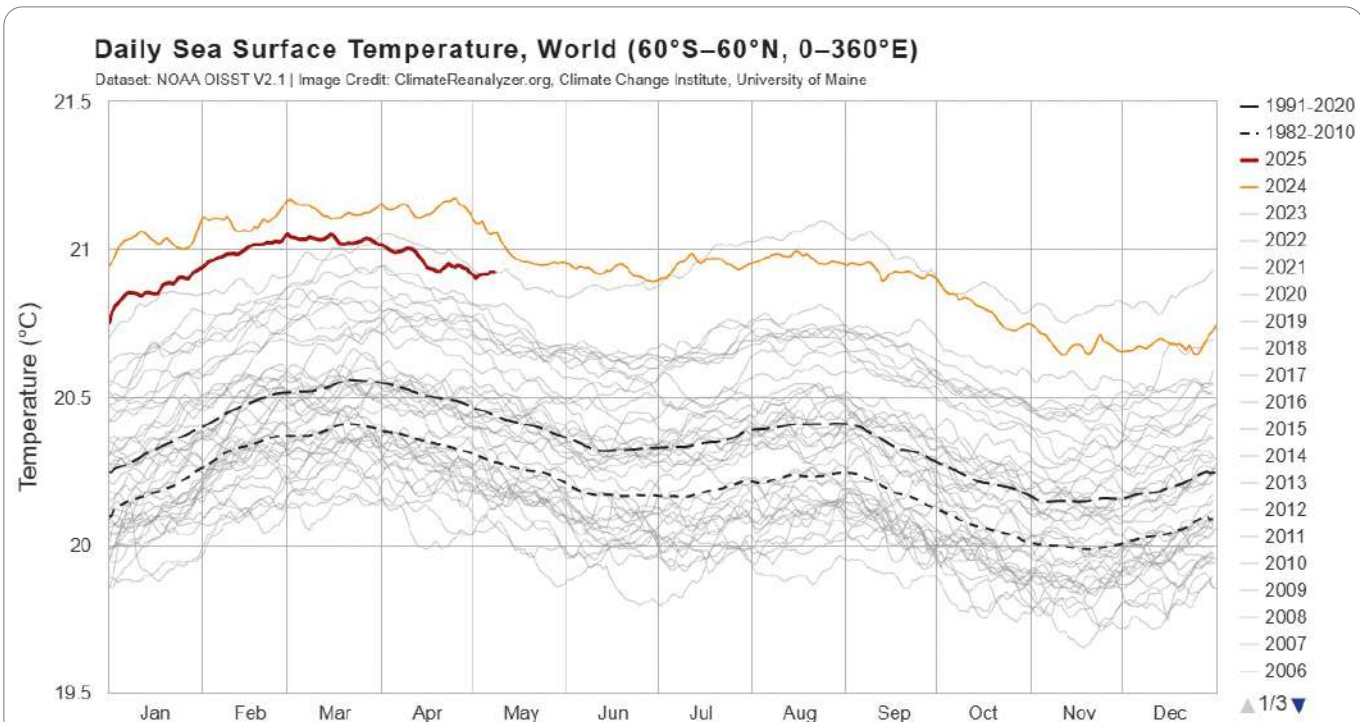
Фигура 42. Промяна на топлинното съдържание в горните 2 000 метра на Световния океан
Източник: Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J., Trenberth, K. E., Fasullo, J., Boyer, T., Locarnini, R., Zhang, B., Yu, F., Wan, L., Chen, X., Song, X., Liu, Y., & Mann, M. E. (2020). Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37(2), 137–142. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

2023 година беше най-топлата година в цялата история на наблюденията, надминавайки предишния рекорд, поставен през 2016 година. Беше регистриран и абсолютен рекорд на температурата на повърхността на океана¹⁴⁰. Тази тенденция продължи — 2024 година надмина рекордите на 2023 година (фиг. 43) и стана най-топлата за целия период на наблюдения¹⁴¹. През този период температурата на повърхността на океана остана рекордно висока в продължение на 15 поредни месеца, което подчертава устойчивостта на наблюдаваното затопляне.

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> (Accessed May 1, 2025)

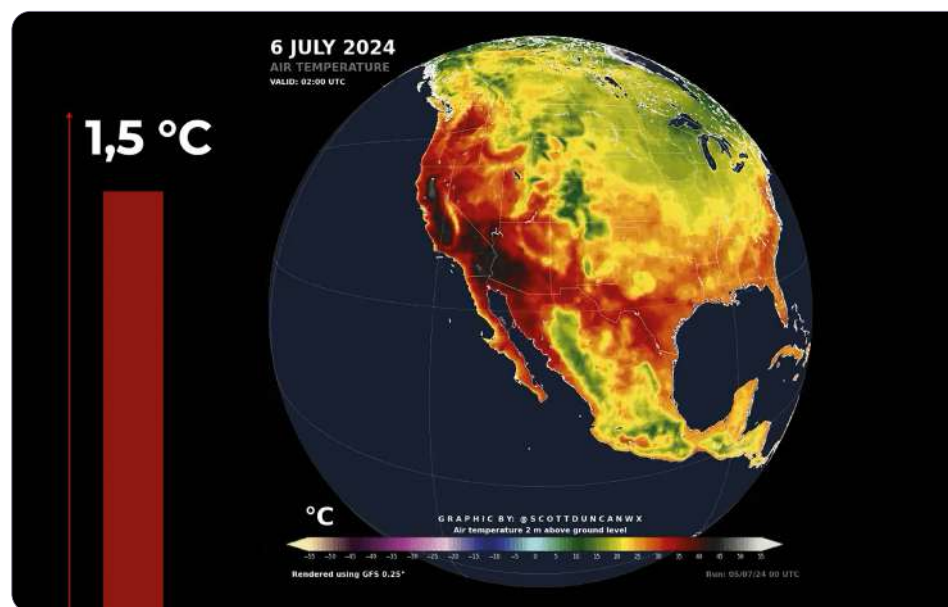
¹⁴¹World Meteorological Organization (WMO) confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level.



Фигура 43. Ежедневните стойности на температурата на морската повърхност: графично представяне на промените в температурата на горния слой на океана, отразяващо сезонните колебания през годините.

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

За първи път в историята средногодишната температура превиши с 1,5 °C нивото от доиндустриалния период¹⁴² (фиг. 44). Според експертите този показател е критична граница, след която човечеството го очакват мащабни климатични сътресения¹⁴³.

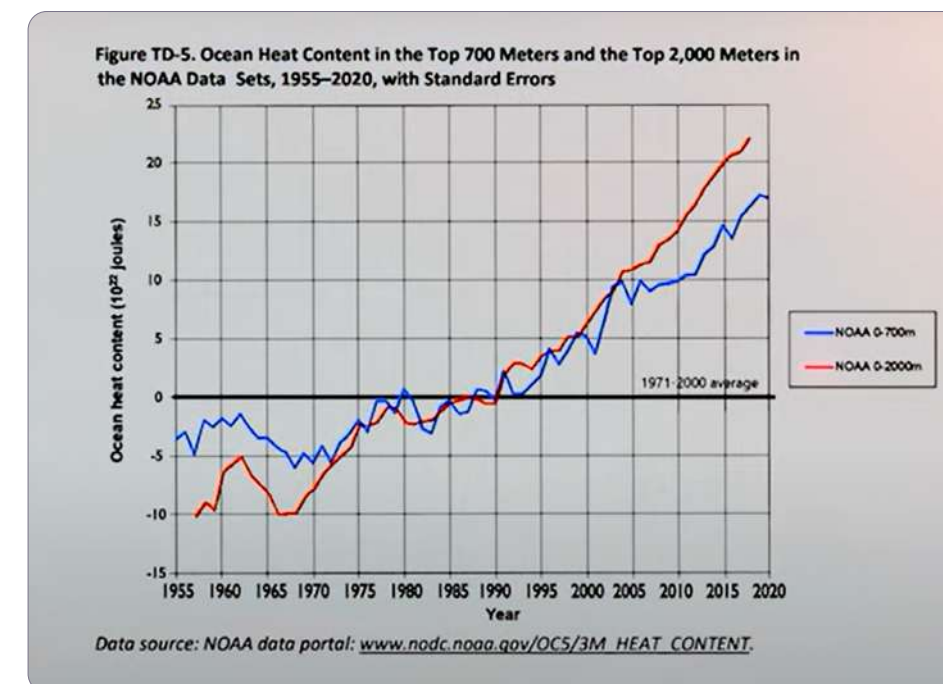


Фигура 44. Схематично изображение на климатичната граница: през 2024 година средногодишната глобална температура за първи път превиши прага от 1,5 °C спрямо доиндустриалното ниво

¹⁴²World Meteorological Organization (WMO). State of the Global Climate 2024. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024> (Accessed May 1, 2025)

¹⁴³IPCC. Global Warming of 1.5°C. (Cambridge University Press, 2022). <https://doi.org/10.1017/9781009157940> (Accessed May 1, 2025)

Такова повишение на температурата се очакваше към средата на 21 век¹⁴⁴, но този праг вече е преминат. Според оценки на ООН, ако настоящите тенденции се запазят, глобалната температура може да се повиши с почти 3 °C през този век¹⁴⁴.



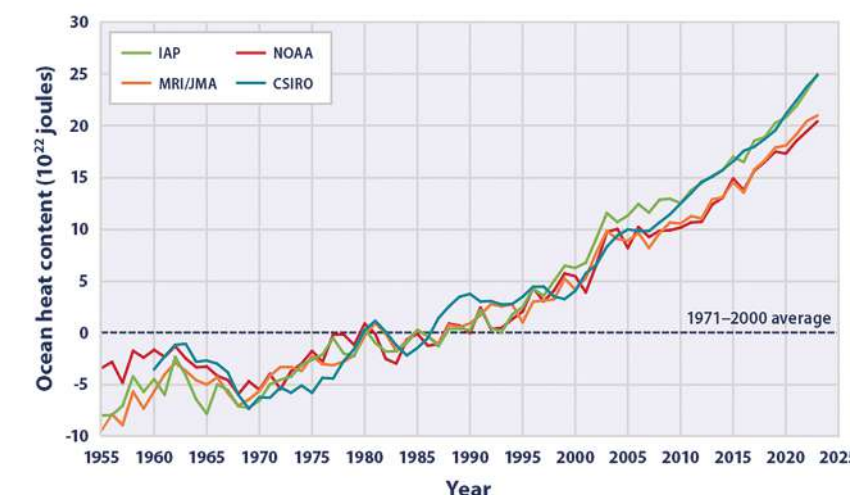
Фигура 45. Топлинно съдържание на океана в горните 700 метра и горните 2000 метра. Стандартни набори от данни на NOAA, 1955–2020 година.

Източник: портал за данни на NOAA www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT

Фигура 46.

Тази диаграма показва промените в топлинното съдържание на горните 700 метра на Световния океан от 1955 до 2023 година. Топлинното съдържание на океана се измерва в джаули – единица за енергия, и се сравнява със средната стойност за периода 1971–2000 година, която е установена като нулева за ориентир. Изборът на друг базов период няма да промени формата на данните във времето. Линиите са изчислени независимо с помощта на различни методи от държавни организации в четири страни: Националната океанска и атмосферна администрация на САЩ (NOAA), Организацията за научни и промишлени изследвания на Британската общност (CSIRO, Австралия), Институтът по атмосферна физика на Китай (IAP) и Метеорологичния изследователски институт на Японската метеорологична агенция (MRI/JMA).

Източник: CSIRO, 2024; IAP, 2024; MRI/JMA, 2024; NOAA, 2024

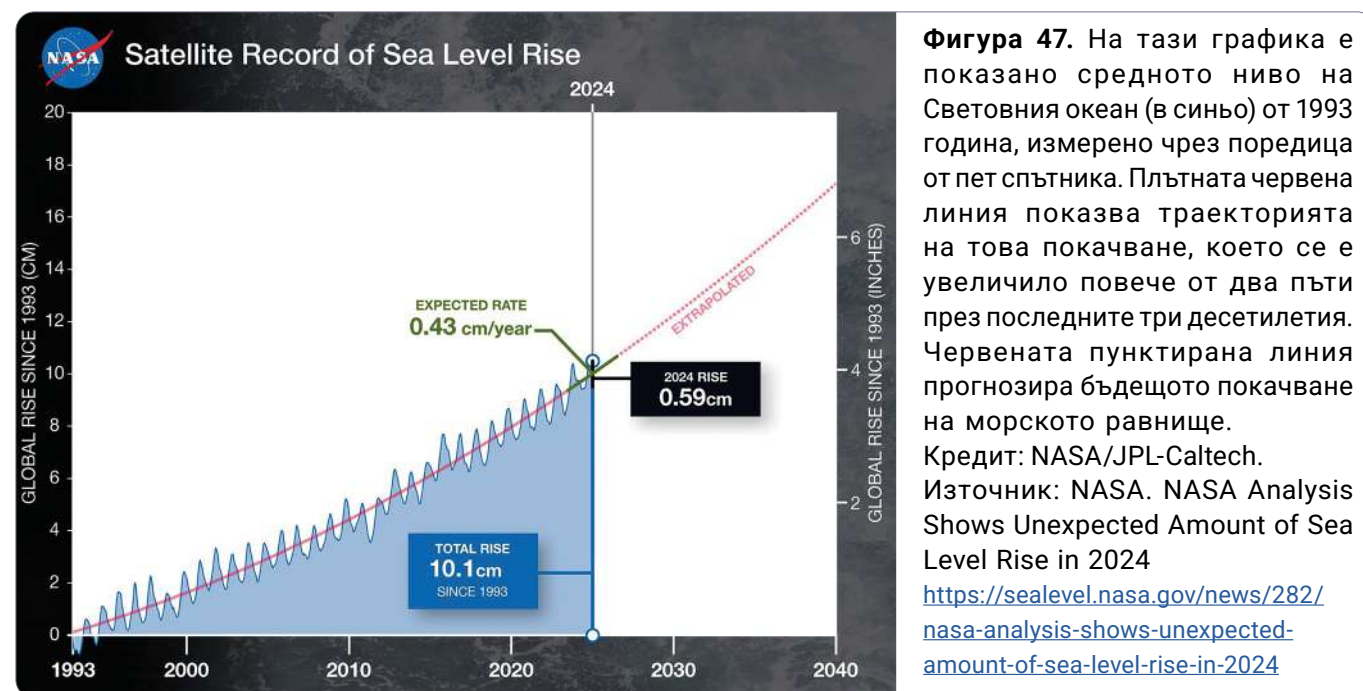


¹⁴⁴The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

През последните 60 години океаните на средна дълбочина са се затоплили 15 пъти по-бързо, отколкото през предходните 10 000 години¹⁴⁵ (фиг. 45–46). Това свидетелства, че процесите на глобалното затопляне засягат не само повърхностните слоеве на водата, но и по-дълбоките части на океана, където слънчевата светлина не прониква. За да се затопли водата на такава дълбочина, е необходима огромна енергия, което подчертава мащаба на проблема. Според оценките на учените, за да се затопля океанът със сегашната скорост, е необходимо отделяне на енергия, еквивалентна на експлозията на 7 атомни бомби всяка секунда в продължение на една година¹⁴⁶ — това са колосални цифри, които пораждаат въпроса: откъде идва тази енергия?

Повишаването на температурата на водата неизбежно води до покачване на нивото на Световния океан, което застрашава да погълне цели крайбрежия. През последните два века нивото на океана се е повишило с 21 см, а през последните 30 години¹⁴⁷ — с 10,1 см. Настоящият темп на покачване е 2,5 пъти по-бърз от предишния, и тази тенденция ще продължи. Ако ситуацията не се промени, милиони хора ще станат бежанци, принудени да напускат домовете си и да търсят убежище далеч от бреговете.

„Повишението, което видяхме през 2024 година, се оказа по-голямо, отколкото очаквахме — каза Джош Уилис, изследовател на морското равнище в Лабораторията за реактивно движение на НАСА в Южна Калифорния. **— Всяка година е малко по-различна, но е ясно, че океанът продължава да се покачва и скоростта на покачване става все по-голяма и по-голяма“**¹⁴⁸ (фиг. 47).



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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 2025)

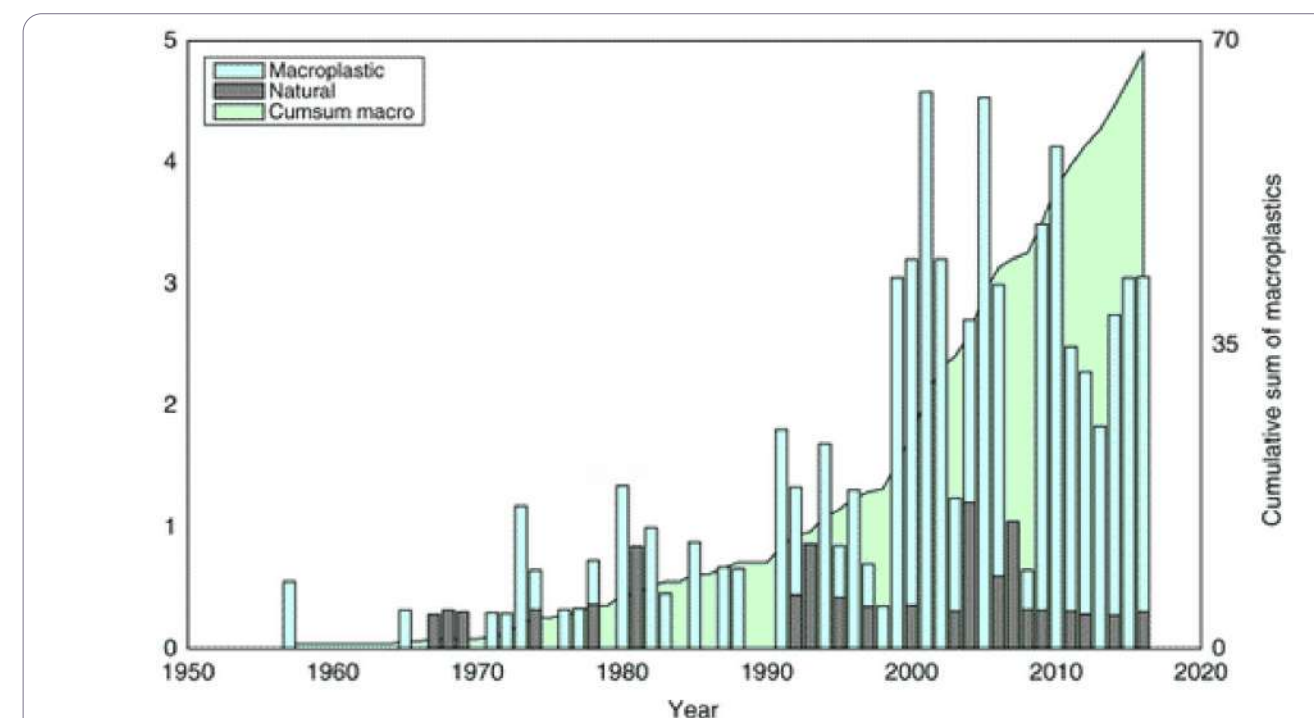
Затоплянето на океана също така допринася за по-чести и интензивни екстремни метеорологични явления, такива като наводнения, тайфуни и аномални валежи. Тези промени застрашават екосистемите на планетата и живота на милиарди хора и с всяка изминала година те стават все по-осезаеми.

Защо се затопля океанът? Хипотеза

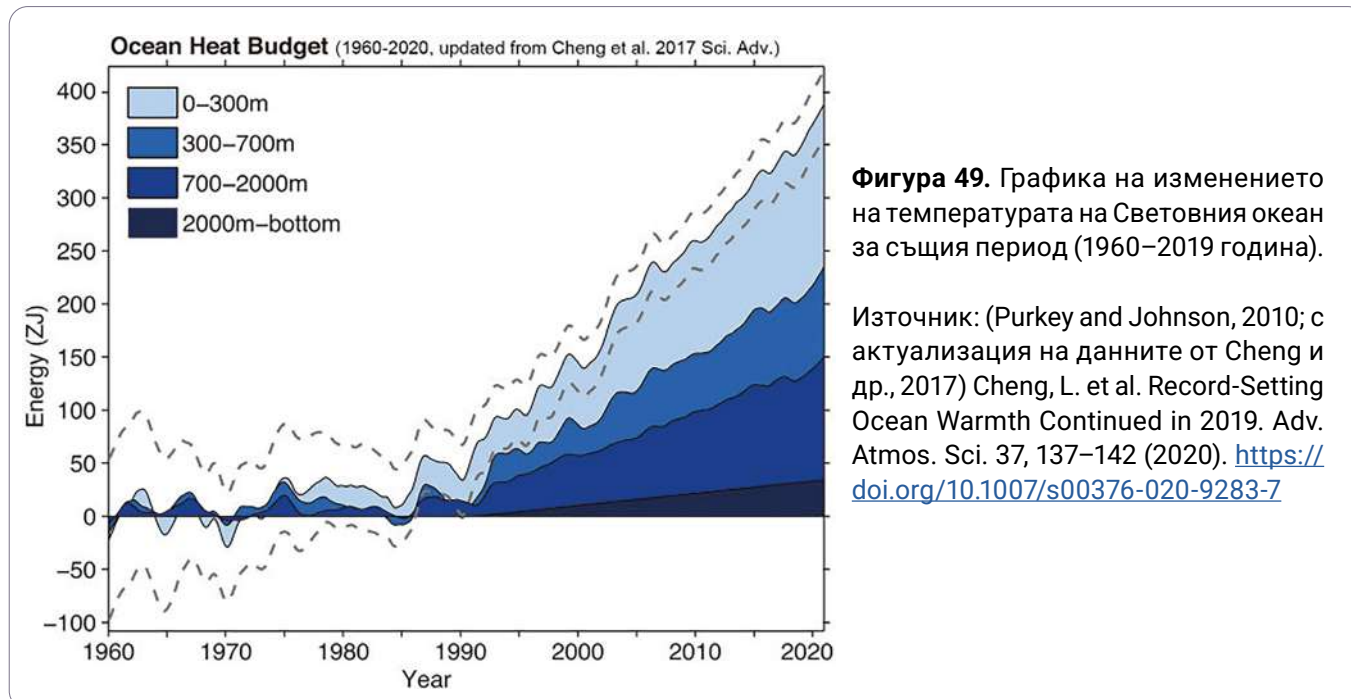
Основните общоприети фактори, които влияят на затоплянето на океана, са парниковите газове като CO₂, които задържат топлината в атмосферата и повишават температурата на повърхностните слоеве на океанските води. Въпреки това съществуват и други фактори, които също могат да оказват значително въздействие върху този процес. Допълнителен фактор за затоплянето на океана също така ще бъде разгледан в глава „Фактор X. Въздействие на микро- и нанопластмаса върху динамиката на цикъла на природните катаклизми“.

От втората половина на XX век се наблюдава рязък ръст в количеството пластмаса в океаните, което съвпада с периода на ускорено индустриално развитие и масово производство на пластмасови изделия (фиг. 48). От 1960 до 2019 година се наблюдава и изменение на температурата на океана. Графиката на (фиг. 49) показва паралелно нарастване на средната температура на повърхността на океаните, което също така се наблюдава от средата на XX век.

Съпоставяйки двете графики (фиг. 48–49), може да се забележи корелация между увеличаването на концентрацията на пластмаса в океаните и повишаването на температурата на водите. Това дава основание да се предположи, че замърсяването на океаните с пластмаса може да бъде един от значимите, но все още недостатъчно изследвани фактори, влияещи върху затоплянето на океанските води.



Фигура 48. Графика на нарастването на концентрацията на пластмаса в океаните през последните десетилетия. Общото количество макропластмаса в океана и годишните стойности. Източник: 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>



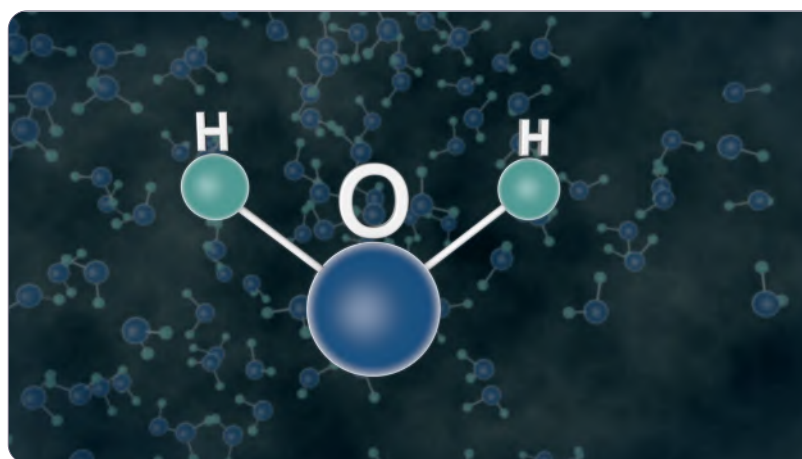
Фигура 49. Графика на изменението на температурата на Световния океан за същия период (1960–2019 година).

Източник: (Purkey and Johnson, 2010; с актуализация на данните от Cheng и др., 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>

За по-нататъшното изследване на този въпрос е важно да се разбере дали пластмасата е способна да влияе върху физичните свойства на океанската вода, като топлопроводимост и топлемост. И могат ли тези промени да способстват за повишаване на температурата на океана? За да разберем по-добре тези процеси, ще се задълбочим в основните характеристики на водата и нейното взаимодействие със замърсителите.

Основни характеристики на водата

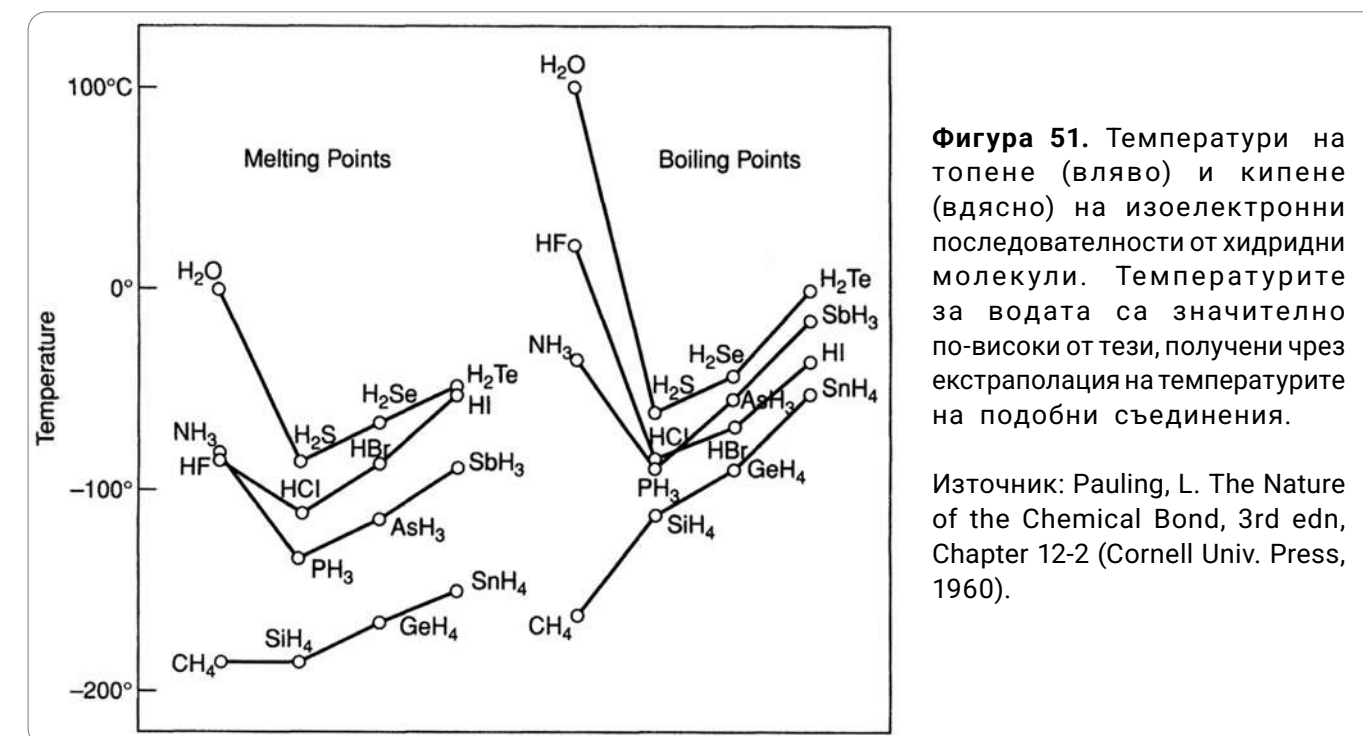
Молекулата на водата има симетрична V-образна форма, при която двата атома водород са разположени от едната страна спрямо по-големия атом кислород (фиг. 50).



Фигура 50.

Схематично изображение на водна молекула: двата водородни атома (H) са свързани с един кислороден атом (O) под ъгъл $\sim 104,5^\circ$, като формират дипол с положителен и отрицателен заряд

Тази структура се различава от линейните молекули, като например CO_2 , където всички атоми са подредени в линия. Такава форма прави водната молекула уникална и изключително важна за множество процеси на Земята. Особеностите на водните молекули позволяват на водата да остане в течно състояние при температури, при които други триатомни молекули обикновено преминават в газообразно състояние (фиг. 51).



Фигура 51. Температури на топене (вляво) и кипене (вдясно) на изоелектронни последователности от хидридни молекули. Температурите за водата са значително по-високи от тези, получени чрез екстраполация на температурите на подобни съединения.

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

Това се дължи на водородните връзки¹⁴⁹, които свързват водните молекули, образувайки здрава и подредена структура.

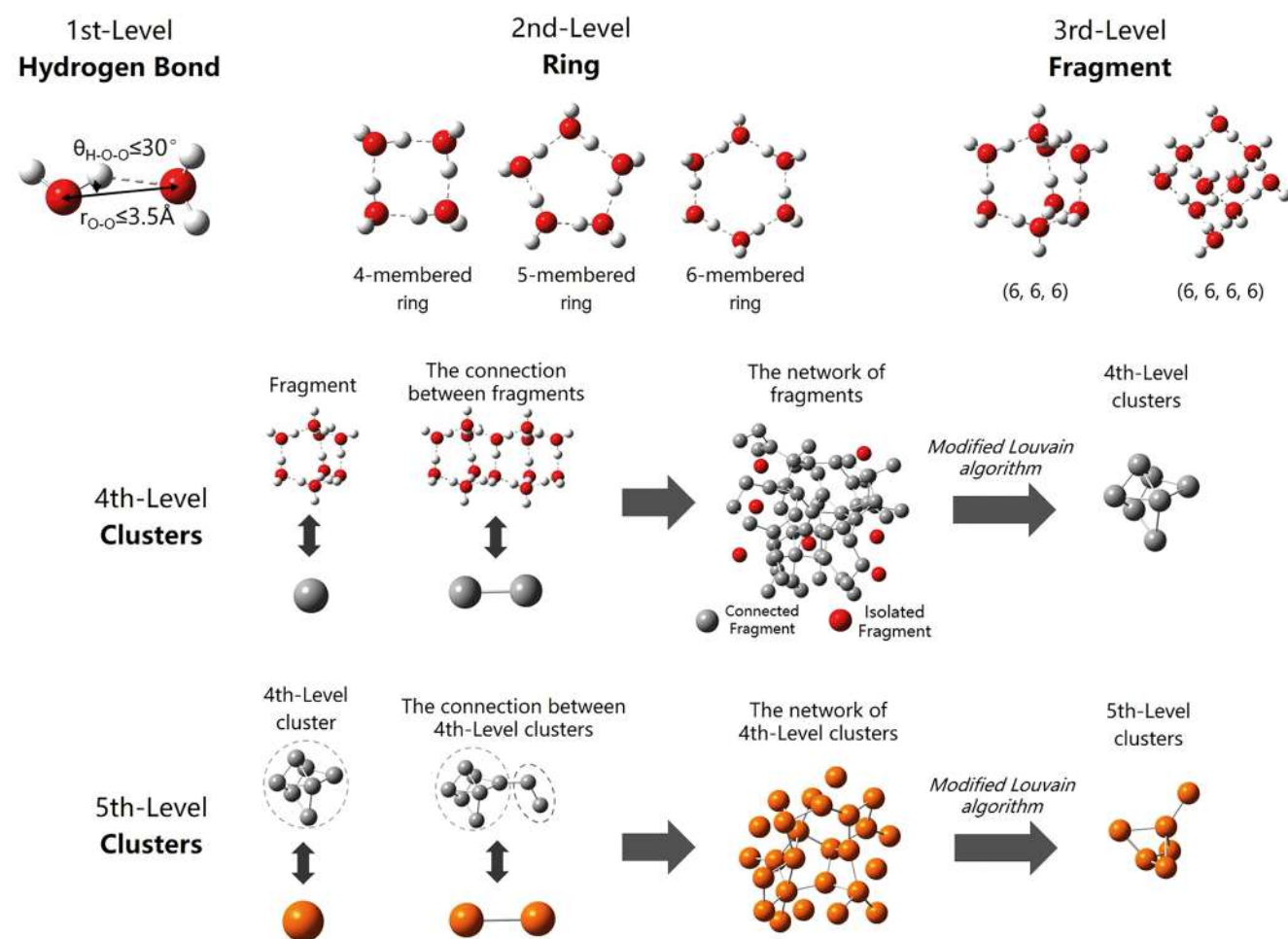
Повечето водородни връзки са слаби сили на привличане със сила на свързване около една десета от тази на обикновена ковалентна връзка. Въпреки това, те са от изключително значение. Без тях всички дървени конструкции биха се срутили, циментът би се разпаднал, океаните биха се изпарили, а цялата жива материя би се разпаднала на нежива¹⁵⁰.

Затова водата притежава способността да формира клъстери, което обяснява нейните аномални свойства (фиг. 52–53). Водните клъстери могат да обхващат над 95 % от мрежата от водородни връзки, като някои от тях съдържат хиляди молекули и се простират на повече от 3,0 nm¹⁵¹.

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

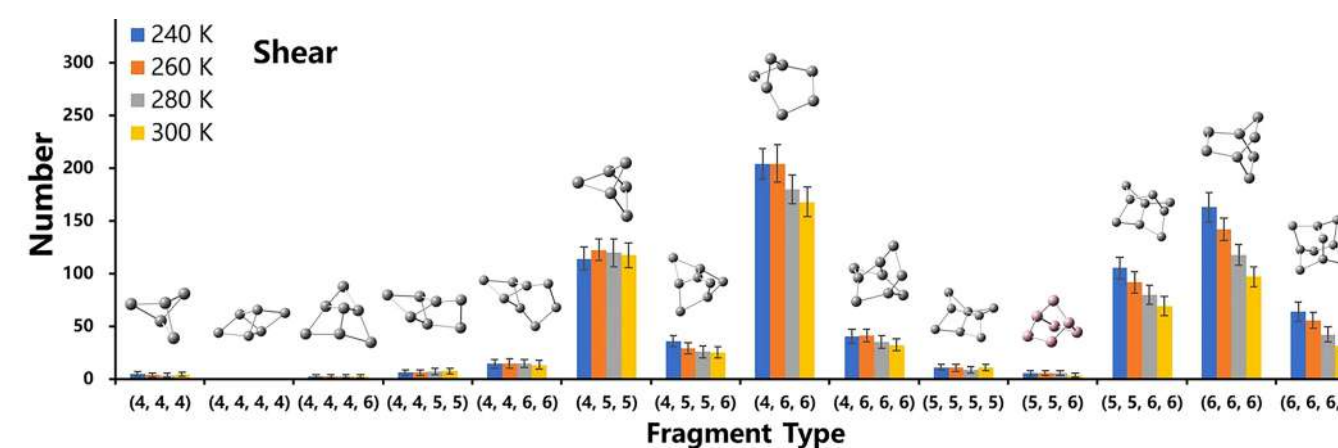
¹⁵⁰ Jeffrey, G. A. An Introduction to Hydrogen Bonding (Oxford University Press, New York, 1997). <https://books.google.com/books?vid=ISBN0195095499>

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>



Фигура 52. Схеми на метода за йерархична кластеризация. Водородните връзки, пръстените и фрагментите се разглеждат като структури от 1-во, 2-ро и 3-то ниво, които представляват сферично-пръчкови модели от химическа гледна точка, а червените и белите сфери обозначават атоми на кислород и водород съответно. Плътните и пунктираните пръчки обозначават ковалентни връзки O–H и водородни връзки съответно. Клъстерите от 4-то и 5-то ниво са илюстрирани от топологична гледна точка. Сферите представляват структурата на последните нива. Структурите на изображението са само пример за изходните резултати от използвания алгоритъм за кластеризация.

Източник: 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>



Фигура 53. Разпределение на йерархичните структури от 1-во, 2-ро и 3-то ниво в мрежата в различни случаи. (a) Разпределение на водородните връзки (структури от 1-во ниво) при различни температури. (b) Разпределение на пръстените (структури от 2-ро ниво) при различни температури. (c) Разпределение на фрагментите (структури от 3-то ниво) при различни температури. Обърнете внимание, че (4, 4, 4) обозначава символ на фрагмент, включващ три четиричленни пръстена.

Източник: 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>

Топлинна капацитетност, топлопроводимост и плътност на водата и тяхното функционално значение

1. Висока топлинна капацитетност на водата

Водата притежава най-висока уделна топлинна капацитетност сред течности и твърди вещества при нормални условия, отстъпвайки само на някои газове, като водорода¹⁵². Това означава, че тя е способна да поглъща, задържа и предава голямо количество топлинна енергия при относително малка промяна на собствената си температура.

Топлинната капацитетност на водата се определя от количеството топлина, необходимо за повишаване на температурата на 1 г вода с 1°C, и е около 4,18 Дж/(г°C) при стандартни условия. Това свойство е един от ключовите фактори за климатичната регулация: водата в океаните натрупва топлина през деня и бавно я отдава през нощта. През лятото океанът поглъща излишната топлина, а през зимата тя постепенно се освобождава, действайки като гигантски термостат и омекотявайки температурните колебания на планетата.

2. Теплопроводимост на водата

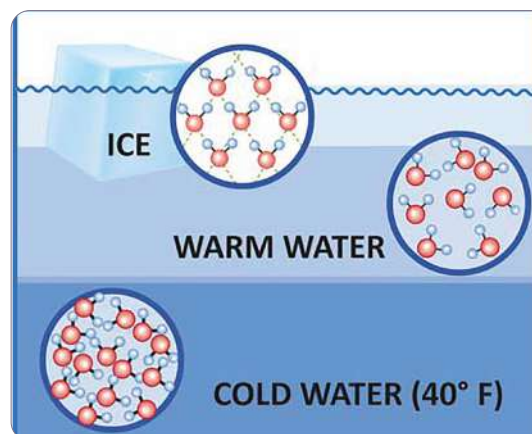
Водата притежава относително ниска топлопроводимост в сравнение с металите, но е по-висока от тази на много други течности. Теплопроводимостта отразява способността на веществото да пренася топлина от една негова част към друга без преместване на самата маса на веществото. Теплопроводимостта на водата е около 0,6 Вт/(м·К) при стандартни условия (25 °C), което я прави ефективен проводник на топлина в природните процеси, като разпределението на топлината в океаните и други водни тела.

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

Наблюденията показват, че топлопроводимостта на водата се увеличава с повишаването на температурата до определен предел¹⁵². Освен това тази стойност може да се променя при наличие на примеси или разтворени вещества^{153, 154}. Тези характеристики влияят върху разпределението на топлината във водата, което е от решаващо значение за разбирането на взаимодействията между океана и атмосферата.

3. Аномално поведение на плътността на водата

За разлика от повечето вещества, плътността на водата се държи необичайно при промяна на температурата. При охлаждане до 4 °C плътността ѝ се увеличава, но при по-нататъшно охлаждане (от 4 °C до 0 °C) плътността започва да намалява (фиг. 54). Когато водата замръзва, плътността ѝ намалява с 8–9 %. Това обяснява факта защо ледът не потъва, а остава на повърхността. Този феномен е критично важен за живота във водоемите, тъй като ледът защитава водата и живите организми от пълно замръзване, като не позволява на цялата вода да замръзне до дъното.



Фигура 54. Схематично изображение на промяната на плътността на водата при охлаждане: с понижаване на температурата молекулите на водата се доближават, увеличавайки плътността и достигайки максимум при 4°C. При по-нататъшно охлаждане водородните връзки започват да доминират, молекулите на водата се подреждат в кристална структура на леда, което води до разширяване на водата и намаляване на плътността на леда, който става приблизително с 10% по-малко плътен от течната вода. Източник: <https://askascientistblog.wordpress.com/2015/11/04/if-molecules-in-colder-things-get-denser-why-does-ice-float/>

Влияние на свойствата на водата върху климата и екосистемите

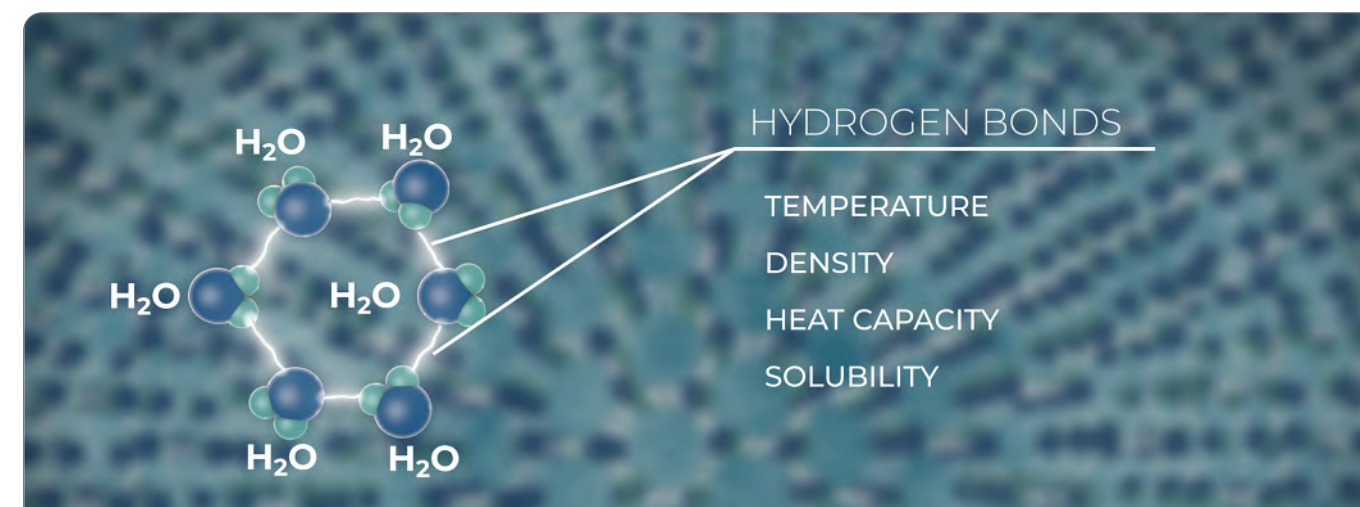
Промените в температурата на водата могат съществено да повлияят на топлинния баланс на Световния океан и неговата способност да акумулира и предава топлина. Това, от своя страна, ще се отрази на климатичната система на Земята.

По този начин физико-химичните свойства на водата, особено нейната топлоемкост и топлопроводимост, играят важна роля в поддържането на екологичното равновесие на планетата и регулирането на климатичните процеси (фиг. 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)



Фигура 55. Схематично изображение на водородните връзки в молекулите на водата и тяхното влияние върху ключовите свойства на водата: водородните връзки способстват за високата топлоемкост на водата, което ѝ позволява ефективно да поглъща и задържа топлина. Тези връзки също определят плътността на водата, която е максимална при 4°C, както и способността ѝ да разтваря полярни и йонни вещества, което прави водата универсален разтворител.

Ролята на МНП в промяната на физичните свойства на морската вода

Пластмасата, която е продукт на нефтената химическа индустрия, не се разгражда в природата, а се разпада на по-малки частици такива като микро- и нанопластмасови частици¹⁵⁵. Тези частици, особено нанопластмасата, могат да имат значително влияние върху физико-химичните свойства на водата, което от своя страна може да въздейства на екосистемите и климатичните процеси. Нанопластмасата представлява частици с размери в нанометри, което е по-малко от размера на вирус (фиг. 56).

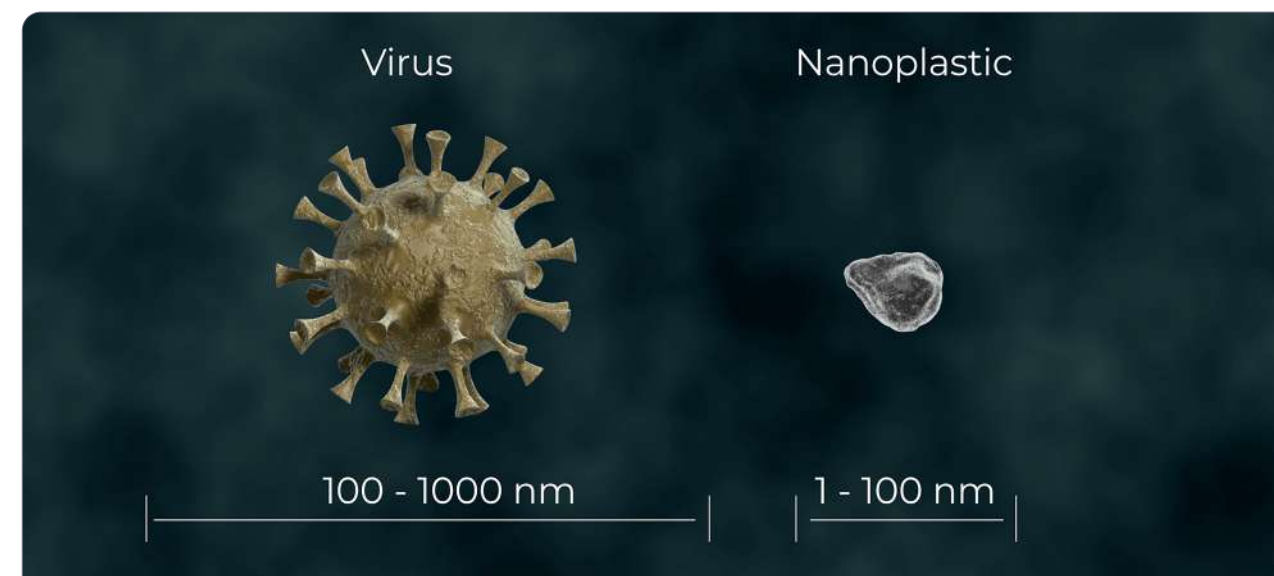
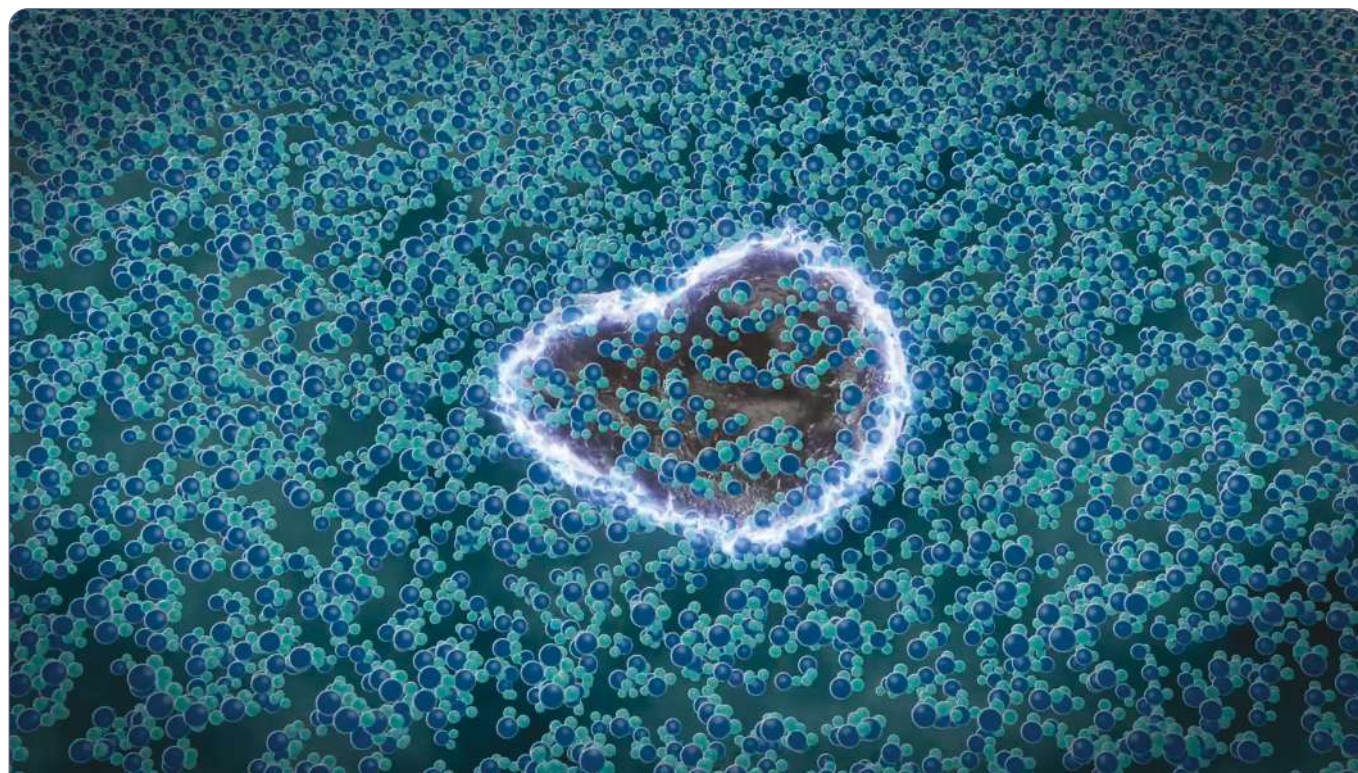


Рисунок 56. Схематическое сравнение размеров вируса и частицы нанопластика

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

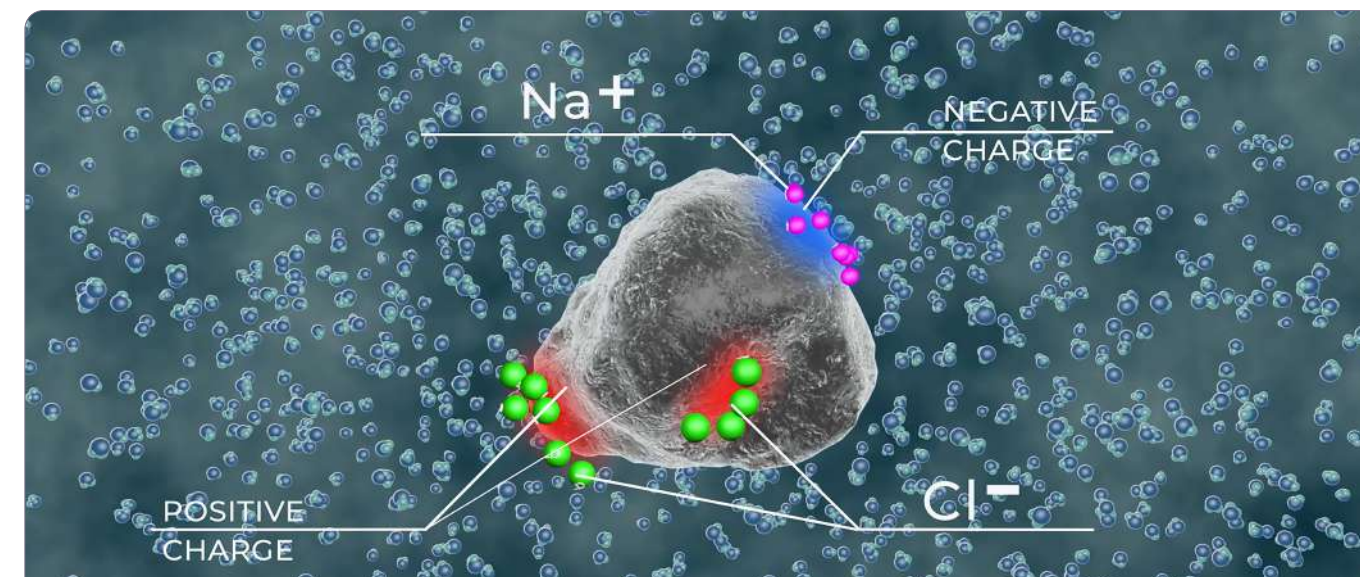
Например, нанопластмаса от найлон (полиамид), съдържащ азот и кислород, е способна да образува водородни връзки с водата¹⁵⁶. Когато частици нанопластмаса попаднат във вода, те нарушават подредената структура на водата, основана на водородните връзки между молекулите на водата, което може да промени нейните физико-химични свойства (фиг. 57). По-конкретно, молекулите на водата губят подвижност, което намалява способността им ефективно да участват в процесите на топлообмен. Освен това в водни разтвори, съдържащи различни вещества, нанопластиковите частици могат да придобиват електрически заряд¹⁵⁷.



Фигура 57. Схематично изображение на заредени наночастици пластмаса във вода: при въздействие на нестабилни водни условия — такива като наличието на органични или синтетични примеси, промяна на pH, температура или соленост — повърхността на нанопластмасата става потенциално активна и способна да генерира електрически заряди в водната среда.

Източник: 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>

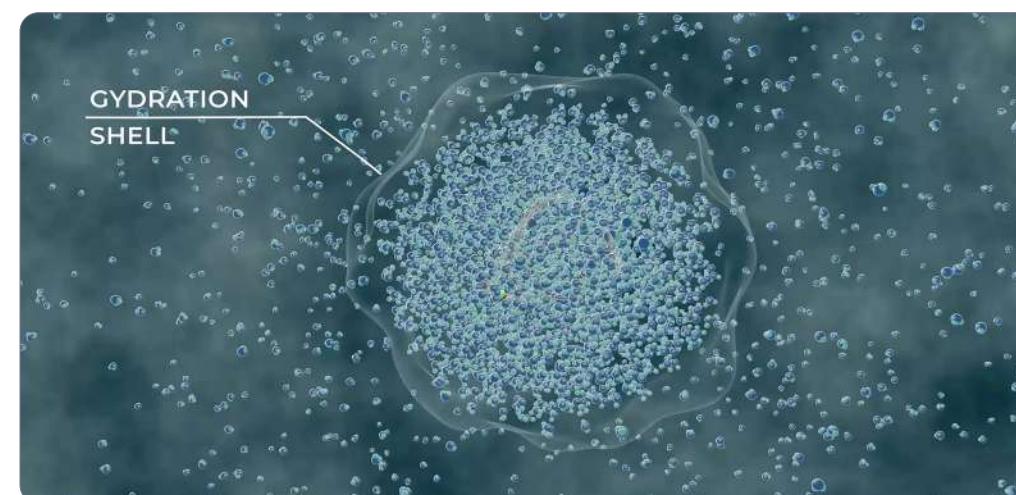
Това се случва вследствие на химични промени по повърхността ѝ, такива като окисляване, както и поради адсорбция на йони, например натрий (Na^+) и хлор (Cl^-) в морската вода. Заредените наночастици пластмаса, обкръжени от йони, привличат молекули вода и формират около себе си хидратна обвивка¹⁵⁸ (фиг. 58).



Фигура 58. Схематично изображение на процеса на формиране на хидратна обвивка около заредени наночастици пластмаса: в този процес наночастиците, притежаващи заряд, привличат йони, което спомага за образуването около тях на молекули вода, създавайки защитна хидратна обвивка.

Източник: 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>

Изследователи от Политехническото училище в Лозана решиха да установят колко голям е размерът на тази хидратна обвивка на йоните, тоест колко молекули вода реагират на един йон. Оказа се, че един йон може да влияе приблизително на един милион молекули вода, които го заобикалят. Този ефект се засилва, ако частицата има голям повърхностен заряд и висока концентрация на адсорбирани йони. В резултат една частица нанопластмаса може да променя свойствата на милиони молекули вода¹⁵⁸ (фиг. 59). Свързаните в хидратната обвивка молекули са по-малко подвижни¹⁵⁹. В резултат на това се намалява общата топлемост на водата^{160, 161}.



Фигура 59. Схематично изображение на хидратната обвивка около частица нанопластмаса

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>

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>

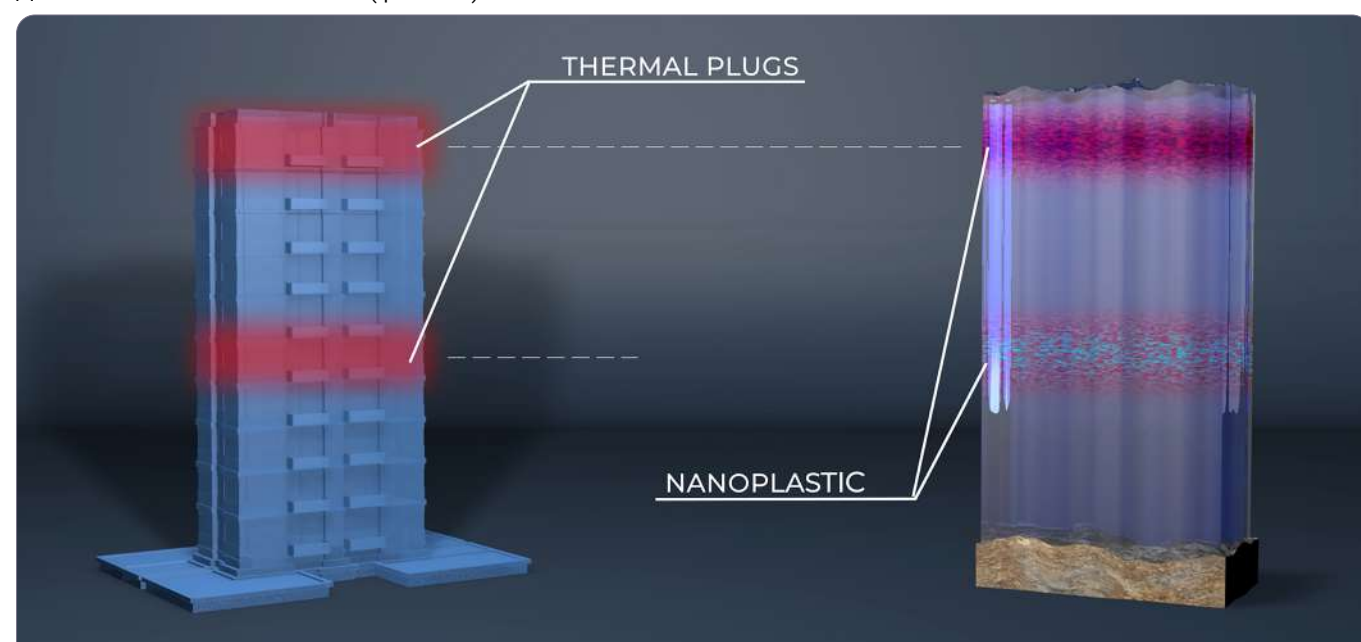
¹⁶⁰Chew, T., Daik, R. & Hamid, M. Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Dodecylbenzenesulfonic Acid-Doped Polyaniline Particles—Water Based Nanofluid. *Polymers* 7, 1221–1231 (2015). <https://doi.org/10.3390/polym7071221>

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>

Нарушаването на структурата на водородните връзки води и до намаляване на топлопроводимостта¹⁶². В резултат водата в близост до нанопластмаса може да остане затоплена, тъй като губи способността си ефективно да предава топлина.

Зони на концентрация на микро- и нанопластмаса в океана

Микро- и нанопластмасата могат да бъдат разпределени из целия океан благодарение на теченията, а по-плътните частици или замърсеният пластмасов отпадък могат да се утаяват на морското дъно. Също така, натрупване на нанопластмаса се наблюдава в зони на термоклина — това е преходен слой, който се намира между топлите повърхностни води и по-студените дълбочинни пластове¹⁶³ (фиг. 60).

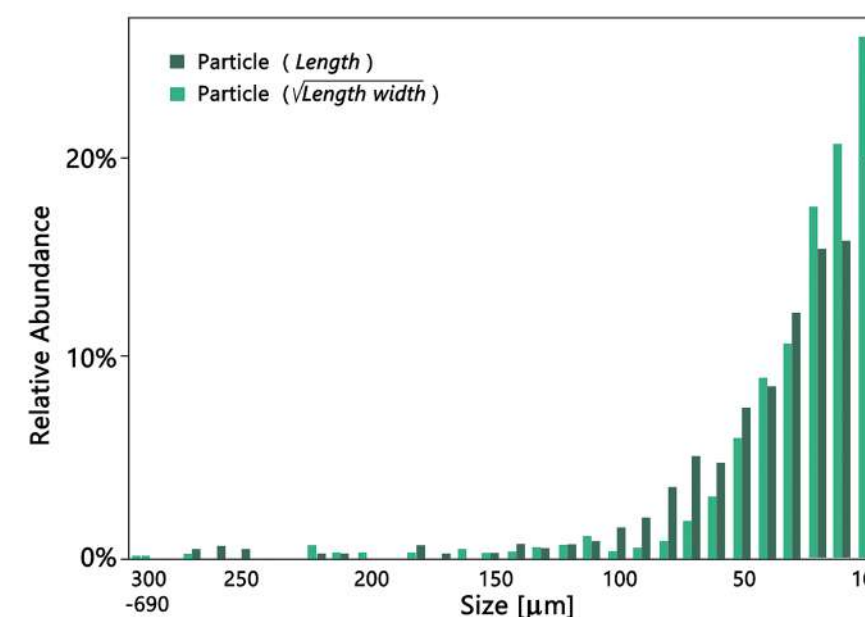


Фигура 60. На изображението е показано образно сравнение на зони на концентрация на микро- и нанопластмаса в океана с многоетажна сграда с топлинни задръствания на 5-ия и 10-ия етаж. Тези задръствания пречат на нормалния топлообмен и вместо равномерно разпределение на топлината, тя се натрупва на тези етажи. Топлинна камера ще покаже, че температурата в сградата е значително по-висока, отколкото в същата сграда без задръствания. По аналогия нанопластмасата във водата нарушава естествените механизми на топлообмен, създавайки „топлинни задръствания“ в океана

Увеличаването на концентрацията на нанопластмасата в океаните може да доведе до промени в глобалния топлинен баланс. Това може да влияе на повишаването на температурата на океаните и съответно да предизвика климатични промени. Важно е да се отбележи, че дори незначително количество нанопластмаса може да окаже съществено въздействие върху екосистемите. Повишаването на температурата на повърхността на океана ускорява фрагментацията на пластмасовите отпадъци до микро- и нанопластмаса (фиг. 61). В резултат се увеличава количеството на тези частици, които заедно с водните пари попадат в атмосферата. Присъствието на микро- и нанопластмаса в атмосферата допринася за допълнителното ѝ затопляне, което на свой ред усилва нагряването на океана. По този начин се формира затворен кръг, в който процесите взаимно се усилват.

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>



Фигура 61. Относително разпределение на частици микропластмаса по размери за всички анализирани станции (n = 543). На изображенията са показани най-малките (вдясно) и най-големите (вляво) частици микропластмаса, открити и потвърдени чрез Раман-микроспектрометрия.

Източник: 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>

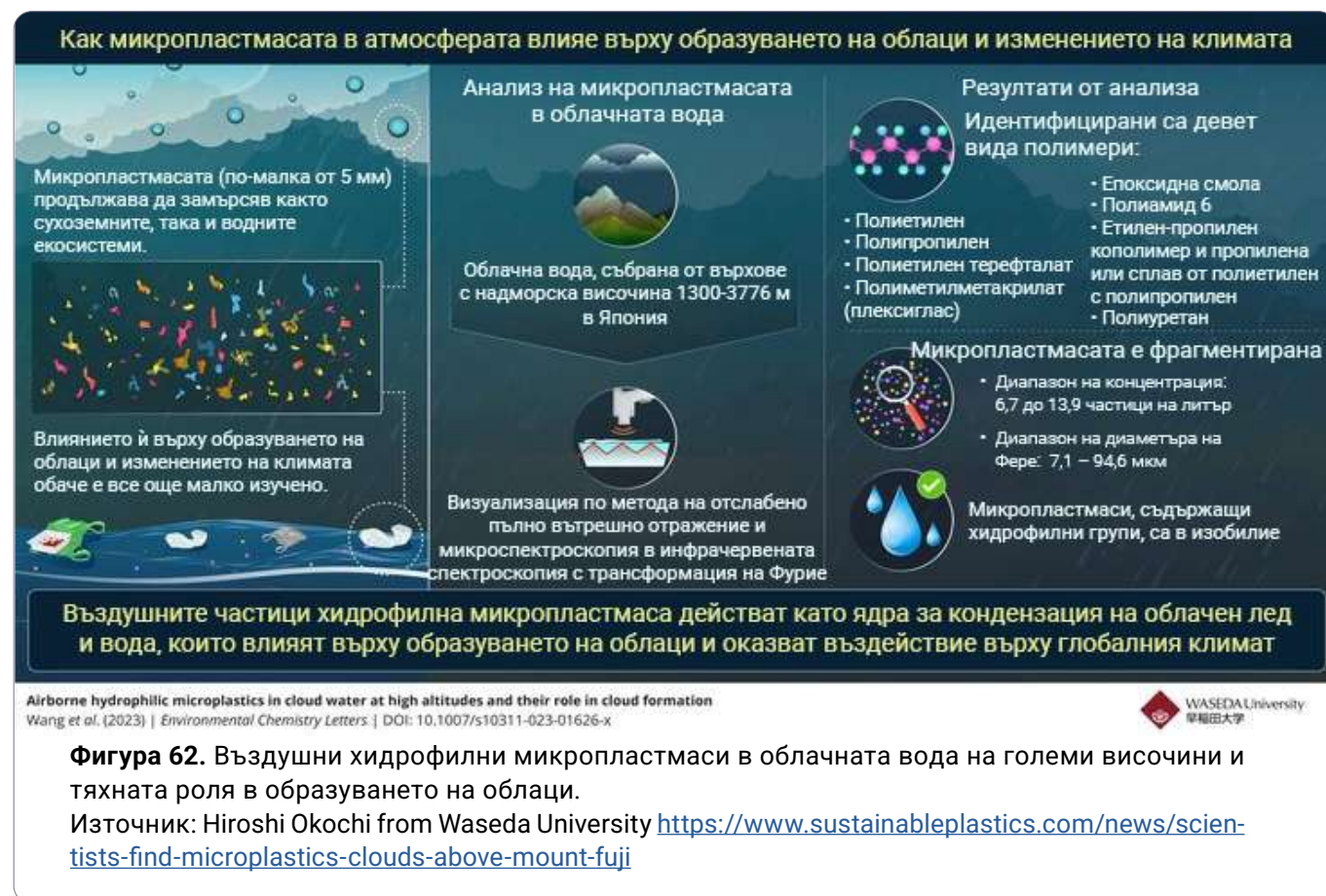
Връзката между електростатичния заряд на МНП и атмосферните явления

Микро- и нанопластмасата попадат в атмосферата по различни пътища. Водната пара, изпаряваща се от повърхността на океаните и други водоеми, пренася микрочастици във въздуха¹⁶⁴. На континентите основните източници на атмосферната пластмаса са заводите, инсталациите за изгаряне на отпадъци и сметищата. Освен това микропластмасата се издига във въздуха, когато земеделските торове и пластмасовото мулчиране изсъхват и се разнасят от вятъра. Микрочастици пластмаса се отделят при триене на автомобилни гуми.

Тези и много други източници допринасят значително за замърсяването на атмосферата. Тези процеси спомагат за натрупването и разпространението на микропластмаса в атмосферата, създавайки сериозни екологични и климатични заплахи. Попадайки в атмосферата, микро- и нанопластмасовите частици могат да служат като ядра за кондензация на водната пара. Колкото повече са тези ядра, толкова по-бързо се осъществява кондензацията на водната пара в капки. Въздушната микропластмаса е била открита в проби от облачна вода, събрани на планински върхове в Япония¹⁶⁵ (фиг. 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>



„В замърсена околна среда с голямо количество аерозолни частици, такива като микропластмаса, цялата вода се разпределя между това голямо количество аерозолни частици, образувайки по-малки капчици около всяка от тях. Когато капките са повече, получават се по-малки валежи. Но тъй като капките падат само когато станат достатъчно големи, в облака се събира повече вода. В резултат падат по-обилни валежи,” каза Мириам Фридман, професор по химия в департамента по метеорология и атмосферни науки на Държавния университет на Пенсилвания¹⁶⁶.

Това обяснява защо през последните години в различни региони се наблюдават аномални валежи.

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>

Електрически заряди в облаци

Атмосферата на Земята е сложна електрическа система, в която важна роля играят молекулите на водата. От 1752 година, когато Бенджамин Франклин за първи път е доказал, че атмосферата е електрифицирана и че гръмотевичните бури имат електрическа природа, стана ясно, че взаимодействието на водата (в пара, течности и лед) играе ключова роля в тези процеси. Водата в своята чиста форма е неутрална, но по време на фазови преходи, такива като топене и замръзване, както и при сблъсъци на молекули, тя може да предава йони на други частици, което води до електрически ефекти.

В атмосферата сблъсъците между кристали лед, свръхохладени капки вода и други частици в присъствието на естествени електрически полета водят до разделяне на зарядите. Този процес играе ключова роля във формирането на атмосферното електричество, включително гръмотевичните облаци. Това явление е важно за образуването на облаци и валежи. Заредените капки започват да се привличат една друга, ускорявайки процеса на тяхното сливане в по-големи капки, което в крайна сметка води до формирането на облаци, способни да предизвикат валежи такива като дъжд, сняг или град.



„Зарядите са изключително важни, а в процеса на образуване на облаци те практически са всичко. И ние открихме, че зарядите играят ключова роля”, каза Джералд Х. Полак, доктор по биоинженерство във Вашингтонския университет, главен редактор и основател на интердисциплинарното изследователско списание WATER¹⁶⁷.

Също така през 1843 година Майкъл Фарадей открива, че електричеството възниква в резултат на триенето на капки вода върху метал, което зарежда водата. Това откритие довежда до по-нататъшно изследване на заряда на водата при триене, фазови преходи и контактна електризация, както и до опити за използване на този ефект за създаване на нови източници на енергия.

Известно е, че влажен въздух може да неутрализира повърхностния заряд, като образува воден филм, който позволява на йоните да се придвижват и разсейват натрупания заряд. Въпреки това, в някои случаи повърхности, адсорбиращи вода, могат да акумулират заряд от влажната атмосфера, което също влияе на електрическото състояние на околната среда¹⁶⁸. Изследванията показват, че тежките метали могат лесно да се прикрепят към микропластмасата и че тази комбинация може потенциално да нанесе вреда на екосистемите на планетата.

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> (Accessed May 1, 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>

Освен това микропластмасата и смес от вещества на нейната повърхност могат не само да се прилепят към други замърсители, но и да взаимодействат помежду си, променяйки техните химични свойства¹⁶⁹. Когато микро- и микропластмасовите частици навлизат в атмосферата, те могат да нарушат крехкия баланс в атмосферните процеси. Пластмасовите частици могат да носят заряд, което засилва привличането на полярни молекули вода и подпомага образуването на капки. Частиците пластмаса стават не обичайни ядра на кондензация, такива като пращец, морска сол или сажда, а могат да събират капки по-ефективно от неутралните частици¹⁷⁰.

Това означава, че около заредените частици водните капки започват да се формират по-бързо, което влияе на структурата на облаците и може да доведе до образуване на по-големи капки и дори аномално големи ледени кристали¹⁷¹. Например наскоро група изследователи откри пластмасови гранули с водопривличаща повърхност в облаци на върховете на планини в Япония¹⁷².

Влияние върху формирането на облаци и валежи

Микропластмасата може да повлияе на характера на валежите, прогнозата за времето, моделирането на климата и дори на безопасността на полетите, като влияе върху начина, по който атмосферните ледени кристали формират облаците.

Изследване¹⁷³ показва, че водните капки с микропластмаса замръзват при температура с 4–10°C по-висока, отколкото капките без микропластмаса, тоест на по-ниски височини. Обикновено водна капка без никакви примеси замръзва при около –38 °C. Въпреки това, при наличие на микропластмаса 50 % от капките са замръзнали при температури от –18°C до –24°C в зависимост от вида пластмаса.

Водни капки, съдържащи микропластмаса, замръзват по-бързо, образувайки по-големи ледени частици. Тези частици се издигат с възходящите въздушни потоци, многократно се покриват със слоеве лед и след това падат на земята. Такова явление може да доведе до увеличаване размера на градушките (фиг. 63–64), засилване на тяхното разрушително въздействие, както и до активиране на процеса на образуване на ледени облаци. В резултат се променят честотата и интензивността на валежите, включително дъждове и снеговалежи. Това може да предизвика каскадни ефекти, засягащи климата, хидрологичния цикъл и екосистемите.

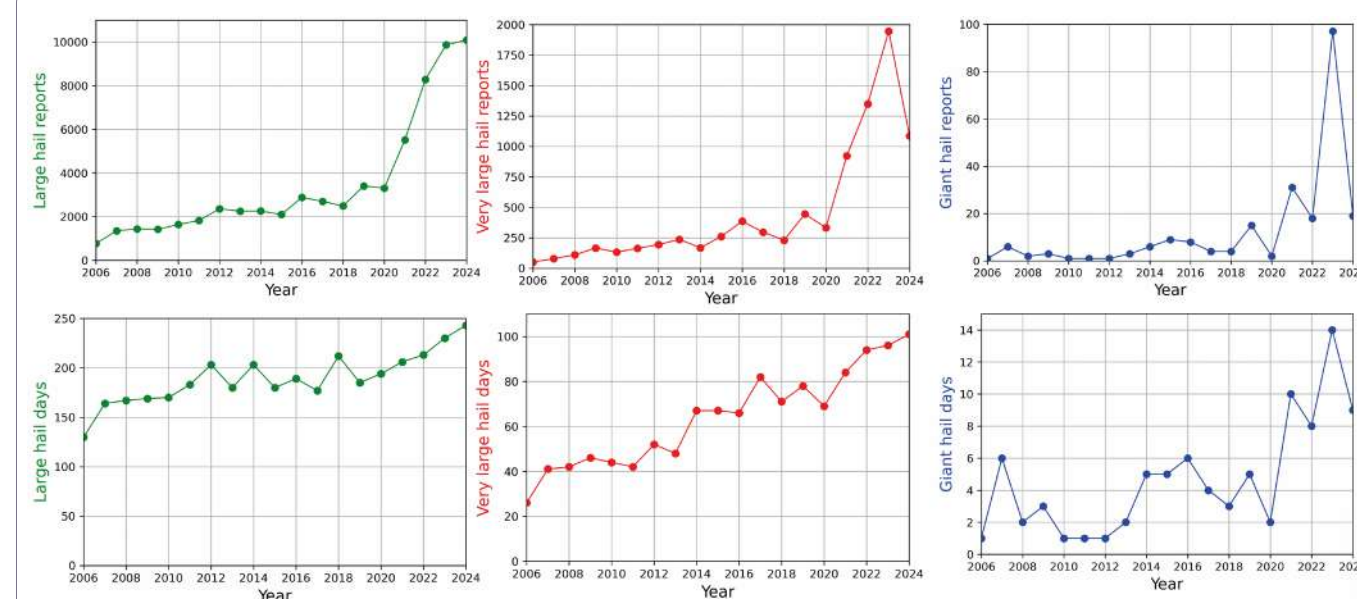
¹⁶⁹Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. Environ. Sci. Technol. Lett. 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

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>

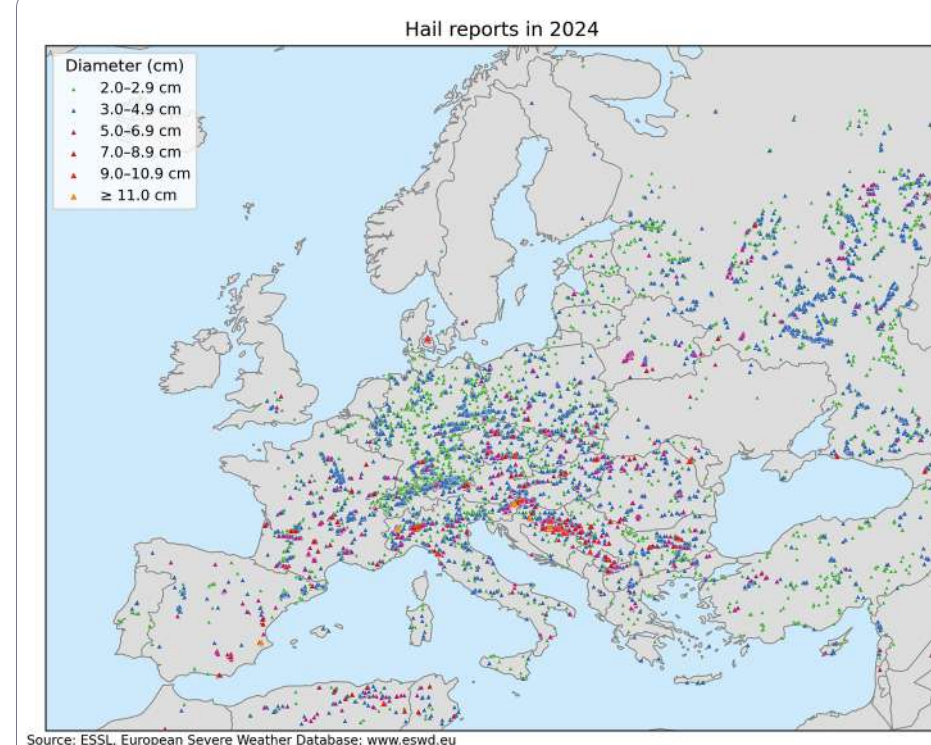
¹⁷²Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. Environ Chem Lett 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

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>



Фигура 63. Брой съобщения и дни с големи (2+ см), много големи (5+ см) и гигантски (10+ см) градушки за периода от 2006 до 2024 година.

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



Фигура 64. Пространствено разпределение на съобщения за голям град по цяла Европа и прилежащите територии през 2024 година.

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

Когато в атмосферата присъстват частици микропластмаса, облаци започват да се образуват на по-ниски височини — обикновено под 2 км. Това води до факта, че облаци стават по-малко подвижни, което пречи на нормалното разпределение на валежите. В резултат в някои райони може да се наблюдава суша, а в други — прекомерни валежи.

Роля на МНП (микро- и нанопластмасата) в нарушаването на климатичния баланс на планетата

По-плътните облаци започват да задържат топлината в долните слоеве на атмосферата, подобно на одеяло, поглъщайки и връщайки част от топлинното излъчване обратно към повърхността на Земята. Това намалява изтичането на топлина в космическото пространство и допринася за затоплянето на атмосферата. Повишаването на температурата спомага за допълнително изпарение на вода от океаните, а по-голямото количество влага в атмосферата води до по-нататъшното затопляне. Това е затворен цикъл. Важно е да се отбележи, че при всяко повишение на температурата с един градус количеството влага във въздуха се увеличава с около 7 %¹⁷⁴, а честотата на мълниите се повишава с 12 %¹⁷⁵.

66

Както отбелязва Кевин Тренбърт, заслужил климатолог от Националния център за атмосферни изследвания на САЩ (NCAR), водещ автор на доклади на МГЕИК: **„Съчетанието на повишена температура и увеличено съдържание на водна пара в атмосферата води до по-голяма нестабилност. Това води до усилване на конвекцията и увеличаване на броя на бурите. Някои от тях, най-силните, прерастват в гръмотевични бури. При такива условия рискът от възникване на силни бури се увеличава.**

Когато гръмотевичните бури започнат да се обединяват и взаимодействат, както се случва при тропическите бури, те могат да прераснат в по-мощни урагани. Всички тези фактори се сумират, повишава се рискът от бури, силни гръмотевични бури, особено супер-клетъчни бури, които причиняват градушка, а на някои места при подходящи условия могат да предизвикат торнадо.“

Така екстремното затопляне на океана, излишъкът от електричество и топлина в атмосферата влошават климатичната ситуация, водейки до по-разрушителни климатични явления, като силни гръмотевични бури, урагани, мълнии и спрайтове.

Пластмасата в атмосферата не само замърсява околната среда, но и променя климатичните процеси, като влияе на формирането на облаци и валежите. Тя усилва електростатичния заряд в атмосферата, ускорява кондензацията на водната пара и влияе на плътността на облаци, което може да доведе до повишаване на интензивността на бури, гръмотевични бури и други разрушителни природни явления. Ние сме на прага на разбирането на мащабните последици от това въздействие върху климата, което изисква спешни и комплексни мерки за намаляване на замърсяването с пластмасови частици в океаните и атмосферата.

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

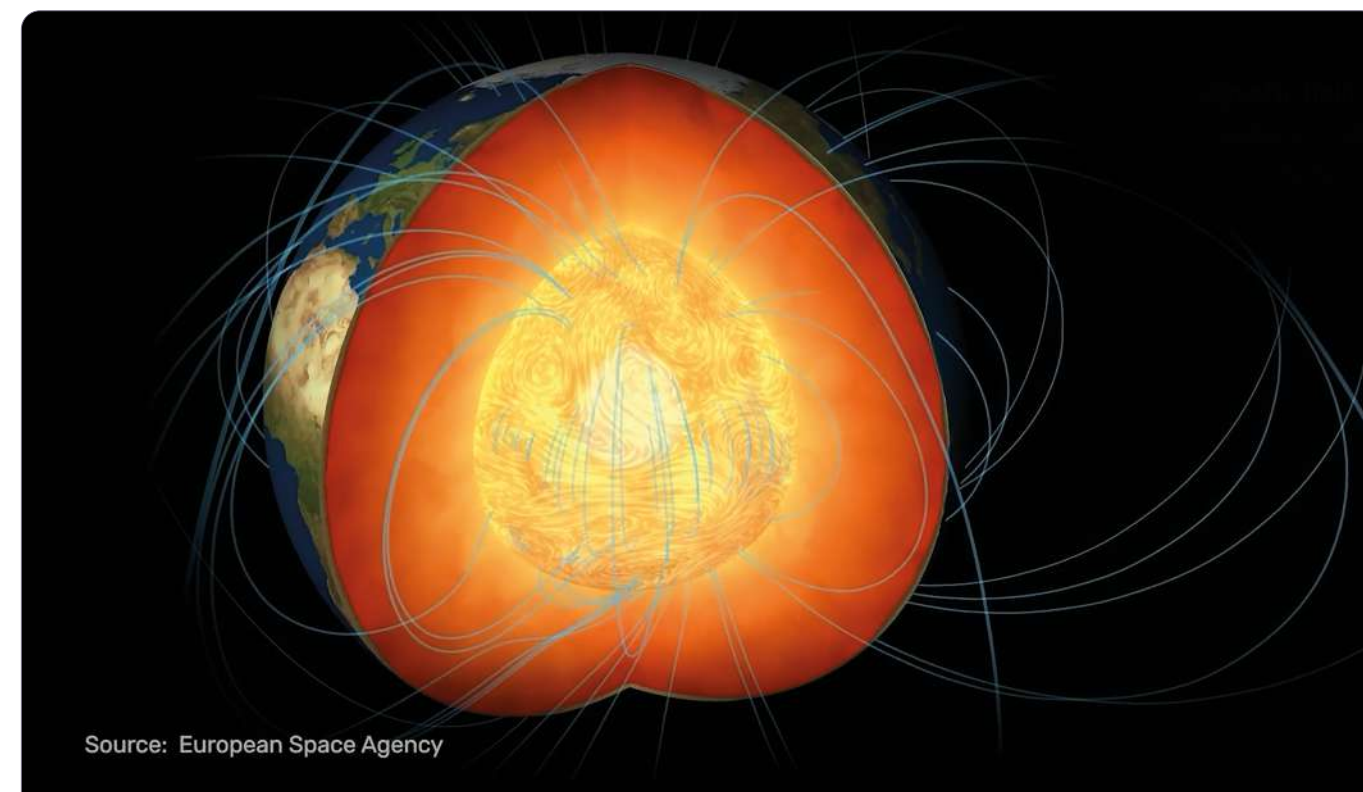
<https://science.nasa.gov/earth/climate-change/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifies-earths-greenhouse-effect>

¹⁷⁵ 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>

Взаимодействие на океана с магнитното поле на Земята

Океаните заемат около 70 % от повърхността на Земята и представляват не само гигантски резервоари с вода, но и важни елементи в сложните електрически процеси на планетата. Те взаимодействат с магнитното поле на Земята, участвайки в нейните електромагнитни процеси.

Магнитното поле на Земята защитава повърхността на планетата от слънчевия вятър и космическото излъчване, действайки като естествен щит. Без това поле атмосферата би била разрушена. Геомагнитното поле се създава в дълбините на планетата, където течното външно ядро, съставено от метали, се движи около твърдото вътрешно ядро, създавайки природен генератор — процес, наречен геодинамо (фиг. 65).



Source: European Space Agency

Фигура 65. Схематично изображение на процеса на образуване на геомагнитното поле: течното външно ядро на Земята се върти около твърдото вътрешно ядро, формирайки природен генератор — геодинамо, благодарение на което се създава магнитното поле на планетата.

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

Магнитното поле на Земята взаимодейства с електрическите явления в океаните и атмосферата. Морската вода, благодарение на съдържанието на соли и разтворени йони, притежава значителна електропроводимост, което ѝ позволява да провежда електрически токове. Тези токове от своя страна взаимодействат с магнитното поле, създавайки сложни електромагнитни процеси, които играят роля в динамиката на планетарното магнитно поле.

Както беше разгледано по-рано, замърсяването на океаните, особено с микро- и нанопластмаса, може да променя химическите и електрическите свойства на водата. Колкото по-висока е концентрацията на замърсители, толкова по-силно се нарушават естествените електромагнитни процеси.

При изпарение на замърсена вода микроскопични капчици и аерозоли могат да пренасят микро- и нанопластмаса, тежки метали¹⁷⁶ и други вещества в атмосферата, което може да оказва влияние върху локалните електромагнитни процеси. Това е подобно на начина, по който метален обект, разположен близо до магнит, променя разпределението на магнитното поле, отслабвайки неговата сила в определена област.

Влиянието на замърсяването на океаните върху магнитното поле на Земята изисква по-нататъшно изследване, особено в контекста на глобалните климатични промени. Разбирането на тези процеси може да помогне за оценка на потенциалното им въздействие върху климатичната система и екосистемите на планетата.

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>

ВЪЗДЕЙСТВИЕ НА МИКРО- И НАНОПЛАСТМАСАТА ВЪРХУ ЗДРАВЕТО НА ЧОВЕКА



„Пластмасата не само замърсява нашите океани и водни пътища и убива морския живот — тя е във всеки от нас, и ние не можем да избегнем консумацията на пластмаса. Глобалните действия са спешни и необходими за справяне с тази криза.“

Марко Ламбертини
генерален директор на WWF International

МНП като нов фактор на риска за възникване на епидемии през XXI век

През последните 30 години се наблюдава непрекъснат растеж на инфаркти, инсулти, онкологични заболявания, захарен диабет, алергии, възпалителни заболявания на червата. Намаление на имунитета се наблюдава както при деца, така и при възрастни по целия свят. Расте разпространеността на безплодието. Дори въпреки ограничеността на данните за броя на безплодните хора и двойки, според оценка на Световната здравна организация, с безплодие се сблъскват вече около 17,5% от възрастните¹⁷⁷, тоест приблизително всеки шести човек в света.

От 2010 година се наблюдава понижение на интелектуалните способности у хората. Дори в развитите страни 25% от възрастните не се справят с базови математически задачи; например, в САЩ този показател достига 35%. Намалява способността за концентрация на вниманието, логическо мислене и решаване на елементарни задачи. Расте разпространеността на различни форми на деменция и нарушения на когнитивните способности¹⁷⁸.

Ръстът на психичните разстройства изпреварва ръста на соматичните заболявания¹⁷⁹. Тревожните разстройства, аутизмът, депресията и биполарното разстройство, синдромът на дефицит на вниманието и хиперактивност (СДВХ) придобиват мащаб на пандемия.

Все повече данни сочат участието на микро- и нанопластмасата в патогенезата на различни заболявания.

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> (Accessed May 1, 2025).

¹⁷⁸ Financial Times. Have humans passed peak brain power? <https://www.ft.com/content/a8016c64-63b7-458b-a371-e0e1c54a13fc> (Accessed May 1, 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> (accessed 1 May 2025).

Молекулни механизми на токсичността на МНП.

Увреждане на ДНК, митохондриите и клетъчните мембрани

Микро- и нанопластмасата (МНП) е една от най-широко разпространените форми на антропогенно замърсяване на околната среда. Благодарение на своите физико-химични свойства, частиците пластмаса са способни да се придвижват на значителни разстояния, преодолявайки географски и екологични бариери. Основните пътища за постъпване на микро- и нанопластмаса в човешкия организъм са поглъщане (с вода и храна), вдишване с въздуха и проникване през кожата¹⁸⁰ (фиг. 66).



Фигура 66. Преглед на пътищата на въздействие на микропластмасата (МП) върху човека и общите събития, които могат да формират въздействието на частици МП, химически вещества, свързани с пластмаса (ХВП), и адсорбирани замърсители от околната среда върху здравето на човека.

Източник: 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>

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>

Както беше споменато в раздела: „Последствия от пластмасовото замърсяване: микро- и нанопластмасата (МНП) като нов фактор на планетарната криза“, морската среда служи като значителен източник на вторична микропластмаса. Според оценки, морският бриз пренася около 136 хиляди тона микропластмаса към крайбрежните територии ежегодно. Освен това, откритите водоеми в урбанизирани райони, включително канализационните и дъждовните системи, се превръщат във важни центрове за натрупване и по-нататъшно разпространение на пластмасови частици, чието количество може да надвишава предишните оценки с 90 %.

Хранителните продукти представляват важен път за постъпване на МНП в човешкия организъм. Растенията са способни да акумулират нанопластмаса чрез кореновата система: при поливане или по време на валежи частиците проникват в почвата и се поглъщат заедно с водата, придвижвайки се по ксилема и натрупвайки се в тъканите на листата и плодовете¹⁸¹. Най-високо съдържание на пластмасови частици е открито в такива култури като ябълки, круши, моркови и броколи.

Морските дарове също служат като един от пътищата за пренос на МНП. Поглъщането на микропластмаса от морски организми се фиксира на всички трофични нива. Според изследване на Нюкасълския университет, средностатистическият човек може да консумира до 250 г микропластмаса годишно, което е еквивалентно на около 5 г седмично — масата на една пластмасова карта. Освен това, при нагряване на пластмасови контейнери, включително за детска храна, в микровълнови фурни могат да се освобождават в храната над 2 милиарда наночастици и 4 милиона микрочастици пластмаса на всеки квадратен сантиметър от повърхността.

Микропластмасата е широко разпространена в питейната вода. Изследванията показват, че до 90 % от пробите от водопроводна вода в САЩ съдържат частици МНП. Основните пътища на постъпване в водните системи са отпадъчни води, промишлени емисии и атмосферни валежи, съдържащи пластмаса, улавяна от въздуха. При изпарение на замърсена вода пластмасовите частици могат да се издигат в атмосферата и след това да падат с дъжд или сняг. В изследване, проведено в 11 национални парка в САЩ, за 14 месеца е регистрирано падане на над 1000 тона пластмасови частици с валежите — обем, достатъчен за производство на 120 милиона пластмасови бутилки.

Аерозолното разпространение на МНП е един от най-опасните механизми за въздействие върху човека. Частиците пластмаса се издигат от повърхностите на морета и водоеми, транспортират се с въздушните маси и стават компонент на атмосферния аерозол. Оценки показват, че в условията на мегаполис при двучасова разходка възрастен човек може да вдиша до 106 хиляди частици микропластмаса, а в райони, прилежащи на водоеми, тази цифра се увеличава 10 пъти.

¹⁸¹Azeem, I. et al. Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review. Nanomaterials 11, 2935 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11122935>

Ново изследване, представено на конференцията на Американския колеж по кардиология (ACC.25), установи, че по-високото въздействие на микропластмаса, която може да бъде непреднамерено погълната или вдишана, е свързано с повишена честота на хронични неинфекциозни заболявания. Изследването показва, че в общности, разположени по източното и западното крайбрежие на залива, както и по някои брегове на езера в САЩ, по-високите концентрации на микропластмаса в околната среда са асоциирани с по-висока честота на хронични неинфекциозни заболявания, такива като хипертония, диабет и инсулт.

66

„Това изследване дава първоначални доказателства, че излагането на микропластмаса влияе на здравето на сърдечно-съдовата система, особено върху хроничните неинфекциозни заболявания, такива като високо кръвно налягане, диабет и инсулт,“ каза Сай Рахул Поннана, магистър на науките, научен сътрудник по изследователски данни в Медицинското училище на Case Western Reserve в Охайо и главен автор на изследването. **„Когато включихме в анализа си ¹⁵⁴ различни социално-икономически и екологични характеристики, не очаквахме микропластмасата да влезе в първата десетка по прогнозиране на разпространението на хронични неинфекциозни заболявания.“ ¹⁸²**

Микро- и нанопластмасата е способна да прониква през биологични бариери, включително бариерите на червата, белите дробове, главния мозък и плацентата¹⁸³. Микропластмасата, подложена на въздействието на сладка или морска вода, прониква по-лесно в клетките (фиг. 67) благодарение на утаяването на биомолекули по повърхността му. Тези биомолекули, формирайки покритие, спомагат за преминаването му през храносмилателния тракт и включването на микропластмасата в тъканите. Това покритие действа като механизъм, улесняващ проникването на пластмасата в клетките, подобно на троянски кон¹⁸⁴.

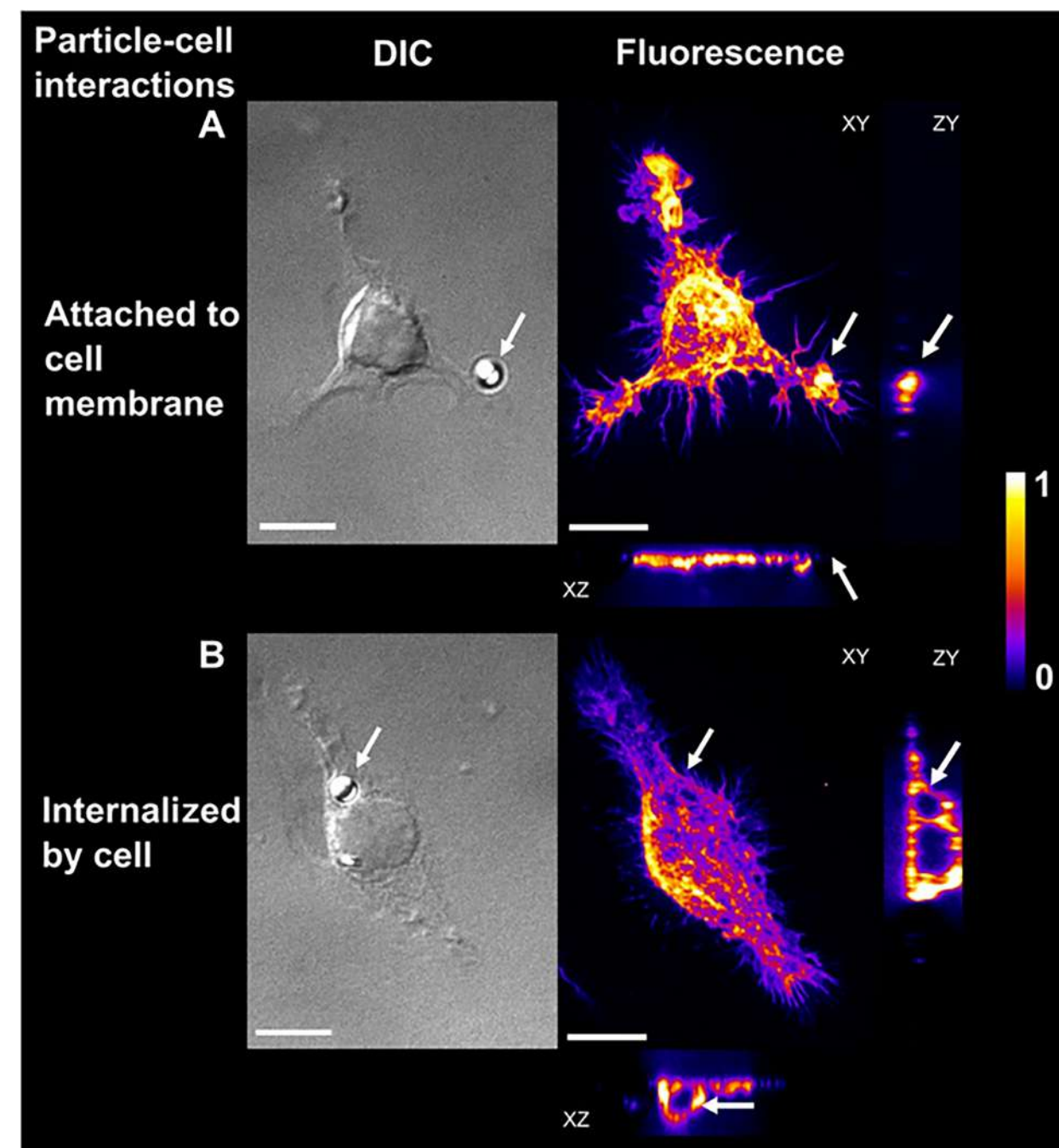
¹⁸²American College of Cardiology. New evidence links microplastics with chronic disease. (2025)

<https://www.acc.org/About-ACC/Press-Releases/2025/03/25/10/19/New-Evidence-Links-Microplastics-with-Chronic-Disease> (Accessed May 1, 2025).

¹⁸³ Alqahtani, S., Alqahtani, S., Saqib, 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>

¹⁸⁴ 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>



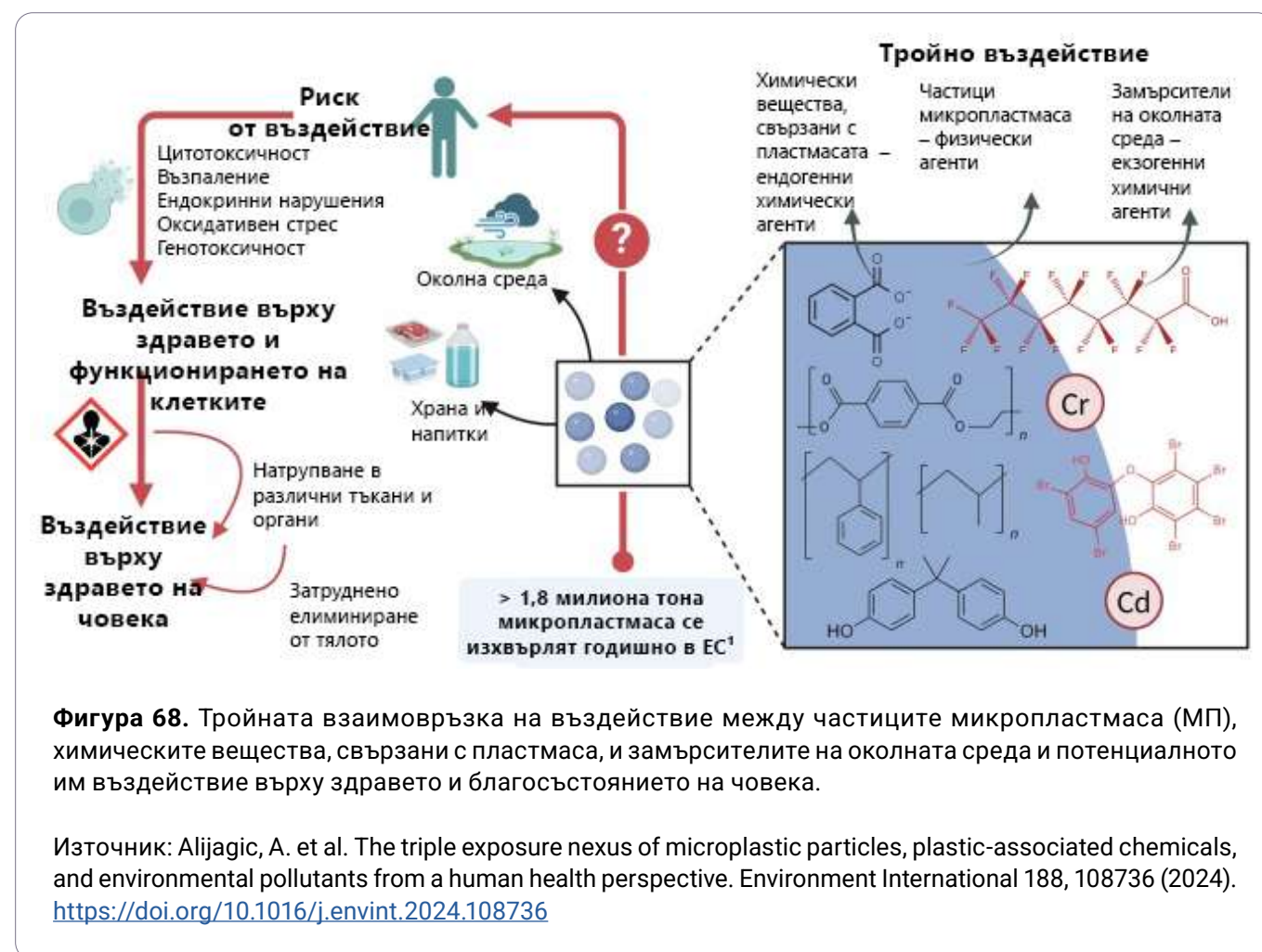
Фигура 67. Изображения на взаимодействието на частиците с клетка на микропластмасови частици, подложени на въздействието на прясна вода в продължение на 2 седмици.

DIC: Диференциално-интерференционни контрастни микроскопски изображения на взаимодействията между частици и клетки. Флуоресценция: Конфокални изображения с въртящо се дисково просветление на клетки с флуоресцентно маркиран нишковиден актин (изображение в условни цветове, максимална проекция на интензитета, показваща условни единици). Проекции XY, YZ и XZ на триизмерните конфокални изображения позволяват разграничаване на микропластмасови частици (A), прикрепени към клетъчните мембрани, или (B) интернализирани микропластмасови частици. Стрелките показват положението на микропластмасовите частици. Мащабни ленти: 10 μm .

Източник: 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>

Токсичността на микропластмасата зависи от множество фактори: размер, форма, повърхностен заряд, степен на изветряване, време на излагане, състав на добавките и други характеристики¹⁸⁵. По-дребните частици по-лесно проникват в клетките и предизвикват по-изразен оксидативен стрес. Повърхностният заряд на микропластмасата е ключов параметър, който определя ефективността на клетъчното поглъщане (влиея върху адхезията). Освен това микропластмасата се състои от полимери и различни добавки, които усилват неговото негативно въздействие¹⁸⁶.

Частичите микропластмаса и нанопластмаса, химичните съединения в състава на пластмасата и замърсителите от околната среда, които пластмасата адсорбира, оказват комплексно¹⁸⁷ негативно въздействие върху здравето на човека (фиг. 68), представлявайки значителна заплаха.



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>

¹⁸⁷Shanwei 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 (Accessed May 1, 2025).

1 грам микропластмаса може да съдържа до 24 000 нанограма устойчиви органични замърсители¹⁸⁷. Тези вещества се характеризират с висока токсичност, натрупват се в организмите и могат да причиняват вреда дори при малки концентрации.

Микропластмасата може да направи други замърсители по-вредни¹⁸⁸, тъй като микропластмасата и сместа от вещества по неговата повърхност не само могат да се прилепват към други замърсители, но и да взаимодействат помежду си, променяйки техните химически свойства.

Изследванията показват, че въздействието на микро- и нанопластмасата предизвиква токсични ефекти на различни нива на биологична организация:

- **Макромолекули:** Повреждане на ДНК, нарушение на експресията на гени и промени в транскрипцията на белтъци.
- **Клетки и органели:** Нарушение на клетъчното делене, цитотоксичност, апоптоза, оксидативен стрес, дисрегулация на метаболизма и повишаване на вътреклетъчната концентрация на калций.
- **Тъкани:** Възпалителни процеси, фиброза, остеолита на костната тъкан.
- **Органи:** Имуни реакции, дисфункция на органите, неуротоксичност, канцерогенеза, промени в метаболизма и енергийния баланс.
- **Популации на животни и човека:** Намаляване на фертилитета, забавяне на растежа и депопулация.

Тези ефекти подчертават многостепенното въздействие на микро- и нанопластика върху биологичните системи¹⁸⁹.

1. Нарушение на клетъчните функции

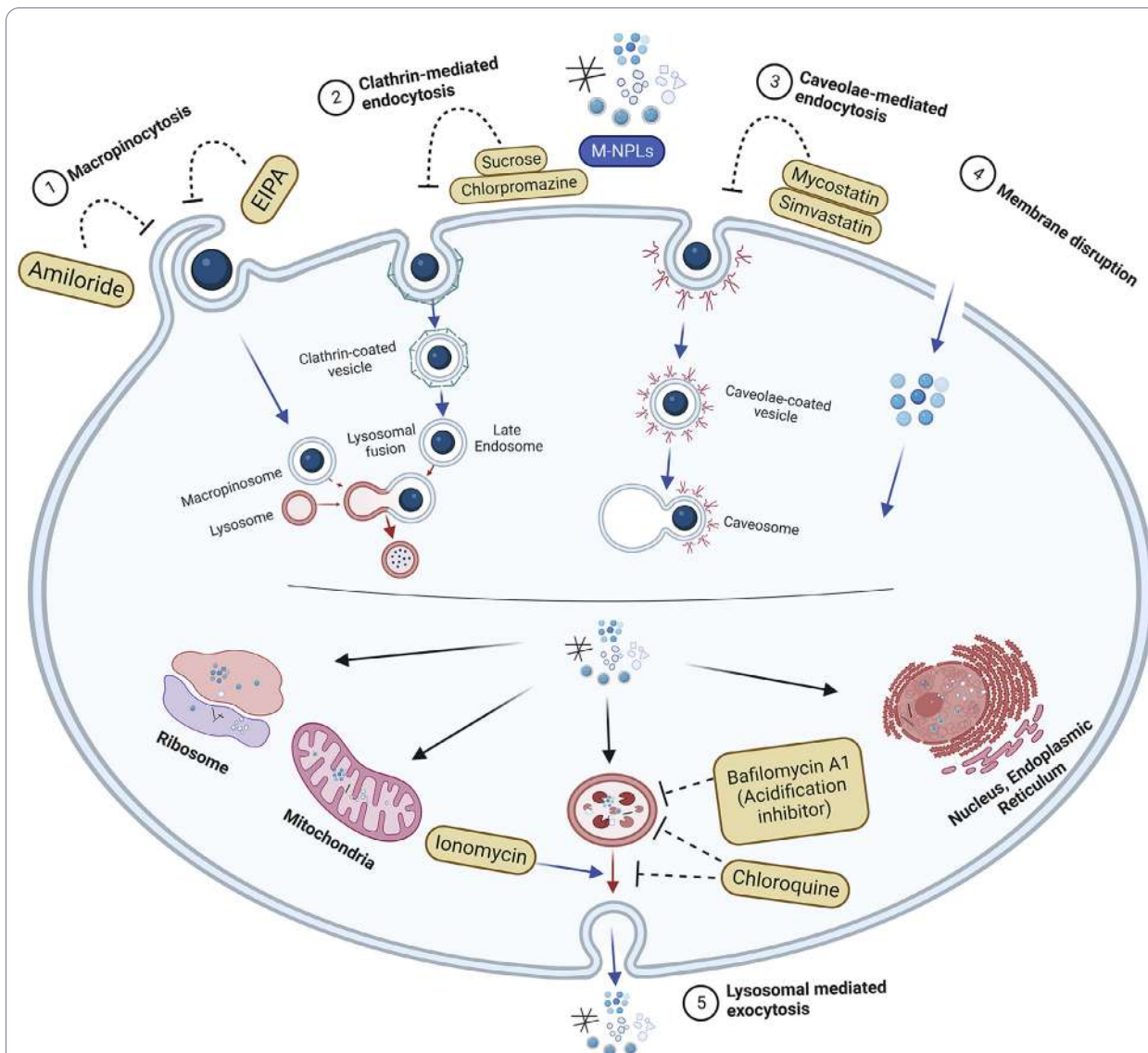
Разрушаването на организма под въздействието на МНП започва на клетъчно ниво¹⁹⁰. МНП взаимодействат с клетъчните мембрани чрез разнообразни механизми, включително водородни, халогенни връзки, както и хидрофобни, Ван дер Ваалсови и електростатични взаимодействия. Като действа като дестабилизиращ фактор, МНП нарушава цялостта и функционирането на клетъчните мембрани (фиг. 69).

¹⁸⁷Shanwei 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 (Accessed May 1, 2025).

¹⁸⁸Ho, 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>

¹⁸⁹Kaushik, 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>

¹⁹⁰Khan, 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>



Фигура 69. Клетъчно поглъщане и освобождаване на М-НПЛ. М-НПЛ използват различни типове ендоцитоза.

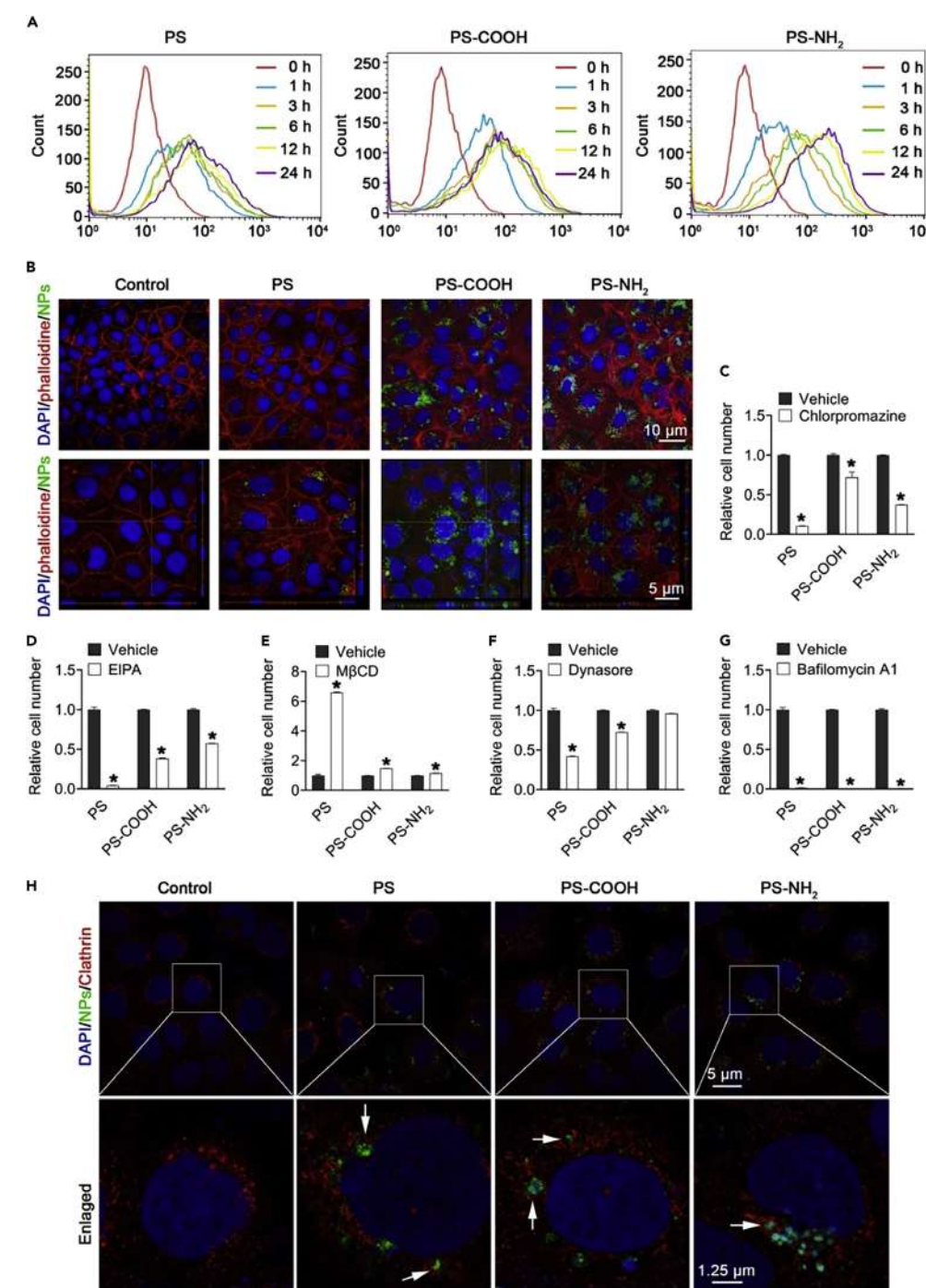
(1) Макропиноцитоза, (2) Ендоцитоза, медирана от клатрин, (3) Ендоцитоза, медирана от кавеоли, и разрушаване на клетъчната мембрана за интернализация. М-НПЛ се освобождават от клетките чрез (4) ендоцитоза, медирана от лизозоми.

Източник: 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>

Благодарение на малките си размери МНП са способни лесно да проникват в човешките клетки (фиг. 70). Малките размери и електростатичният заряд, натрупан върху МНП, обуславят тяхното системно въздействие върху организма¹⁹¹.

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>



Фигура 70. Клетки Caco-2, интернализираци НП.

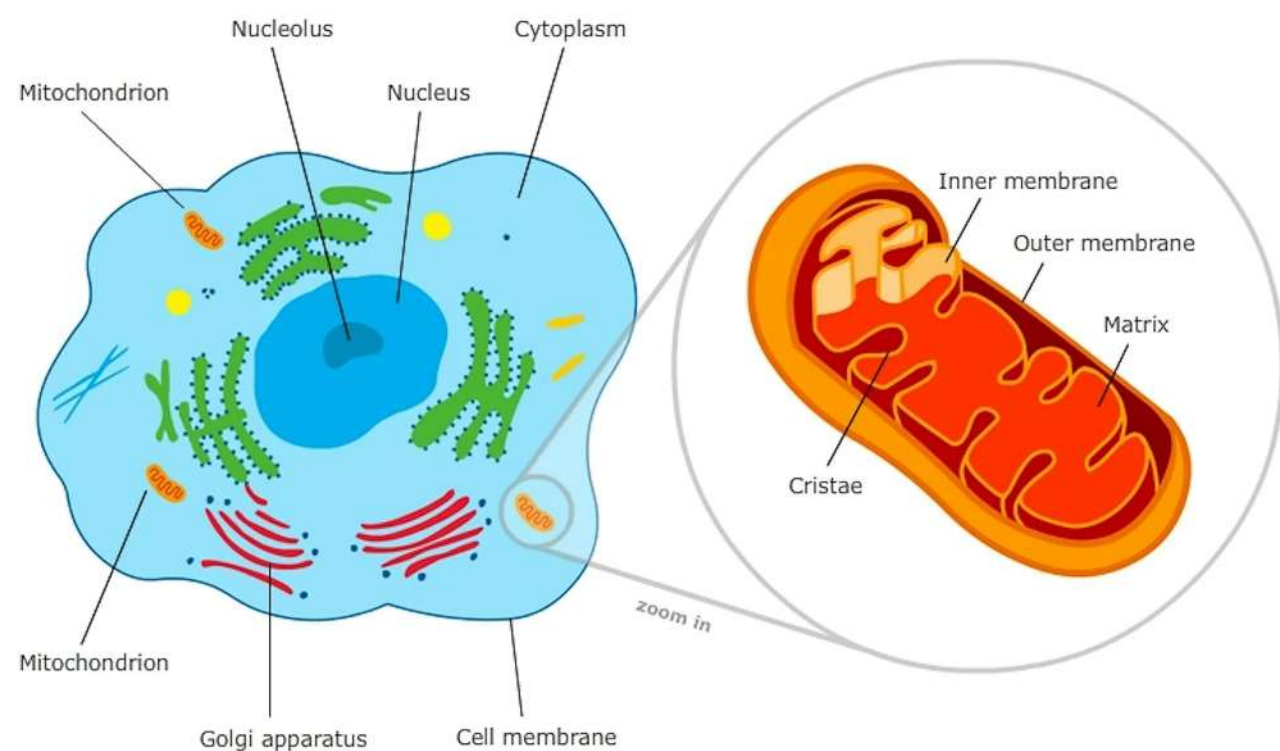
(A–G) Анализ на интернализацията на НП от клетки Caco-2 с използване на проточна цитометрия (A) и конфокална микроскопия (B). Анализ чрез проточна цитометрия на клетки Caco-2, предварително обработени в продължение на 1 час с хлорпромазин (C), EIPA (D), MβCD (E), диназор (F) и бафиломицин A1 (G), последван от обработка с НП в продължение на 24 часа. Локализация на НП във везикули, опосредствани от клатрин, изследвана с помощта на конфокална микроскопия (H).

Източник: 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>

Ключов момент в разрушителното действие на клетъчно ниво е увреждането на клетъчните мембрани, митохондриите и разрушаването на ДНК. Електростатично заредените частици микро- и нанопластмаса са способни да дестабилизируют мембрания потенциал на клетките, особено на невроните, предизвиквайки спонтанни електрически сигнали, сригове в предаването на информация между клетките или клетъчна смърт.

Вътре в клетката основният удар на разрушителното действие на нанопластмасата се понася от митохондриите – ключови органели, осигуряващи оцеляването и възстановяването на клетката. (фиг. 71) Освен ролята си на „енергийни станции“, митохондриите изпълняват многофункционални задачи, определящи здравето на организма, устойчивостта към стрес, развитието на хронични заболявания и процесите на стареене.



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

Фигура 71. Схематично изображение на клетка и митохондрии

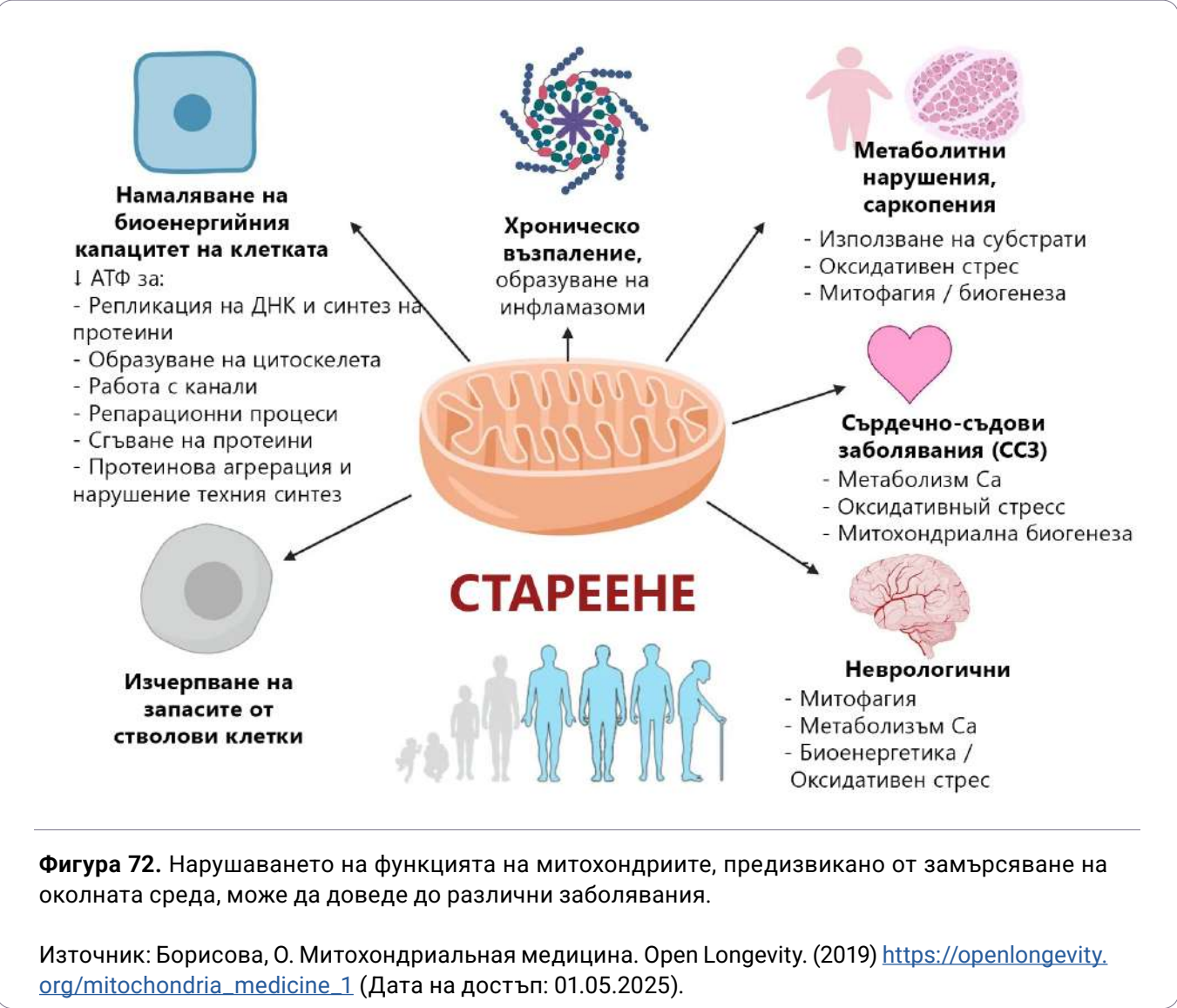
Правилното функциониране на митохондриите има решаващо значение за оцеляването на клетките, хомеостазата и биоенергетиката. Структурата и функцията на митохондриите се поддържат от система за контрол на качеството на митохондриите, която включва процесите на митохондриална биогенеза, митохондриална динамика (сливане/делене), митофагия и митохондриалната разгърната протеинова реакция (UPR^{MT} – реакция на неправилно нагънати белтъци в митохондриите). Дисфункцията и/или увреждането на митохондриите са свързани с възникването и прогресирането на множество човешки заболявания, включително невродегенеративни, сърдечно-съдови, свързани с възрастта болести, диабет и рак. Екологичният стрес и замърсяващите вещества могат да повишат чувствителността на митохондриите към увреждане, което води до митохондриална дисфункция. Нараства броят на доказателствата за въздействието на нанопластика и микропластмасата върху здравето и функцията на митохондриите. Докладвано е, че МНП предизвикват оксидативен стрес и образуване на активни форми на кислород, което в крайна сметка променя потенциала на митохондриалната мембрана. МНП могат да проникват през биологичните бариери в човешкото тяло и да бъдат усвоявани от клетките, потенциално променяйки митохондриалната динамика, биоенергетиката и сигналните пътища, като по този начин влияят на клетъчния метаболизъм и функция.

Като се има предвид критичната роля на митохондриите за здравето на клетъчно и организмено ниво, МНП представляват значителна заплаха за здравето и функцията на митохондриите. Сегашните данни подчертават неотложността от справяне с всеобхватния проблем със замърсяването от МНП не само за защита на околната среда, но и за опазване на човешкото здраве¹⁹².

Митохондриите синтезират АТФ – универсалната енергийна молекула, която осигурява всички биологични процеси: от мускулно съкращение и предаване на нервни импулси до синтез на хормони и клетъчно делене. Те участват в обмяната на въглехидрати, мазнини и аминокиселини, както и поддържат метаболитния баланс в организма.

Митохондриите контролират клетъчната смърт (апоптоза) – критично важен процес, който предотвратява натрупването на увредени или потенциално опасни клетки. Нарушенията в тази система са свързани с развитието на онкологични, автоимунни и невродегенеративни заболявания. Митохондриите играят водеща роля в антиоксидантната защита, като регулират нивото на реактивните кислородни форми (ROS). При неизправности в тази система се натрупват увреждания, ускорява се стареенето и се повишава рискът от хронични възпаления и заболявания (фиг. 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>



Митохондриите имат собствена ДНК, предавана по майчина линия, което ги прави уникални участници в наследствените заболявания. Те регулират активността на ядрените гени и адаптацията на клетките към промените във външната среда. Освен това митохондриите участват в синтеза на стероидни хормони – кортизол, естрогени и тестостерон. Именно нарушаването на митохондриалните функции в резултат на въздействието на нанопластмасата стои в основата на каскадата от патологични процеси, способни да доведат до тежки и потенциално необратими последствия както във функционирането на отделни органи и системи, така и на целия организъм като цяло (Таблица 1).

Неврологични заболявания	Болест на Паркинсон, Болест на Алцхаймер, Амиотрофична латерална склероза (ALS), Епилепсия, Мигрена, Митохондриални енцефалопатии (например, MELAS синдром)
Сърдечно-съдови заболявания	Кардиомиопатии, Сърдечна недостатъчност, Атеросклероза (чрез оксидативен стрес)
Имунни и възпалителни заболявания	Автоимунни заболявания (например, системен лупус еритематозус), Хронични възпалителни състояния (чрез дисфункция на ROS и цитокинови сигнали)
Метаболитни нарушения	Диабет тип 2, Затлъстяване, Метаболитен синдром, Нарушения в обмяната на мастни киселини и лактат
Онкологични заболявания	При митохондриална дисфункция възниква повишен риск от мутации и злокачествена трансформация на клетки
Мускулни заболявания	Митохондриални миопатии, Хронична мускулна слабост и умора
Заболявания на сетивните органи	Пигментен ретинит, Оптична невропатия на Лебер (наследствена загуба на зрение)
Генетични митохондриални синдроми	Синдром на Лей, Синдром на Кеарнс-Сейр, Синдром на Барт

Таблица 1. Обзор на някои заболявания, свързани с митохондриална дисфункция

Участие на микро- и нанопластика (МНП) в механизмите на преждевременно стареене и онкогенеза

Въздействието на нанопластмасата може да предизвиква преждевременно стареене, като се намесва в работата на митохондриите и нарушава генетичните програми на организма. Повредата на митохондриите води до прекомерно образуване на реактивни кислородни форми (ROS), които предизвикват оксидативен стрес. Това разрушава ДНК, нарушава генетичната стабилност, активира възпалителни процеси и ускорява стареенето на тъканите. Освен това, нанопластмасата допринася за скъсяването на теломерите, което ограничава способността на клетките да се делят.

66

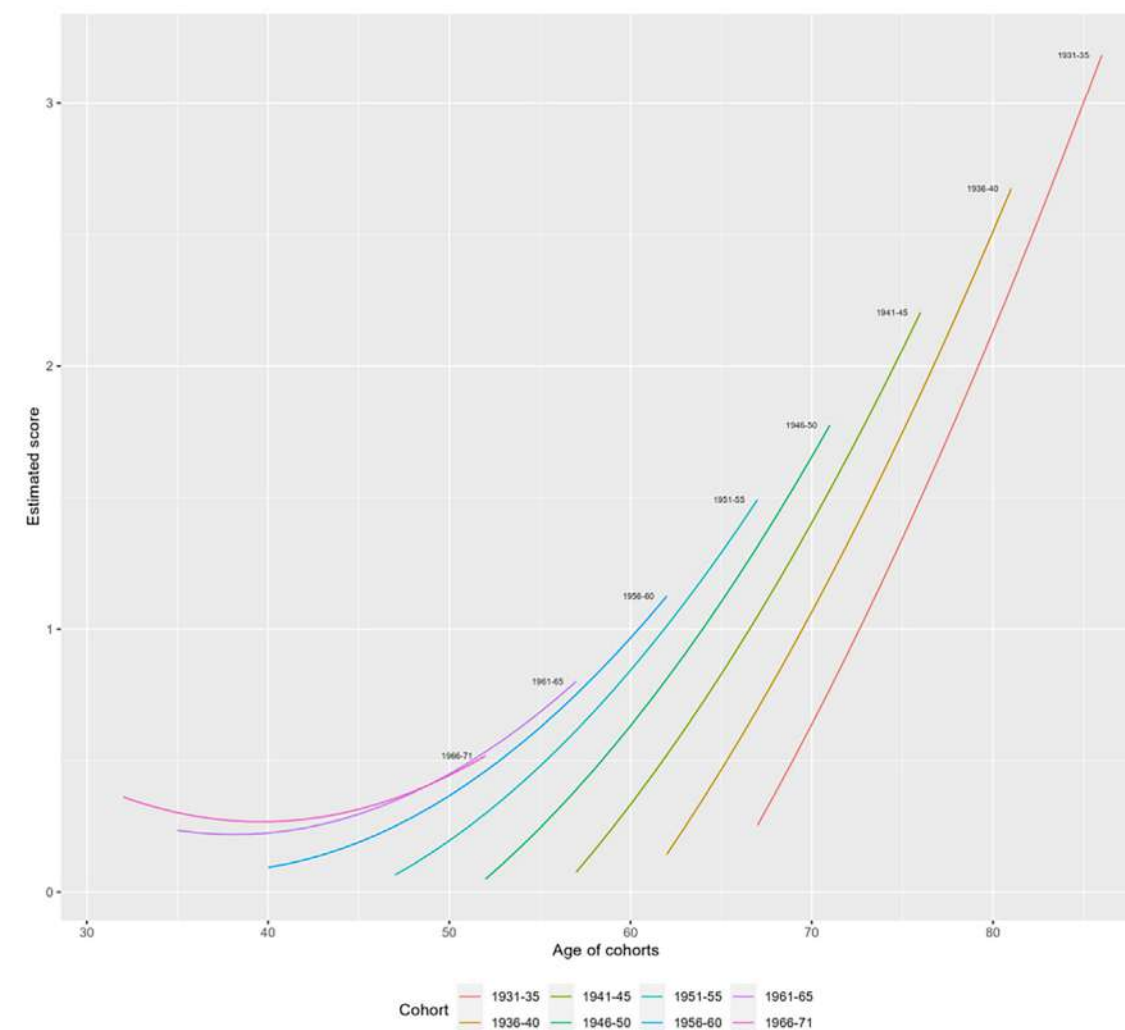
„Ние също така успяхме да покажем при хора как дори една-единствена нуклеотидна промяна в митохондриалната ДНК, свързана с влошена функция на митохондриите и детски митохондриални заболявания, може да ускори процесите на стареене“ — споделя Таошън Хуан, доктор по медицина, доктор по философия, професор и ръководител на отдел „Генетика“ в катедра „Педиатрия“ на Медицинското училище и факултета по биомедицински науки „Джейкъбс“ в Университета на Бъфало. **„Установихме, че реактивните кислородни форми, причинени от лошата функция на митохондриите, с времето водят до натрупване на ДНК-повреди.“**¹⁹³

Епигенетично стареене — това са промените в регулацията на гените, които се случват на нивото на ДНК-модификациите (включване/изключване на гени), но без промяна в самата ДНК. Това е фин „молекулярен таймер“, който може да се засича и който може да върви по-бързо или по-бавно от нормалното стареене. Високата активност на митохондриалната ДНК е свързана с ускорено епигенетично стареене. При някои хора още на 20–30 години биологичната възраст на клетките може да бъде значително по-висока от хронологичната. Тоест организмът старее по-бързо, отколкото трябва.

При хора с митохондриални нарушения още в млада възраст често се появяват болести, свързани с възрастта, като: деменция, сърдечно-съдови заболявания, аритмии, сърдечна недостатъчност. Шотландски учени са установили, че колкото по-късно е роден човек, толкова по-висок е рискът му да се разболее до 50-годишна възраст. Например, при хора, родени между 1956–1960 г., средно има повече заболявания, отколкото при тези, родени по-рано — между 1951–1955 или 1946–1950 г.¹⁹⁴ (фиг. 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> (Accessed May 1, 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>



Фигура 73. Прогнозирани показатели на мултиморбидност по кохорти и възраст.

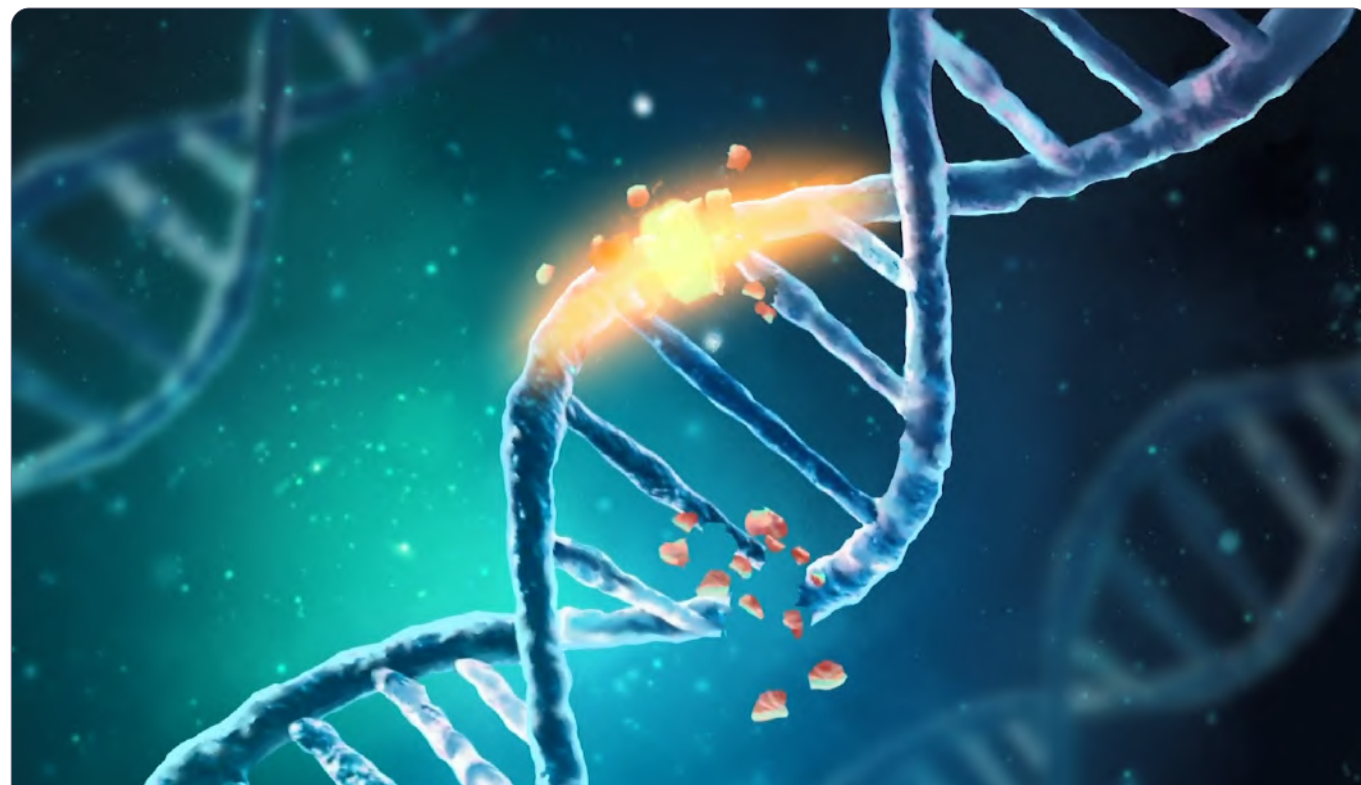
Източник: Шотландско лонгитюдно изследване. Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study. European Journal of Public Health 34,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

Мутации на митохондриалната ДНК при стареене и рак

Ключовите механизми, които лежат в основата на стареенето и развитието на онкологични заболявания, в голяма степен съвпадат. Едно от централните звена е нарушението на функцията на митохондриите — клетъчните органели, отговарящи за производството на енергия. С възрастта в тъканите на човека се натрупват мутации в митохондриалната ДНК (мтДНК), и сходни изменения отдавна са открити при различни форми на рак¹⁹⁵.

Когато в клетката настъпи мутация, това може да промени нейната работа. Например клетката започва да расте и да се дели по-бързо, не умира, дори когато трябва, става „невидима“ за имунната система, по-добре понася недостига на кислород или храна.

Такива клетки получават предимство пред нормалните клетки — живеят по-дълго, делят се по-често, заемат все повече място и започват да доминират над другите. Когато такива клетки се натрупат в голямо количество, може да започне развитието на тумор.



Фигура 74. Увреждания на ДНК, водещи до мутации

Особено уязвими към митохондриални увреждания са постмитотичните клетки — невроните, кардиомиоцитите и някои мускулни клетки. Те не се делят, затова натрупаните с възрастта мутации, особено в митохондриалната ДНК (фиг. 74), остават в клетката през целия ѝ живот.

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>

Постмитотичните клетки са много активни: невроните изразходват много енергия за предаване на сигнали, а клетките на сърцето непрекъснато изпомпват кръв, което означава, че митохондриите работят на предела, произвеждайки голямо количество активни форми на кислород (АФК). Активните форми на кислород увреждат митохондриите, усилвайки производството на нови АФК и задействайки порочен кръг на разрушения.

Уврежданията се натрупват, което може да доведе до стартиране на патологични процеси (например невродегенеративни, сърдечно-съдови заболявания, онкология) и дори до смърт.

Възможно е именно с това да се обяснява фактът, че сърдечно-съдовите заболявания, инфарктите, инсултите и онкологичните заболявания са основни причини за смърт сред всички останали болести. А токсичното действие на нанопластмасата върху човешкия организъм, което се е усилило многократно през последните 10–20 години, обяснява защо тези заболявания са се подмладили и са придобили мащабите на пандемия, отнемайки десетки милиони човешки животи ежегодно. Защото нанопластмасата преди всичко разрушава работата на митохондриите, провокира оксидативен стрес и мутации в митохондриалната и ядрената ДНК.

Дестабилизация на хормоналната система под влияние на МНП

При производството на пластмаси се използват химически вещества, които нарушават работата на ендокринната система и хормоналния баланс. Те са способни да имитират, блокират или изменят действието на естествени хормони, което може да доведе до различни здравословни проблеми.

В човешкия организъм са открити над 3 хиляди химически вещества, използвани в опаковки¹⁹⁶. Около 100 от тези химикали са класифицирани като представляващи „висок риск“ за човешкото здраве.

Бисфенол

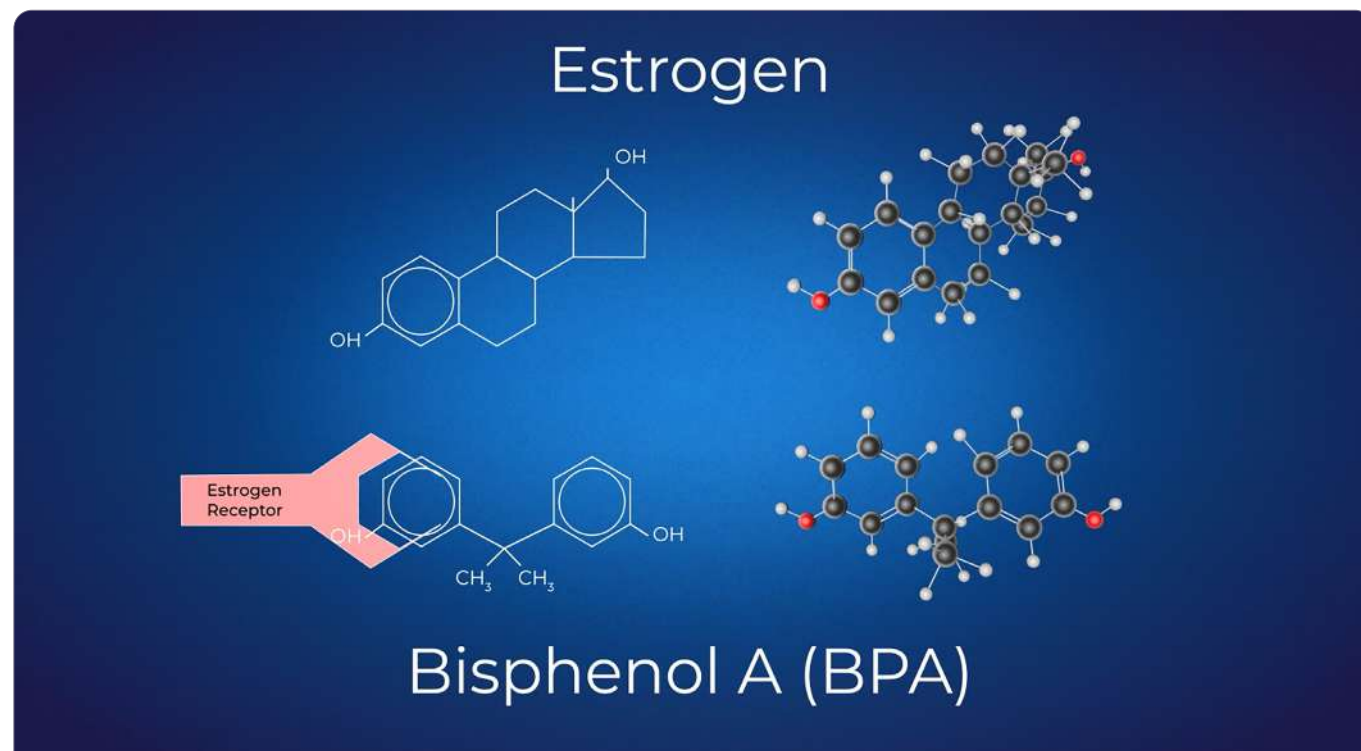
Бисфенол А (ВРА) — синтетичен пластификатор, който се използва широко в поликарбонатна пластмаса (бутилки, контейнери), епоксидни смоли (покритие на консервни кутии) и медицински изделия.

При нагряване ВРА прониква в храната и напитките.

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>

66

„BPA действа като „неконтролируем“ хормон, за да измести естествения хормон, който обикновено участва в този път“ — казва професор Ян Рей, експерт по химични вещества от околната среда в Химическия факултет на Мелбърнския университет (фиг. 75)¹⁹⁷.



Фигура 75. Бисфенол А (C₁₅H₁₆O₂) оказва ендокринно разрушително действие поради структурната си прилика с хормона естроген

Всяка година в целия свят се произвеждат 8 милиона тона бисфенол А, а 100 тона годишно се изхвърлят в биосферата¹⁹⁸.

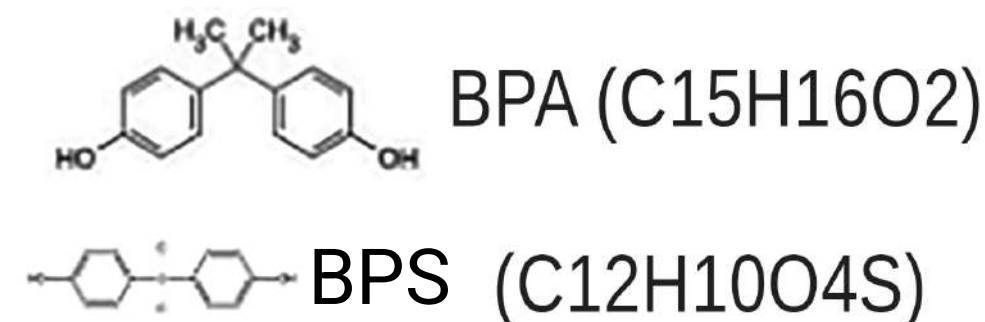
Изследванията показват, че BPA и неговият заместител — бисфенол S (BPS) — нарушават координацията между възбуждащите и задържащите сигнали в нервната система¹⁹⁹. И двете съединения при високи концентрации индуцират сходни патологични ефекти (фиг. 76). Експерименти с мозъчни клетки разкриват, че дори ниски дози BPA/BPS при въздействие в продължение на един месец променят химичното и електрическото предаване на сигнали през синапсите²⁰⁰.

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> (Accessed May 1, 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> (accessed 1 May 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> (Accessed May 1, 2025).



Фигура 76. Молекулярни структури и химически формули на бисфенол А (BPA) и бисфенол S(BPS)

През 2023 година в хода на изследване беше установено, че децата със синдром на дефицит на внимание и хиперактивност имат по-високи нива на бисфенол А и фталат в сравнение с деца, които нямат това състояние²⁰¹.

Учени от Института по неврология и психично здраве „Флори“ в Мелбърн установиха шесткратно увеличение на риска от аутизъм до 11-годишна възраст при момчета, чиито майки са имали високо ниво на BPA в късните срокове на бременността²⁰².

66

„BPA може да наруши хормонално контролираното развитие на мозъка на мъжкия плод по няколко начина, включително чрез потискане на ключовия ензим ароматаза, който контролира нейните хормони и е особено важен за развитието на мозъка на мъжкия плод“ — казва професор Понсонби.

„Изглежда, това е част от пъзела на аутизма“¹⁹⁷

Потискането на ензима ароматаза може да обясни половата диспропорция при аутизма: 4–5 момчета на 1 момиче²⁰³. Момчетата по-рядко развиват аутизъм, но в същото време го понасят в по-тежка форма²⁰⁴.

Бисфенол А (BPA) също така допринася за развитието на диабет тип 2, предизвиквайки хипергликемия и инсулинова резистентност²⁰⁵. Световната смъртност от захарен диабет продължава неотклонно да расте (фиг. 77).

²⁰¹EarthDay.org. Babies vs. Plastics Report. (2023) <https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know> (Accessed May 1, 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>

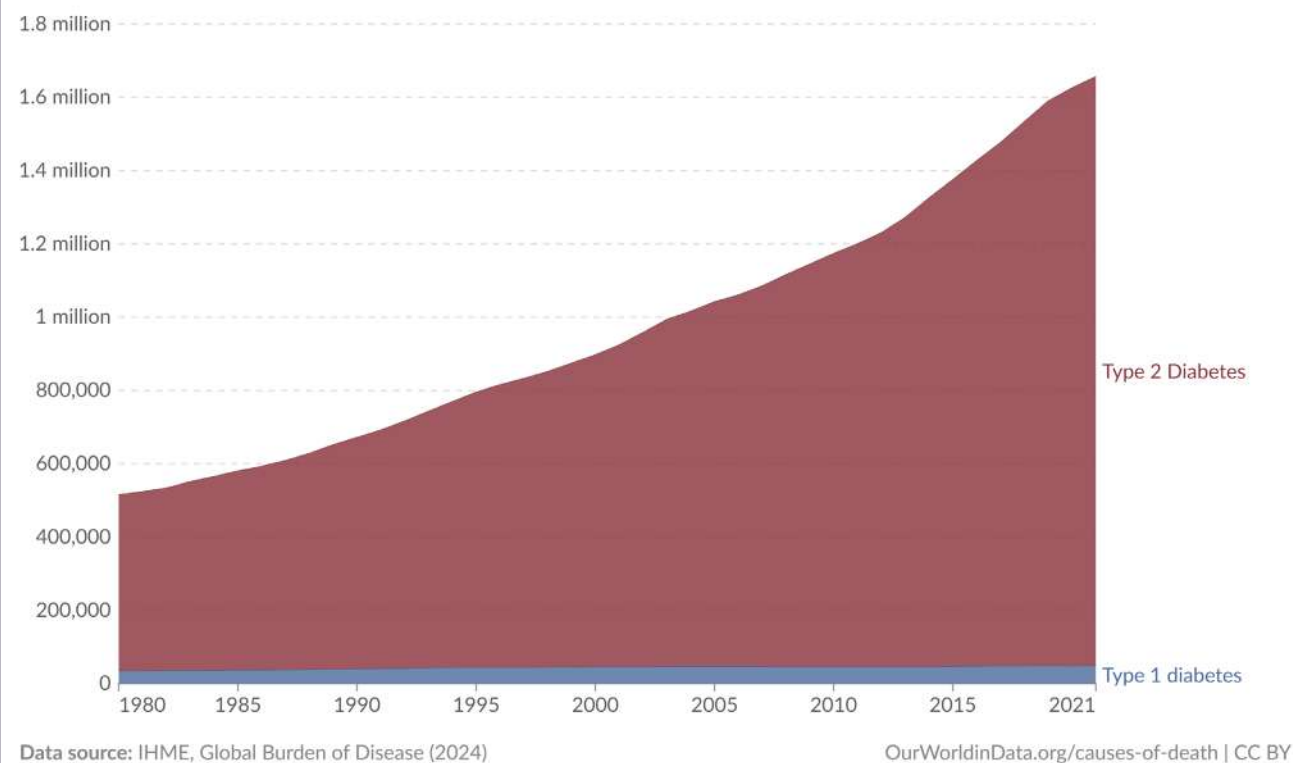
²⁰³Zeidan, J. et al. Global prevalence of autism: A systematic review update. Autism Research 15, 778–790 (2022). <https://doi.org/10.1002/aur.2696>

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

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.



Фигура 77. Смъртност от захарен диабет по тип, Свят, 1980–2021 г.

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

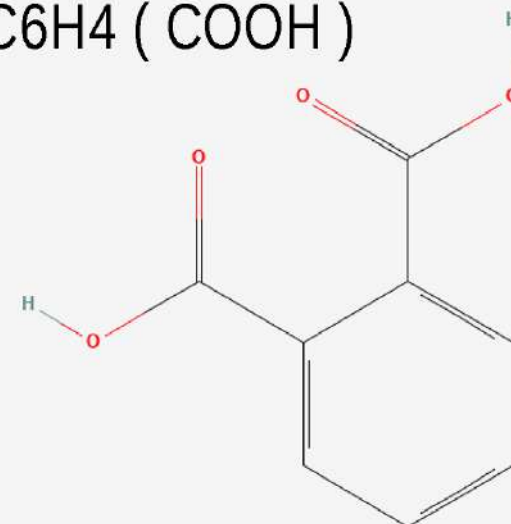
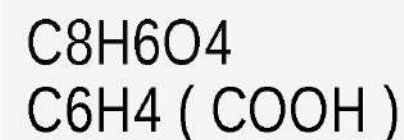
Фталати

Фталатите са група химически съединения, използвани основно като пластификатори — тоест вещества, които правят пластмасите, като поливинилхлорид (ПВХ), по-гъвкави, меки и издръжливи.

Фталатите се използват широко в индустрията и бита, но способността им да се намесват в работата на ендокринната система буди сериозна загриженост²⁰⁶.

Молекулярна формула (фиг. 78). Фталатите не са хормони, но могат да потискат действието на андрогените (например тестостерон), което е особено критично за мъжкото развитие. Под тяхното въздействие се наблюдава намалена подвижност на сперматозоидите, аномалии в развитието на половите органи (например крипторхизъм при новородени). При мъже, признати за безплодни, е открита по-висока концентрация на фталати.

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>



Фигура 78. Изображение на химичната структура.

Източник: PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1017#section=2D-Structure> (Дата на достъп: 01.05.2025).

При жените се нарушава менструалният цикъл, повишава се рискът от спонтанни аборти и преждевременни раждания. Въздействието върху плода по време на бременност може да доведе до забавяне в развитието на мозъка, понижен IQ, поведенчески проблеми²⁰⁷.

Учени са демонстрирали причинно-следствена връзка между фталатите от околната среда (токсични химикали, които се съдържат в ежедневни потребителски стоки) и повишения растеж на маточни фибромиоми — най-разпространените тумори сред жените²⁰⁸.

Въздействието на фталатите, съдържащи се в пластмасите, увеличава риска от развитие на детски онкологични заболявания с 20%, с троен ръст на случаите на злокачествени образувания на костите и двойно увеличение на честотата на лимфомите²⁰⁹.

Изследване с участието на над 5000 американски майки показва, че фталатите са свързани с риск от раждане на деца с ниско тегло и преди термин²¹⁰. Тези фактори умерено повишават вероятността за смъртност при новородени, а също така могат да влияят на успеваемостта на децата, да увеличат риска от сърдечносъдови заболявания, диабет, както и психични разстройства като аутизъм и СДВХ (синдром на дефицит на вниманието и хиперактивност)²¹¹ при децата.

²⁰⁷Welch, 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>

²⁰⁸Iizuka, 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>

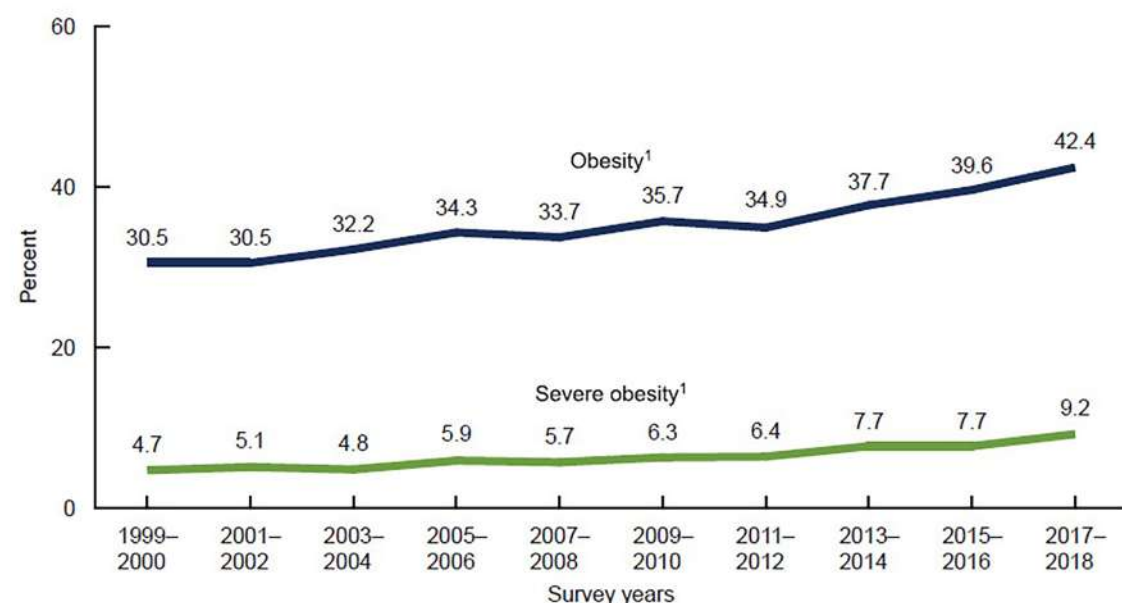
²⁰⁹Ahern, T. P. et al. Medication-Associated Phthalate Exposure and Childhood Cancer Incidence. JNCI: Journal of the National Cancer Institute 114, 885–894 (2022). <https://doi.org/10.1093/jnci/djac045>

²¹⁰Trasande, 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)

²¹¹Baker, 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>

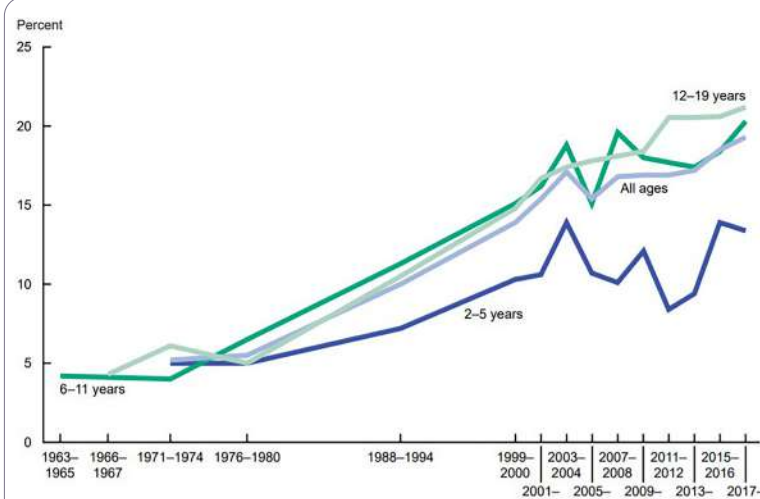
Химичните добавки в пластмасите допринасят за развитието на затлъстяване²¹². Според данни на СЗО, в периода 1990–2020 г. нивото на затлъстяване сред възрастните по света се е увеличило повече от два пъти, а сред подрастващите – четирикратно²¹³.

Тенденции в затлъстяването сред възрастни и младежи в САЩ (фиг. 79–80).



Фигура 79. Тенденции в разпространението на затлъстяване и тежка форма на затлъстяване сред възрастни на 20 и повече години с корекция по възраст: Съединени щати, 1999–2000 – 2017–2018 г.

Източник: 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 на достъп: 01.05.2025).



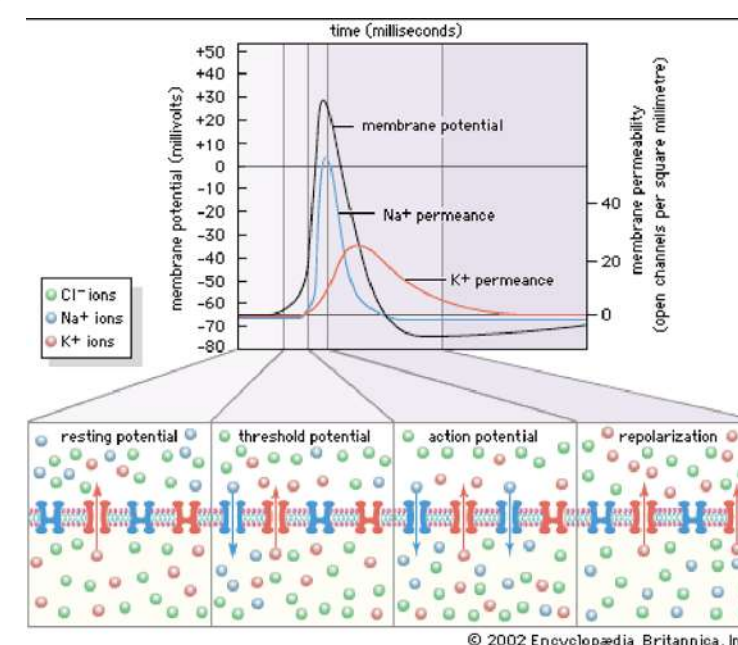
Фигура 80. Тенденции на затлъстяване сред деца и подрастващи на възраст от 2 до 19 години, по възрастови групи: САЩ, 1963–1965 – 2017–2018 г.

Източник: 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>

Електростатичният заряд на нанопластмасата като ключов фактор за неговата повишена токсичност за човешкия организъм

Човешкият организъм постоянно произвежда биоелектрическа енергия. Всички физиологични процеси — от сърдечната дейност и сетивно възприятие до по-високите когнитивни функции — се определят от химични реакции, предизвикани от движението на електрически заряди. Вътре- и извънклетъчните течности, в които се намират белтъци, се състоят предимно от вода, която притежава електрополярни свойства. Поради това електростатичните взаимодействия, включително водородни връзки, йонни връзки и хидрофобно подреждане, играят ключова роля в оформянето на структурите на клетъчните белтъци, необходими за тяхното функциониране и, като следствие, за поддържането на жизнената дейност на организма²¹⁴.

Биоелектричеството играе пряка роля във функционирането на клетките чрез взаимодействието с йонните канали и мембранните потенциали. Всяка клетка поддържа разлика в електрическия потенциал между вътрешната и външната си среда — мембранен потенциал в покой, който се осигурява от разликата в концентрациите на йони вътре и извън клетката (фиг. 81). Основните видове йонни канали, присъстващи в човешкия организъм, включват натриеви, калиеви, калциеви и хлоридни канали. Тези канали, заедно с мембрания потенциал, осигуряват ключови функции на различните типове клетки (фиг. 82, 83).



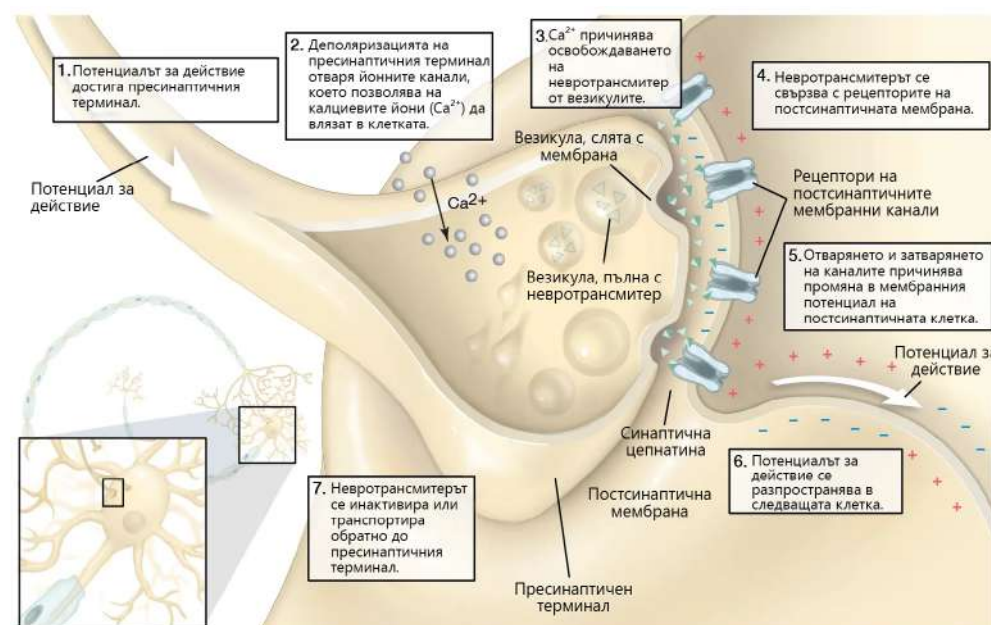
Фигура 81. Йонна проницаемост и потенциал на действие. Промени в йонната проницаемост, лежащи в основата на потенциала на действие. Електрическият потенциал е показан вляво в миливолтове, а йонната проницаемост вдясно — в отворени канали на квадратен милиметър. При потенциал в покой мембраният потенциал е близък до E_K , равновесния потенциал на K^+ . Когато натриевите канали се отворят, мембраната се деполяризира. Когато деполяризацията достигне прагова стойност, се задейства потенциалът на действие. Генерирането на потенциала на действие приближава мембрания потенциал до E_{Na} , равновесния потенциал на Na^+ . Когато натриевите канали се затварят (намалявайки проницаемостта за Na^+), а калиевите канали се отворят (увеличавайки проницаемостта за K^+), мембраната се реполяризира.

Източник: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). <https://www.britannica.com/science/neuron>

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>

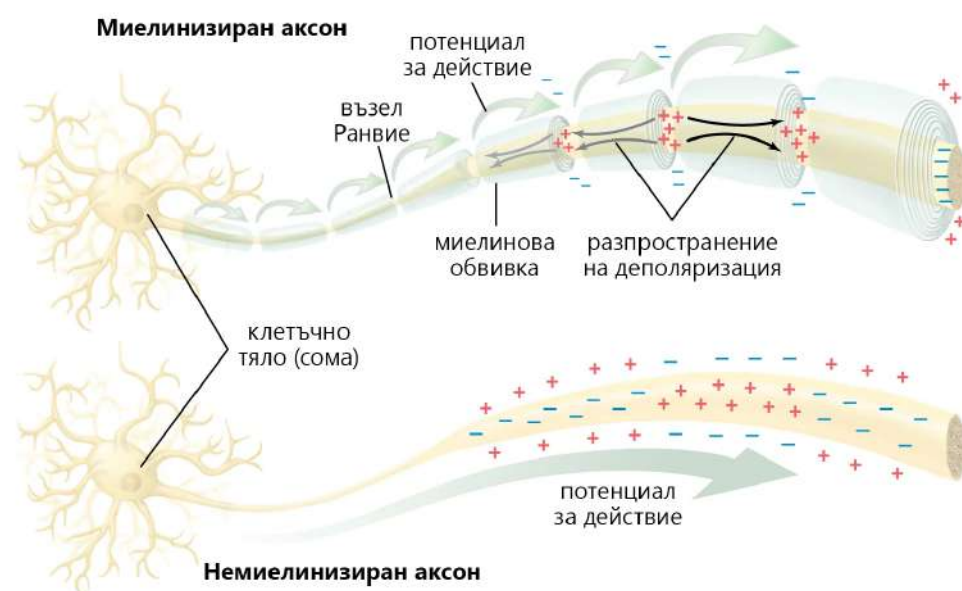
²¹³World Health Organization. Obesity and overweight. WHO Fact Sheets. (2025) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight> (Accessed May 10, 2025).

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> (Accessed May 1, 2025).



Фигура 82. Синапс. Химическо предаване на нервния импулс в синапса. Постъпването на нервния импулс в пресинаптичното окончание стимулира освобождаването на невротрансмитери в синаптичната цепка. Свързването на невротрансмитерите с рецепторите на постсинаптичната мембрана стимулира регенерацията на потенциала на действие в постсинаптичния неврон.

Източник: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). <https://www.britannica.com/science/neuron>



Фигура 83. Неврон. Провеждане на потенциала за действие.

В миелинизирания аксон миелиновата обвивка възпрепятства локалния ток (малки черни стрелки) да преминава през мембраната. Това принуждава тока да се движи надолу по нервните влакна до немиелинизираните възли на Ранвие, които имат висока концентрация на йонни канали. При стимулиране тези йонни канали предават потенциала на действие (големи зелени стрелки) към следващия възел. По този начин потенциалът на действие „скача“ по влакното, тъй като се регенерира във всеки възел – процес, наречен скокова проводимост. В немиелинизирания аксон потенциалът на действие се разпространява по цялата мембрана, като затихва, докато дифундира (прониква) обратно през мембраната в изходната деполаризирана област).

Източник: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). <https://www.britannica.com/science/neuron>

Биоелектричеството, което възниква в човешкия организъм (например при работата на мускулите или предаването на нервни импулси), не вреди на човека, тъй като е естествена част от физиологичните процеси. Когато обаче микро- и нанопластмасите попаднат в организма, те носят със себе си електростатичен заряд, който могат да задържат за продължителен период от време. Именно този заряд представлява потенциален риск за здравето, тъй като нарушава жизненоважни биологични функции.

Нанопластмасата представлява частици, по-малки от 1 микрометър. Благодарение на уникалната си структура те могат да натрупват електростатични заряди, което ги прави обект на все по-голямо внимание от страна на учените.

Когато микро- или нанопластмасовите частици се наелектризират чрез трибоелектричния ефект (в резултат на контакт и триене с други повърхности), те придобиват електростатичен заряд – положителен или отрицателен. Този заряд влияе върху това как частиците се държат в организма и околната среда.

Уникалната структура на нанопластмасовите частици им позволява да абсорбират замърсяващи вещества, йони и органични молекули, което засилва ролята им на преносители на токсини в екосистемите^{215, 216}.

Химическият състав на нанопластмасата играе ключова роля във формирането на неговите електростатични свойства: такива полимери като полистирол (PS), полиетилен (PE) или полипропилен (PP) често съдържат функционални групи – карбоксилни ($-\text{COOH}$), сулфатни ($-\text{SO}_3\text{H}$) или аминоксигрупи ($-\text{NH}_2$), – които могат да се йонизират в зависимост от условията на средата. Например, изследване, публикувано в списание Langmuir, показва, че полистироловите наночастици с карбоксилни групи (PS-COOH) имат отрицателен зета-потенциал, а с аминоксигрупи (PS-NH_2) – положителен, което потвърждава влиянието на функционалните групи върху заряда на нанопластмасата²¹⁷.

Процесът на натрупване на заряд не се ограничава само до химичните свойства. По време на производствени или механични процеси, като например триене, нанопластмасите могат да се зареждат чрез контактно наелектризиране. Изследване, проведено върху пластмасови контейнери, установява, че полистиролът е способен да натрупа заряд до -10 kV , който се задържа продължително време и привлича противоположно заредени частици, като прах или бактериални спори²¹⁸. Освен това промените в структурата на полимера – например наличието на полярни групи – позволяват на нанопластмасите да имат положителен или отрицателен заряд в зависимост от pH на околната среда. В киселинна среда аминоксигрупи могат да придават на частиците положителен заряд, докато в алкална среда карбоксилните групи преобладават и придават отрицателен заряд – констатации, което е потвърдено от изследвания върху растения *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., Avers, 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, X.D., Yuan, X.Z., 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>

По този начин разбирането на структурата на нанопластмасата и нейните електростатични характеристики не само разкрива нейната физическа природа, но и поставя основата за анализ на това как нейните частици могат да влияят на екосистемите и организмите, което ще бъде разгледано по-нататък в контекста на техните патогенни механизми.

Благодарение на високата диелектрична проникваемост (способността да задържа електрически заряд) нанопластмасата, попаднала в организма, продължава да натрупва нови вредни заряди, които при нормални условия се неутрализират или разсейват чрез естествените проводими системи на организма.

Това нарушава процесите на саморегулация на организма, създавайки риск за клетъчните структури поради продължителното въздействие на аномална електростатична енергия.

За да се оцени мащабът на заплахата от попадналата в организма нанопластмаса, може отново да се обърне внимание на биоелектрическите системи на организма – сложни механизми, в които електрическите импулси служат като език за междуклетъчна комуникация.

Всяко движение и мисъл са възможни благодарение на невидими сигнали, които предават команди на клетките. Невроните обменят информация чрез електрически импулси, мускулите се свиват в отговор на тези сигнали, а мозъкът обработва данни чрез комбинация от биоелектрически и химически процеси. Дори дишането, рефлексите, зрението и слухът зависят от малки електрически разряди, които регулират работата на органите.

Тези невидими токове, усъвършенствани в продължение на милиони години еволюция, превръщат биоелектрическите импулси в езика на живота. Но тяхната хармония се нарушава от чуждите елементи – микроскопичните частици нанопластмаса.

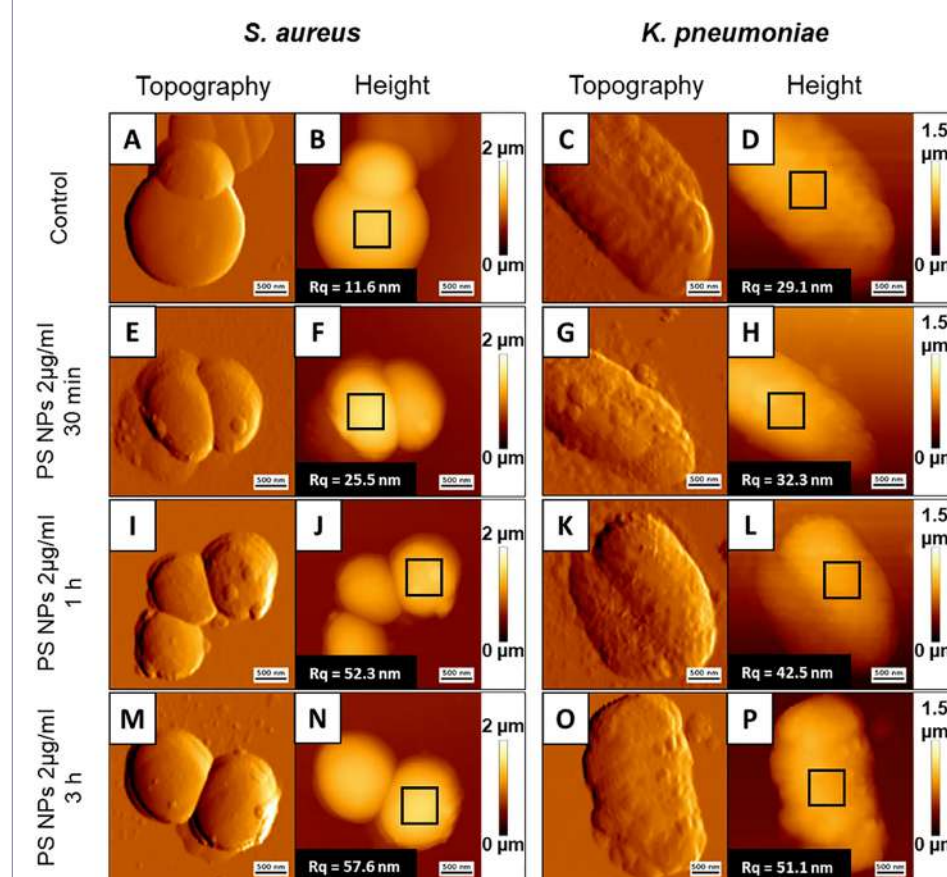
Веднъж попаднали в тялото, нанопластмасите могат да абсорбират йони и да създадат зони с аномална електропроводимост, нарушавайки естествения йонен баланс и процесите на локална неутрализация на заряда, които се регулират от междуклетъчната течност. Абсорбцията на йони върху повърхността на нанопластмасовите частици води до натрупване на електростатичен заряд върху тези частици. Това явление може да провокира оксидативен стрес чрез генериране на активни форми на кислорода (АФК), както и да наруши електрохимичната комуникация между клетките, което негативно влияе върху тяхната функция.

Това се потвърждава от изследване²²⁰, в което полистиролови частици с размер 100 nm, дори в присъствието на натриеви йони (Na⁺), запазват стабилност и се абсорбират на повърхността на бактерии, въпреки техния отрицателен заряд. Например експерименти с *Staphylococcus aureus* и *Klebsiella pneumoniae* показват, че нанопластмасата значително променя зета-потенциала на клетките, правейки повърхността им по-отрицателно заредена и по този начин нарушава естествения електростатичен баланс.

²²⁰ Zając, 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>

Заредени частици нанопластмаса могат да влияят на електрическите полета около клетките, изкривявайки предаването на сигнали. Това прилича на смущения в радиовръзката: вместо ясни команди – хаотичен шум, който пречи на клетките да обменят информация. Въпреки че директното въздействие върху нервните клетки не е изследвано и заключенията за влиянието върху човека са предварителни и изискват допълнителни проучвания, промяната на повърхностния заряд на бактериите показва, че нанопластмасата е способна да модифицира електрохимичните свойства на мембраните. Например при концентрации над 64 микрограма на милиметър, частици полистирол предизвикват значителни смени на зета-потенциала, което потенциално може да наруши работата на йонните канали или рецептори, които са важни за междуклетъчната комуникация.

Способността на наночастиците да „залепват“ за повърхности, както показват снимките от атомно-силова микроскопия в споменатото изследване (фиг. 84), създава риск от дългосрочно въздействие. Частиците, натрупващи се в тъканите, могат да формират устойчиви електростатични аномалии, които натриевите и калиевите йони не могат напълно да неутрализират, особено ако нанопластмасата проникне вътре в клетките, заобикаляйки защитните механизми на междуклетъчната течност.



Фигура 84. Топография на повърхността (A, C, E, G, I, K, M, O) и изображения на височината (B, D, F, H, J, L, N, P) на щама *S. aureus* ATCC 6538 и щама *K. pneumoniae* ATCC 4352, подложени на въздействие от наночастици полистирол с размер 100 nm в дози по 2 мкг/мл в продължение на 0,5 ч (E–H), 1 ч (I–L) и 3 ч (M–P) в сравнение с необработения контрол (A–D). Скала – 500 nm. Вътре в панелите са маркирани области (черни квадратчета), от които е изчислена средноквадратичната грапавина на повърхността и стойностите на грапавината (параметър Rq) на измерените повърхности на бактериите (средноквадратичен корен на височината на профила по дължината на оценката).

Източник: Zając, 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>

Също така опасността от патогенния заряд, натрупан върху нанопластмасата, се състои в това, че той може да създава около имунните клетки електрически смущения, което се потвърждава от изследване²²¹, в което е показано, че положително заредените нанопластмаси (PS-NH₂) значително намаляват жизнеспособността на имунните клетки и стабилността на лизозомалните мембрани в сравнение с отрицателно заредените (PS-COOH), което подчертава важността на заряда при тяхното взаимодействие с клетките.

Електростатично заредените частици на МНП притежават повишена способност да се абсорбират върху клетъчни мембрани, тъкани и други биологични повърхности, буквално прилепвайки към тях — това повишава риска от механични и химични увреждания на клетките, нарушавайки тяхната структура и функции.

Електростатичният заряд може да улесни проникването на частиците МНП през такива сложни биологични бариери като кръвно-мозъчната или хематоплацентарната. В резултат токсините могат да достигнат до главния мозък или плода, което повишава риска от невропатологични ефекти и нарушения в развитието на плода.

Електростатичното въздействие на нанопластмасата може да наруши структурата и функционирането на белтъци, йонни канали, клетъчни рецептори, което от своя страна ще доведе до нарушения в предаването на сигнали между клетките, ще задейства окислителен стрес и ще отслаби имунната защита на организма.

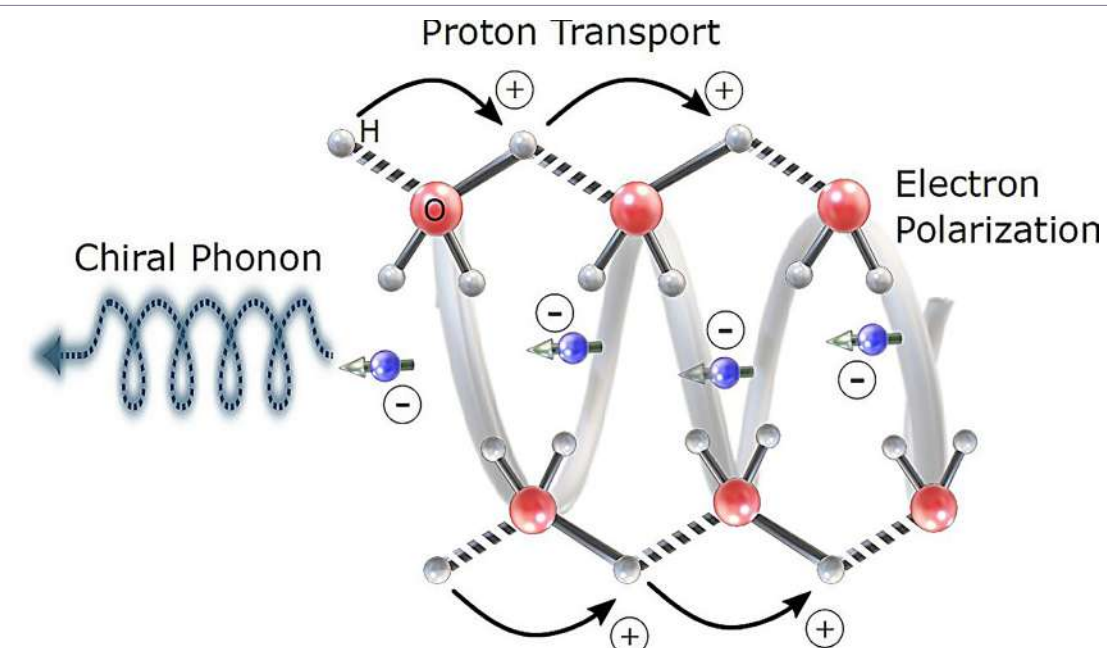
Тези изменения могат да провокират каскада от патологични процеси, включително хронични възпаления, невродегенеративни разстройства, развитие на злокачествени тумори и системна дисфункция на организма, значително увеличавайки риска от тежки заболявания.

По този начин, натрупването на електростатичен заряд върху нанопластмасата — това не е просто физическо явление, а механизъм, който засилва опасността от МНП. Особено като се има предвид фактът, че върху МНП електростатичният заряд може да се задържи изключително дълго време, а самите частици микро- и нанопластмаса практически не се извеждат от организма.

Изучаването на този феномен в момента е изключително важно, тъй като води към разбирането на това, как зарядите на патогенното електричество, натрупани върху нанопластмасата, могат да се превърнат в макроскопична заплаха за съществуването на човешкия вид като такъв.

До неотдавна се считаше, че основата на клетъчната енергетика — преносът на протони — се определя изключително от химията: протоните сякаш „прескачат“ от една водна молекула на друга. Обаче ново изследване, публикувано в *Proceedings of the National Academy of Sciences*, радикално променя това разбиране. Оказва се, че транспортът на протони в живите организми зависи не само от химичните свойства, но и от квантовите — в частност от спина на електроните и хиралността на биологичните молекули (фиг. 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>



Фигура 85. Схематичен модел-играчка. Преносът на протони е съпроводен с електронна поляризация в хирални среди. Поради ефекта CISS тази електрическа поляризация поражда спинова поляризация. Запазването на ъгловия момент генерира хирални фонони, които усилват преноса на протони.

Източник: 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>

Изследване, проведено от израелски учени от Еврейския университет, показва: в белтъци като *лизозим* преносът на протони значително се ускорява при въвеждане на електрони с „правилния“ спин — и, напротив, се забавя при противоположен. Това се обяснява с факта, че в живите системи протоните и електроните се държат като съгласуван квантов механизъм. Дори минимални промени в тяхната спинова ориентация могат да повлияят на фундаментални процеси — производството на енергия, обмяната на веществата, регулацията вътре в клетката.

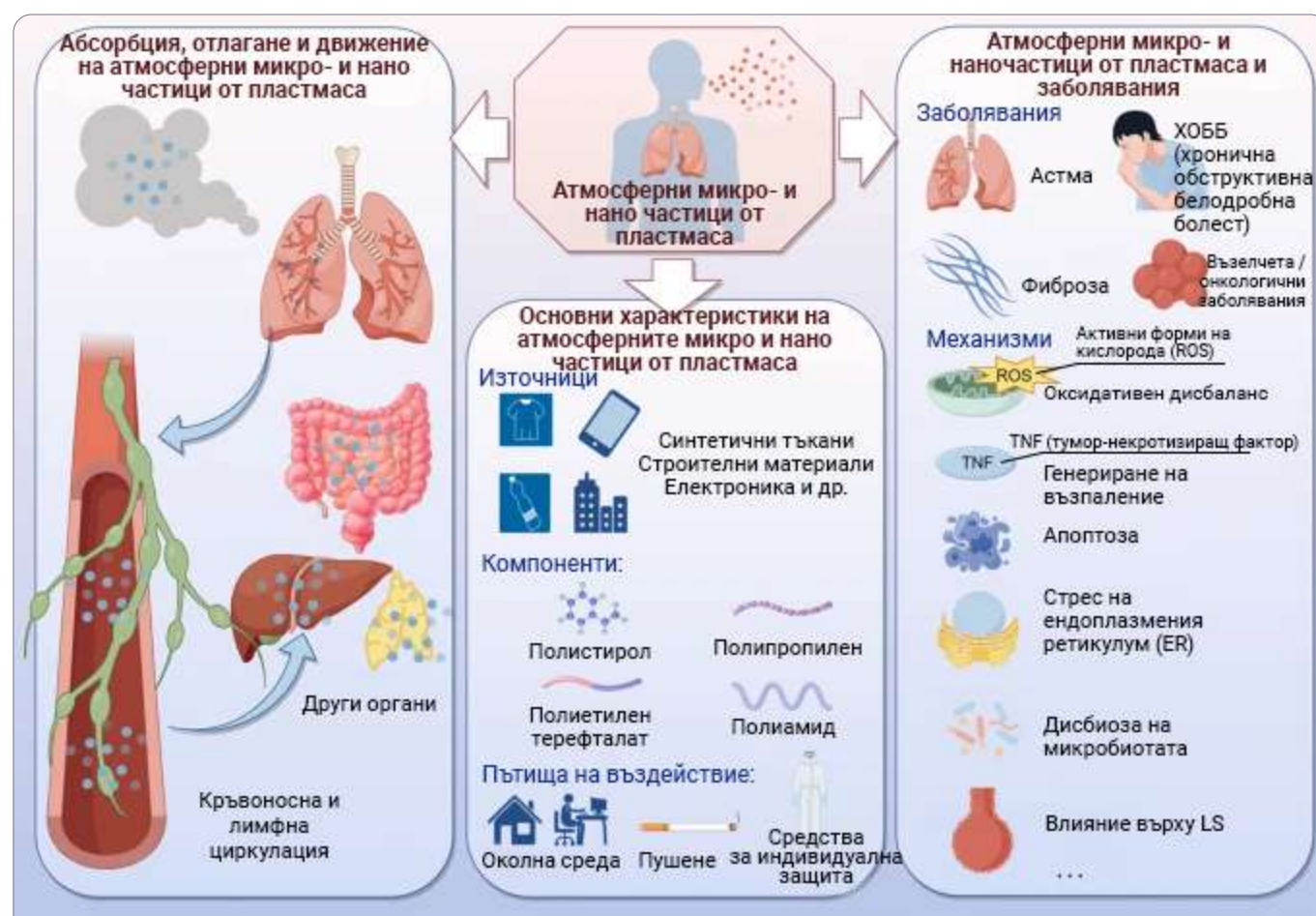
66

Както отбелязва ръководителят на изследването, Наам Горен: „**Нашите резултати показват, че начинът, по който се преместват протоните в биологичните системи, се отнася не само до химията, но и до квантовата физика.**“ А това означава, че дори най-малките смущения в електрическия заряд или магнитната ориентация могат да повлияят на метаболизма на клетките, производството на енергия и общото здравословно състояние²²².

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> (Accessed May 10, 2025).

Системно въздействие на МНП върху органите и функционалните системи на човека

Веднъж попаднали в човешкото тяло, микро- и нанопластмасите (МНП) циркулират в кръвообращението и достигат до всички органи и тъкани. (фиг. 86). Пластмасови частици са открити в кръвта на човека, в сърдечната и костната тъкан, в мозъка, в плацентата, белите дробове, черния дроб и други органи²²³.



Фигура 86. Постъпване на МНП в организма на човека чрез дишането и токсичните ефекти върху човешкия организъм.

Източник: 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>

Механизми на увреждане на дихателната система при вдишване на МНП

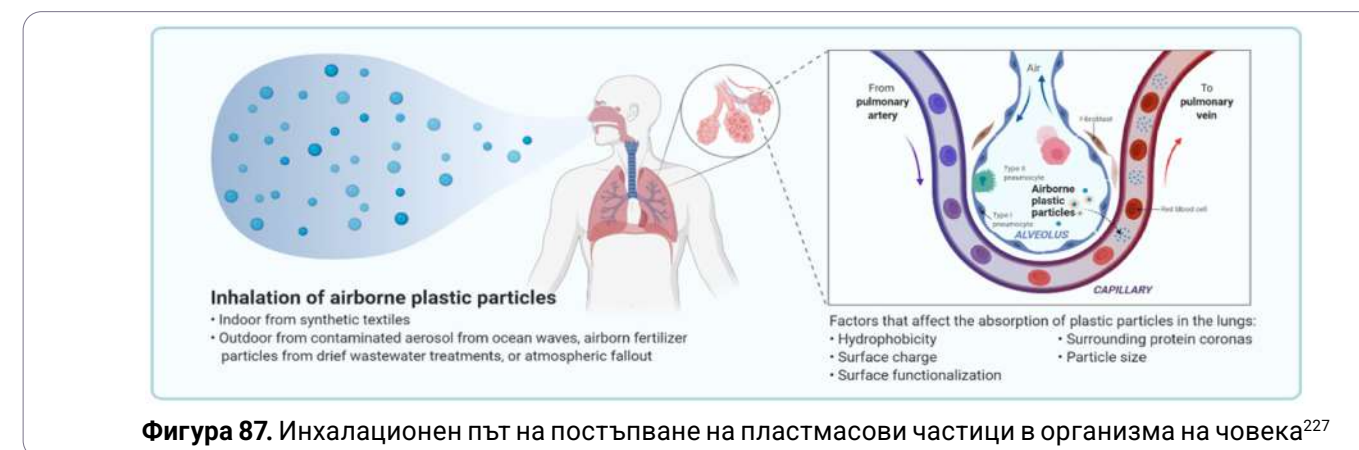
Един от основните пътища за постъпване на МНП в организма на човека е дишането.

Резултатите от изследване на китайски учени²²⁴ показват, че за два часа активно прекарано време на открито възрастните вдишват около 106 000 частици микропластмаса, а децата — около 73 700.

Поради термодинамичните си свойства частиците, по-малки от 0,1 микрометра, могат ефективно да се отлагат в целия дихателен тракт (от горните дихателни пътища до алвеолите)²²⁵.

Белите дробове имат обширна алвеоларна повърхност (около 150 м²) и тънък тъканен бариер (по-малко от 1 μm), което позволява на нанопластмасата лесно да прониква в кръвния поток (фиг. 87).

В 13 от 20 проби от човешка белодробна тъкан е открит микропластмаса (МП)²²⁶.



Фигура 87. Инхалационен път на постъпване на пластмасови частици в организма на човека²²⁷

Според данни от изследване, при 22 пациенти с белодробни заболявания във всички проби от храчки е открит микропластмаса²²⁸: от 18,75 до 91,75 частици/10 мл²²⁹. Установена е също и връзка между алергичния ринит и микропластмасата²³⁰.

МНП са тясно свързани с възникването и развитието на различни респираторни заболявания, включително астма, фиброза на белите дробове, хронични обструктивни белодробни болести и тумори²²⁹. Изследването показва, че 97% от пробите от злокачествени белодробни тумори съдържат влакна от микропластмаса²³¹.

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> (Accessed May 1, 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-Lorenço, 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>

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>

Възможните механизми включват окислителен стрес, възпаление и дисбаланс на микробиотата на белите дробове. МНП могат да предизвикат възпаление на белите дробове²³².

Според доклад на СЗО, инфекциите на долните дихателни пътища продължават да бъдат най-смъртоносно инфекциозно заболяване в света и заемат пето място сред всички причини за смъртност²³³. А броят на смъртните случаи от рак на трахеята, бронхите и белите дробове се е увеличил и вече е на шесто място сред водещите причини за смърт.

Невротоксично действие на МНП.

Увреждане на централната и периферната нервна система

Изследванията потвърждават, че неврологичните разстройства са основната причина за физическата и когнитивна инвалидност в целия свят и в момента засягат приблизително 3,4 милиарда души. Абсолютният брой на пациентите значително се е увеличил през последните 30 години²³⁴. Освен това се очаква, че тежестта на хроничните невродегенеративни заболявания ще се удвои поне в рамките на следващите две десетилетия. Според данни на Световната здравна организация (СЗО), всеки осми човек в света страда от психично разстройство²³⁵.

Заболеваемостта от биполарно разстройство сред тийнейджъри и млади хора по света се е увеличила от 79,21 на 100 000 население през 1990 г. до 84,97 на 100 000 население през 2019 г.²³⁶ През последните три десетилетия се наблюдава увеличаване на заболеваемостта както сред мъжете, така и сред жените (фиг. 88). Изследванията показват увеличение на психичните разстройства сред деца и подрастващи през последните години. Според доклад от 2022 г. за националното качество и различията в здравеопазването, от 2016 до 2019 г. броят на посещенията в спешни отделения по причини, свързани с психичното здраве сред деца на възраст 0–17 години се е увеличил от 784,1 до 869,3 на 100 000. Освен това, от 2008 до 2020 г. нивото на смъртност от самоубийства сред лица на 12 и повече години се е увеличило с 16%, от 14,0 до 16,3 на 100 000²³⁷.

Според доклада на медицинската застрахователна компания *Blue Cross Blue Shield*, от 2013 г. броят на диагнозите за клинична депресия, известна още като голяма депресия, се е увеличил с 33%. Някои източници вече започват да прогнозират, че до 2030 г. депресията ще стане основната причина за загуба на продължителността на живота или на самия живот. Жените и мъжете, страдащи от депресия, средно могат да загубят до 9,6 години здравословен живот, се казва в доклада²³⁸.

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> (Accessed May 1, 2025).

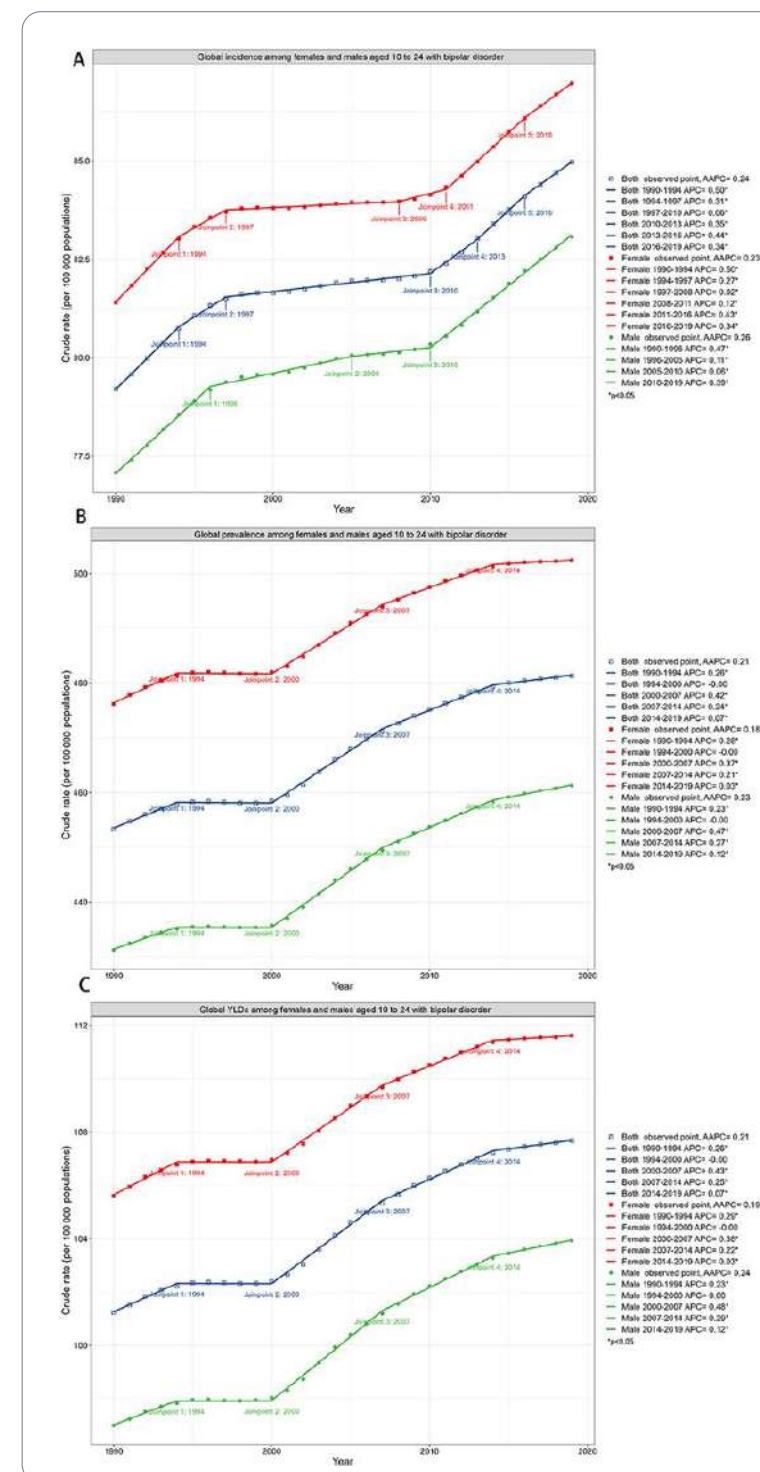
²³⁴Van Schependom, J. & D'haeseleer, M. Advances in Neurodegenerative Diseases. *Journal of Clinical Medicine* 12, 1709 (2023). <https://doi.org/10.3390/jcm12051709>

²³⁵World Health Organization. Mental disorders. WHO Fact Sheets. (2022) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 2025).

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



Фигура 88. Регресионен анализ на точките на свързване на глобалната заболеваемост от биполарно разстройство, разпространението и годините, преживени с инвалидност (YLDs) сред всички юноши и млади хора на възраст 10–24 години за периода 1990–2019 г. * $p < 0,05$; AAPC — средногодишна процентна промяна; APC — годишна процентна промяна; YLDs — години, преживени с инвалидност.

Източник: 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>

През последните десетилетия броят на диагнозите синдром на дефицит на вниманието и хиперактивността (СДВХ) непрекъснато расте. Националните проучвания на населението в САЩ отразяват увеличение на разпространението от 6,1% до 10,2% през 20-годишния период от 1997 до 2016 г.²³⁹ (фиг. 89).

Обзор от 2023 г., обхващащ 31 страни, установява, че нивото на грамотност и уменията по смятане намаляват²⁴⁰ (фиг. 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>

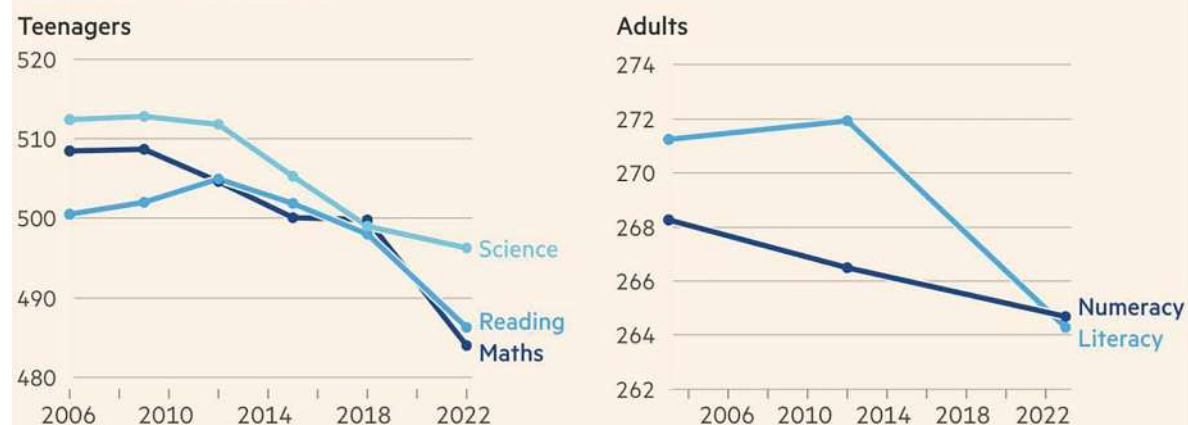
²⁴⁰Organisation for Economic Co-operation and Development. Do adults have the skills they need to thrive in a changing world? OECD Publications. (2024) https://www.oecd.org/en/publications/do-adults-have-the-skills-they-need-to-thrive-in-a-changing-world_b263dc5d-en.html (Accessed May 1, 2025).



Фигура 89. Графика на растежа на СДВХ от 1997 до 2016 г.
Източник: 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)



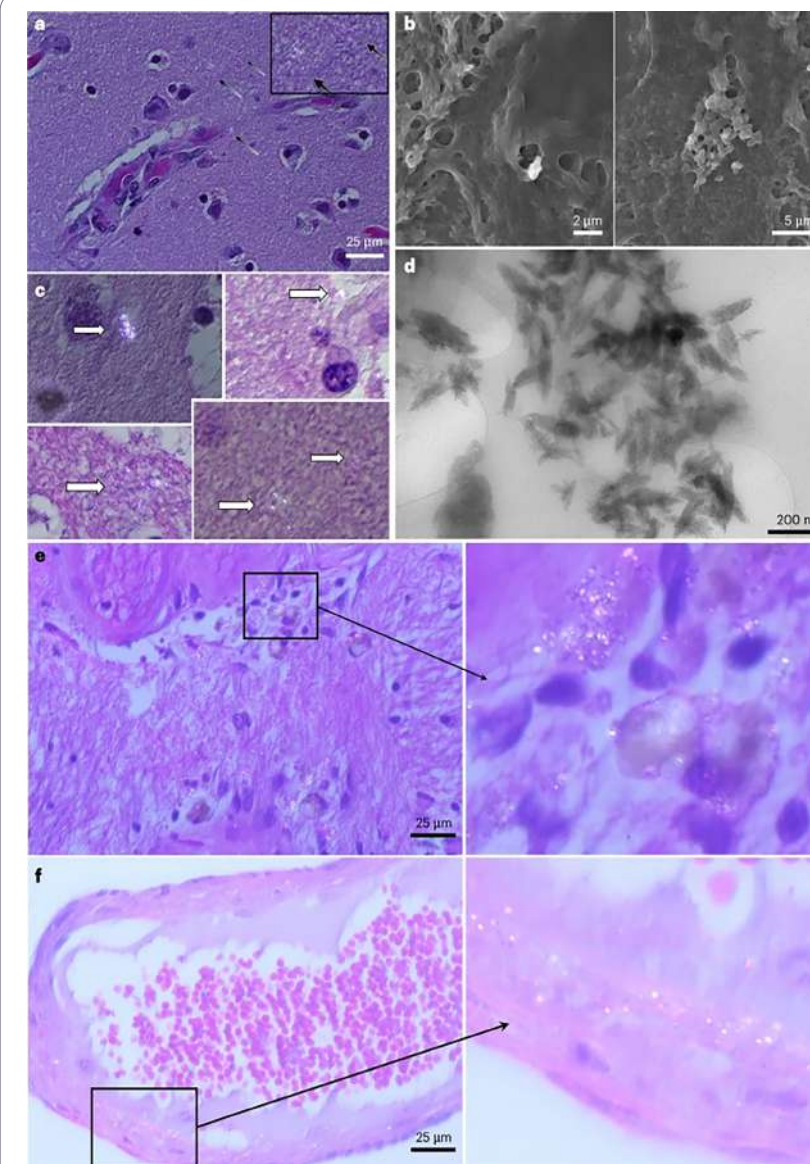
Source: OECD PISA, PIAAC and Adult Literacy and Lifeskills Survey
FT graphic: John Burn-Murdoch / @jburnmurdoch
©FT

Фигура 90. Производителността при тестовите за логика и решаване на задачи намалява.
Източник: OECD PISA, PIAAC and Adult Literacy and Lifeskills Survey
FT graphic: John-Murdoch / @jburnmurdoch

Тенденциите на растеж на невродегенеративните и невропсихичните заболявания ясно корелират с тенденцията на растеж на пластмасата в околната среда (фиг. 96-97).

Най-високите концентрации на НП бяха открити в тъканите на човешкия мозък — 7-30 пъти по-високи от концентрациите в черния дроб или бъбреците, а пробите от мозъчната тъкан на хора с диагностицирана деменция показаха още по-голямо присъствие на МНЧ — до 10 пъти повече — в сравнение с мозъчната тъкан на хора без деменция²⁴¹ (фиг. 91).

Преобладаващите частици в мозъка се оказаха малки парченца или люспи полиетилен — един от най-популярните пластмаси, използвани в опаковките.



Фигура 91. Поляризационна вълнова микроскопия (а. черните стрелки сочат към огнеупорни включения; вмъкването представлява цифрово увеличение за по-голяма яснота) и SEM (b. полетата на зрение са с ширина 15,4 и 20,1 μm) са използвани за сканиране на мозъчни срези от проби на починали хора. c. Големи (> 1 μm) включения не са наблюдавани; маркирани са допълнителни примери на поляризационна вълна (белите стрелки сочат към субмикронни огнеупорни включения). Ограниченията на резолюцията на тези технологии довеждат до използването на TEM за изследване на екстракти от гранули, използвани за Py-GC/MS. d. Примерни TEM изображения показват безброй твърди частици под формата на парченца или люспи след дисперсия, с размери главно < 200 nm дължина и < 40 nm ширина. e. f. Поляризационната вълнова микроскопия открива значително по-голям брой рефрактерни включения при случаи на деменция, особено в области със съпътстващо натрупване на имунни клетки (e) и по стените на кръвоносни съдове (f). Всички изображения са получени от малка подгрупа участници (n = 10 за нормален мозък; n = 3 за случаи на деменция) за предоставяне на визуални доказателства в подкрепа на аналитичната химия.

Източник: 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>

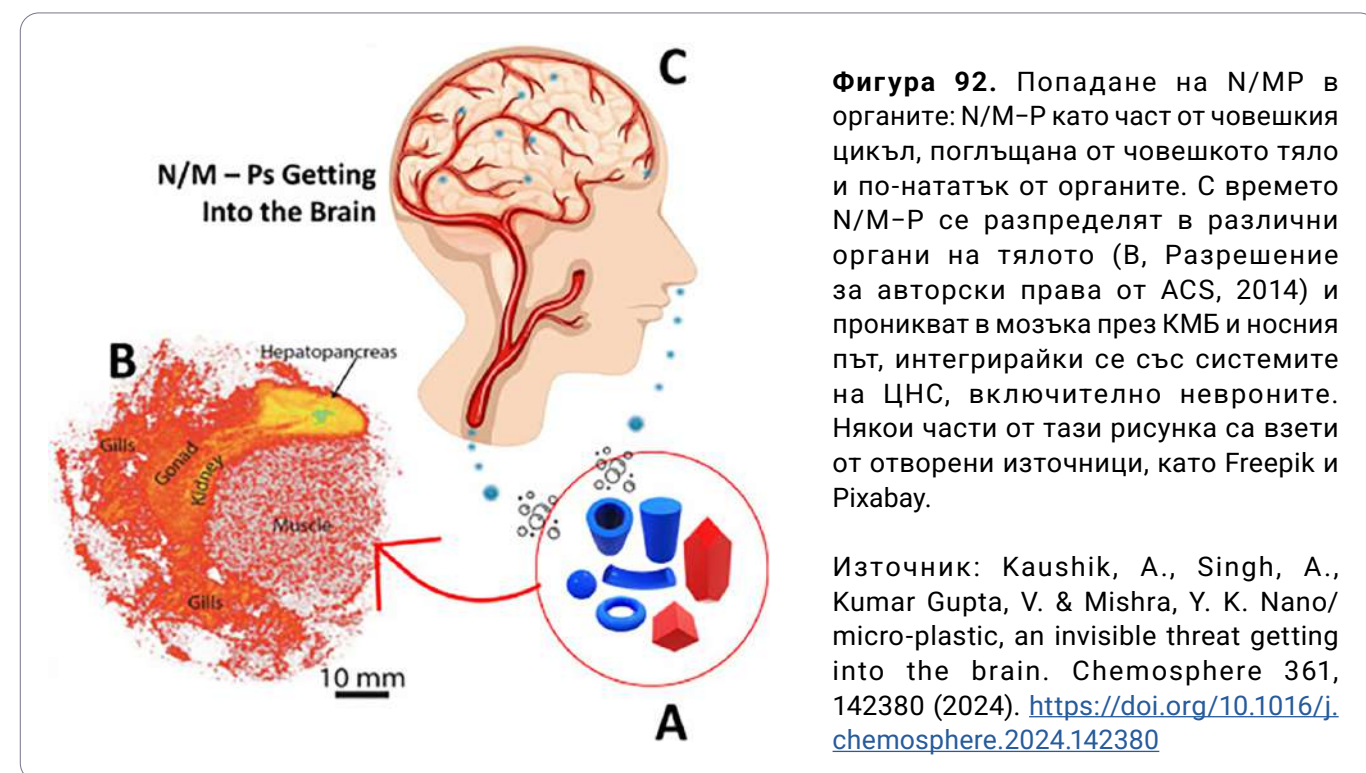
Нови данни потвърждават, че от 2016 до 2024 година, тоест за 8 години, съдържанието на пластмаса в мозъка се е увеличило с 50%²⁴¹.

66

„При здрави хора на възраст от 45 до 50 години открихме средно 4900 микрограма пластмасови частици на грам мозъчна тъкан. (...) Цяла пластмасова лъжица. Приблизително толкова микропластмаса има в нашия мозък. Това означава, че днес мозъкът ни е на 99,5% мозък, а останалото — пластмаса“, разказа водещият изследовател Метью Кемпен от Университета на Ню Мексико²⁴².

Като се има предвид нарастването на съдържанието на пластмасови частици в атмосферата, водата и храната, може с увереност да се каже, че количеството нанопластмаса в нашия организъм само ще се увеличава. Ако тази тенденция продължи, след 4 години нивото на пластмаса в мозъка ще се увеличи с още 50%.

МНП прониква в мозъка чрез кръвта, преминавайки през кръвно-мозъчната бариера (КМБ), и чрез вдишване през обонятелните нерви. (фиг. 92).



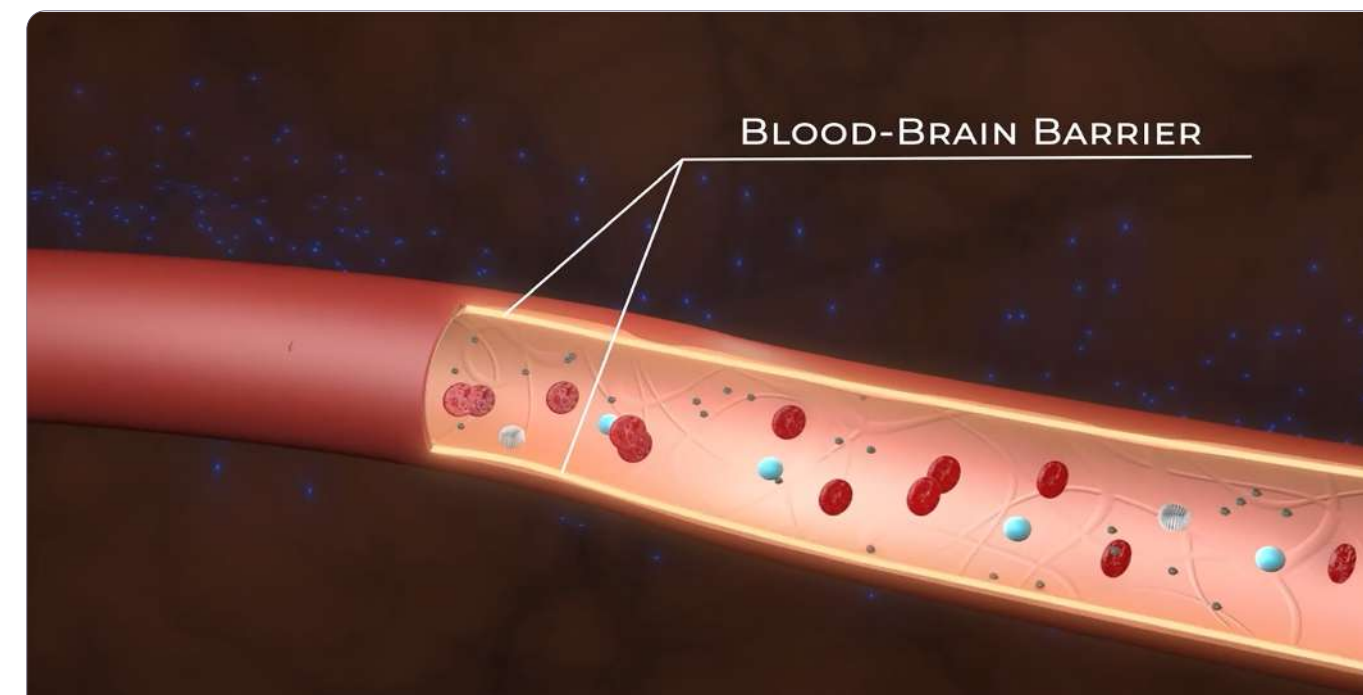
Фигура 92. Попадане на N/MP в органите: N/M-P като част от човешкия цикъл, поглъщана от човешкото тяло и по-нататък от органите. С времето N/M-P се разпределят в различни органи на тялото (B, Разрешение за авторски права от ACS, 2014) и проникват в мозъка през КМБ и носния път, интегрирайки се със системите на ЦНС, включително невроните. Някои части от тази рисунка са взети от отворени източници, като Freepik и Pixabay.

Източник: 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>

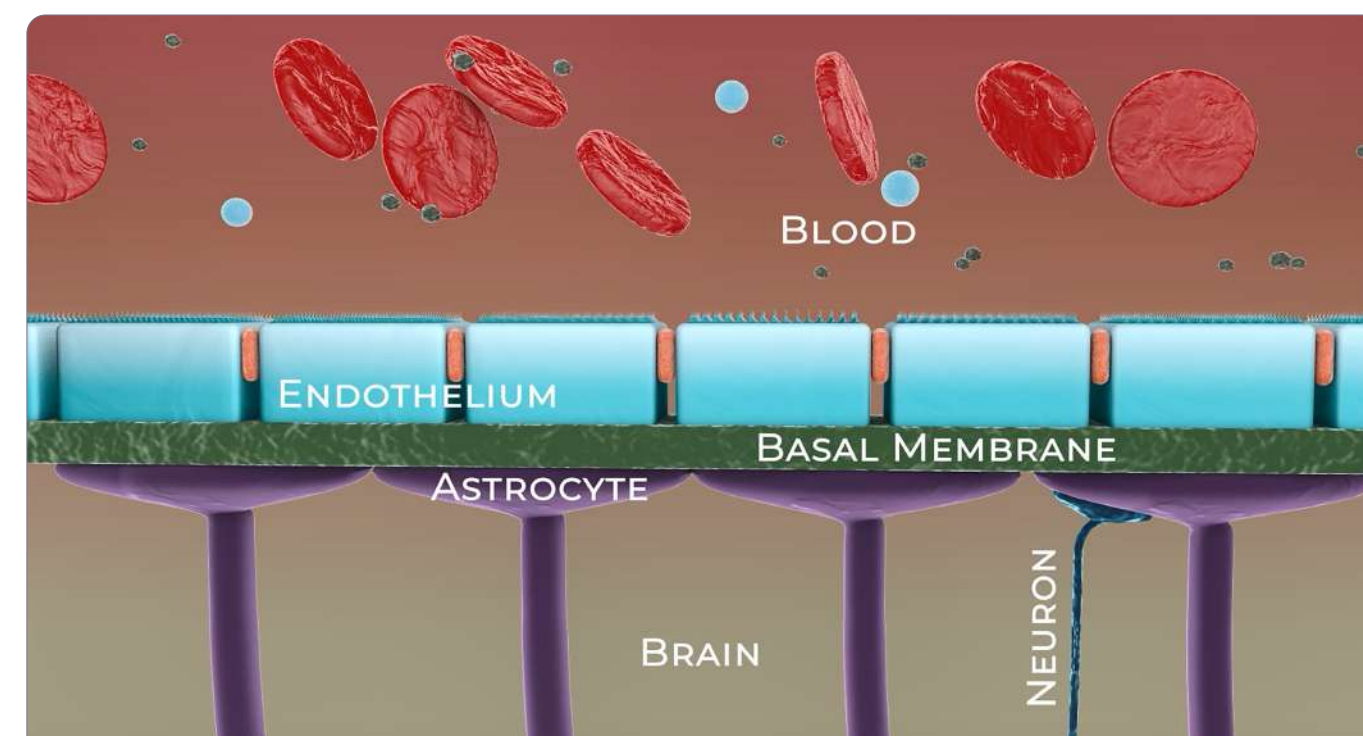
²⁴¹Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. Nat Med 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

²⁴²VRT NWS. Brain contains “full plastic spoonful” of microplastics. (2025) <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2025/02/04/microplastics-in-de-hersenen> (Accessed May 1, 2025).

Хематоенцефалната бариера представлява специализирана физиологична система, която регулира преноса на вещества от кръвния поток към централната нервна система (фиг. 93). Тя селективно пропуска хранителни вещества и кислород, блокирайки проникването на токсини и патогени (фиг. 94). Този механизъм осигурява критична защита на главния мозък, поддържайки хомеостазата на невронната среда.



Фигура 93. Схематично изображение на кръвоносен съд в мозъка



Фигура 94. Схематично изображение на хематоенцефалната бариера

Наночастиците пластмаса, благодарение на своите субмикронни размери и физикохимични свойства, проникват в мозъка само след 2 часа след попадане в организма²⁴³.

При вдишване наночастиците пластмаса през обонятелните нерви попадат директно в областта на мозъка, отговорна за възприемането на миризмите²⁴⁴ (фиг. 95). В резултат те изминават по-кратък и директен път до мозъка, отколкото до другите органи.



Фигура 95. Проникване на нанопластмаса през обонятелните нерви в мозъка

Прониквайки в мозъка, нанопластмасата нарушава работата на мозъчните клетки — невроните. Установено е, че повърхността на наночастиците и техният електрически заряд могат съществено да влияят върху взаимодействието с невроните и предаването на нервните импулси.

Електростатичният заряд на нанопластмасата позволява безпрепятствено да нарушава работата на всяка клетка в човешкия организъм, прониквайки в нея, предизвиквайки оксидативен стрес и хронично възпаление, нарушавайки функцията на митохондриите, до пълното им разрушаване и смърт на самата клетка.

Изследването²⁴⁵ показва, че отрицателно заредените наночастици могат да предизвикат деполяризация на мембраната на невроните, което води до промяна в тяхната електрическа активност.

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>

В резултат на експеримента бе установено, че отрицателно заредените частици нанопластмаса селективно се свързват с неврони, активно участващи в предаването на нервния импулс. Те се прилепват към телата на невроните, аксоните, дендритите и синаптичните цепки, докато глиалните клетки, които не притежават електрическа активност, не взаимодействат с тях.

Тоест електрическата активност на невроните е основният пусков механизъм за свързването на отрицателно заредената нанопластмаса с клетъчната мембрана.

Според изследванията, микро- и нанопластмасата има склонност да се натрупва в миелиновата обвивка на мозъка, богата на липиди, която обгражда невроните и осигурява провеждането на нервните сигнали²⁴⁶. Нанопластмасата предизвиква разрушаване на миелиновата обвивка на аксоните^{247, 248} което нарушава предаването на нервните импулси между невроните.

Въздействие на нанопластмасата върху невроните

Въздействието на нанопластмасата върху невроните може да се осъществи чрез следните точки на приложение:

1. Влияние върху мембрания потенциал на невроните

Невроните функционират благодарение на разликата в потенциалите на мембраната (около -70 mV в покой), създавана чрез йонни градиенти (Na⁺, K⁺, Cl⁻ и др.) и активността на йонните канали. Ако близо до мембраната на неврона се окаже частица нанопластмаса с електрически заряд, тя може да промени електрическото поле и да дестабилизира мембрания потенциал. Това може да доведе до деполяризация или хиперполяризация, а в най-лошия случай — до спонтанна активация на неврона или блокиране на сигнала.

2. Електростатично взаимодействие с йонните канали

Йонните канали в мембраната на неврона съдържат заредени аминокиселини, особено в „вратите“ на канала. Частица със силен отрицателен или положителен заряд може електростатично да взаимодейства с тези участъци, което променя конфигурацията на канала. Това може да предизвика блокиране или неправилна активация, нарушавайки нормалната работа на неврона.

3. Нарушаване на работата на синапсите

Синапсите зависят от прецизната работа на йоните Ca²⁺, Na⁺ и невротрансмитерите²⁴⁹. Електростатично заредените частици нанопластмаса могат да нарушат освобождаването на невротрансмитерите или да създадат фалшив сигнал, което може да доведе до сригове в предаването на нервните импулси.

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> (Accessed May 1, 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. Оксидативен стрес и възпаление

Заредените нанопластмаси са способни да предизвикват повишаване на нивото на активните форми на кислорода, което води до оксидативен стрес. Оксидативният стрес в невроните възниква, когато нивото на активните форми на кислорода превишава способността на клетката да ги неутрализира. Това води до увреждане на ДНК, на клетъчни структури, като мембрани, протеини и митохондрии, което нарушава нормалното функциониране на невроните. В резултат клетката губи способността ефективно да предава нервни импулси, което предизвиква нейната деградация и в крайна сметка смърт. Тъй като невроните имат ограничена способност за възстановяване, уврежданията, предизвикани от оксидативния стрес, често стават необратими и могат да доведат до прогресивно влошаване на паметта, вниманието и други когнитивни функции.

5. Въздействие върху митохондриалната функция

Нанопластмасите, носещи електростатичен положителен заряд, прониквайки в клетката, могат да се натрупват в митохондриите, нарушавайки мембранный им потенциал. В резултат се нарушава работата на дихателната верига, възникват изтичания на електрони, които взаимодействат с кислорода и образуват активни форми на кислорода, по-специално супероксид-анионите. Тяхното прекомерно натрупване засилва оксидативния стрес и може да доведе до увреждане на клетъчните структури.

6. Митохондриални мутации

Наночастиците пластмаса са способни да причиняват увреждане на митохондриалната ДНК, което нарушава нормалната работа на митохондриите. Това влияе върху ключови клетъчни процеси — производството на енергия, контрола на оксидативния стрес, програмираната клетъчна смърт и метаболизма. Нарушенията в тези системи могат да създадат условия, способстващи за развитие на заболявания.

7. Реактивни свойства на повърхността на нанопластмасата

Високата специфична повърхност на нанопластмасата е един от главните фактори, определящи неговата висока химична активност и способност да предизвиква образуването на активни форми на кислород. В сравнение с микропластмасата, наночастиците имат десетки и дори стотици пъти по-голяма повърхност на единица маса, което значително усилва тяхното взаимодействие с биомолекулите и околната среда.

Електростатичният заряд върху частиците пластмаса може да наруши работата на невроните, блокирайки или изкривявайки предаването на нервните импулси. Това води до смущения в работата на нервната система и може да предизвика широк спектър патологични състояния в организма. Това се проявява в различни неврологични, вегетативни, когнитивни и психични разстройства (Таблица 2).

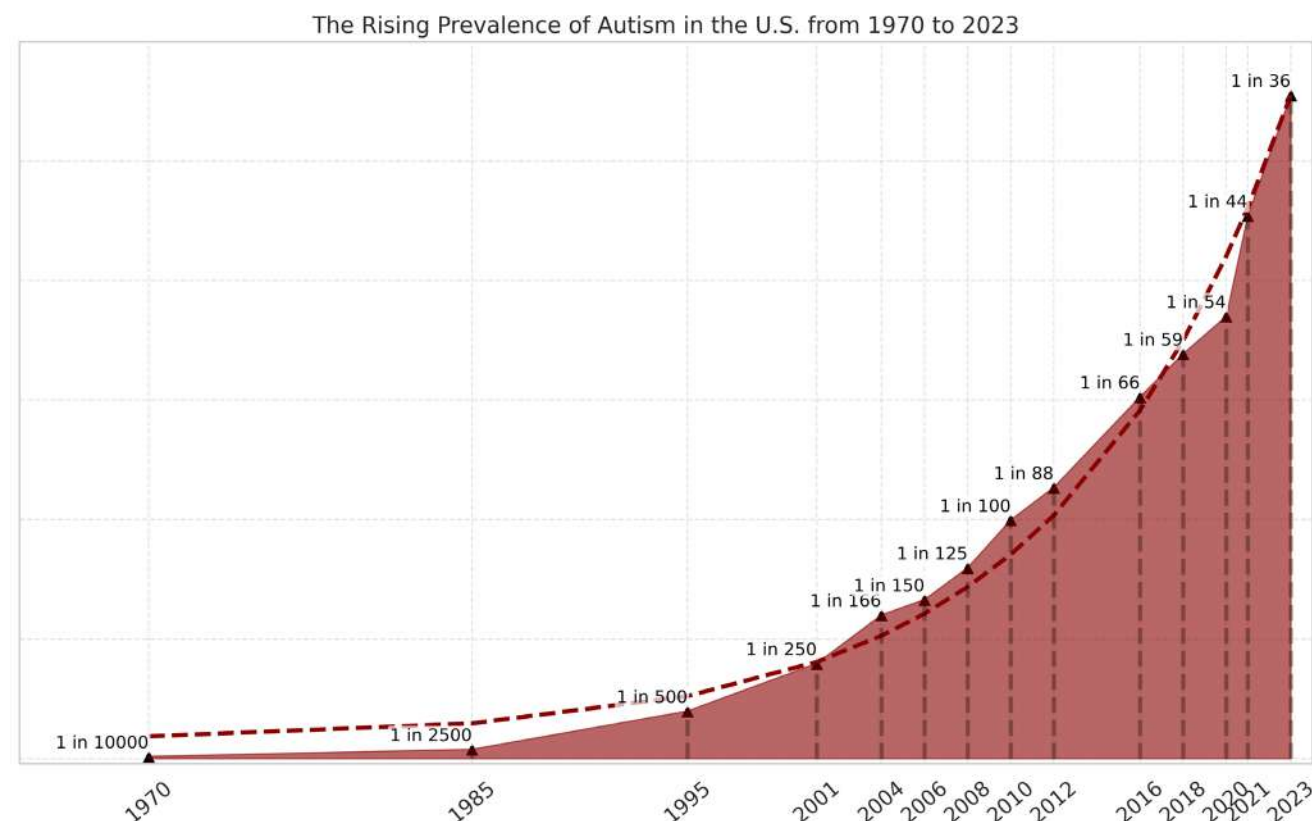
Ефектите от излагането на въздействието на нанопластмаси върху нервните клетки са свързани с широк спектър от заболявания, включително множествена склероза, амиотрофична латерална склероза, болест на Алцхаймер, болест на Паркинсон, автоимунни заболявания, епилепсия, исхемичен и хеморагичен инсулт, депресия, тревожност и когнитивни разстройства, шизофрения, биполарно разстройство, аутизъм и други.

Категория	Проявление	Причина / Механизъм
Двигателни нарушения	Парализа	Нарушаване на предаването на двигателни импулси от ЦНС към мускулите
	Състояния на конвулсии	Дисбаланс между възбуждащи и инхибиторни невросигнали
	Загуба на чувствителност	Срив във функционирането на сензорните невронни вериги, предаващи информация от рецепторите към мозъка
	Нарушение на координацията на движенията	Увреждане на проводящите пътища на малкия мозък или гръбначния мозък
Сензорни нарушения	Разстройства на речта, зрението и слуха	Засегнати нервни пътища, свързани със сензорните и моторните центрове на главния мозък
Вегетативни нарушения	Дисфункции на дишането, сърдечната дейност и храносмилането	Нарушаване на работата на автономната (вегетативна) нервна система
	Сривове в терморегулацията и нарушение на работата на вътрешните органи	Дисфункция на вегетативните регулаторни центрове
Когнитивни разстройства	Нарушения на паметта и вниманието	Структурни или функционални промени в кората на главния мозък
	Нарушения на съзнанието, кома	Увреждане на ретикуларната формация на мозъка, играеща ключова роля в регулацията на бодърстването и нивото на съзнание
Психоемоционални разстройства	Тревожност, депресия, нарушения на настроението	Дисбаланс на невромедиатори, увреждане на емоционалните центрове на мозъка

Таблица 2. Спектър на патологични състояния, предизвикани от въздействието на нанопластмасата върху невроните

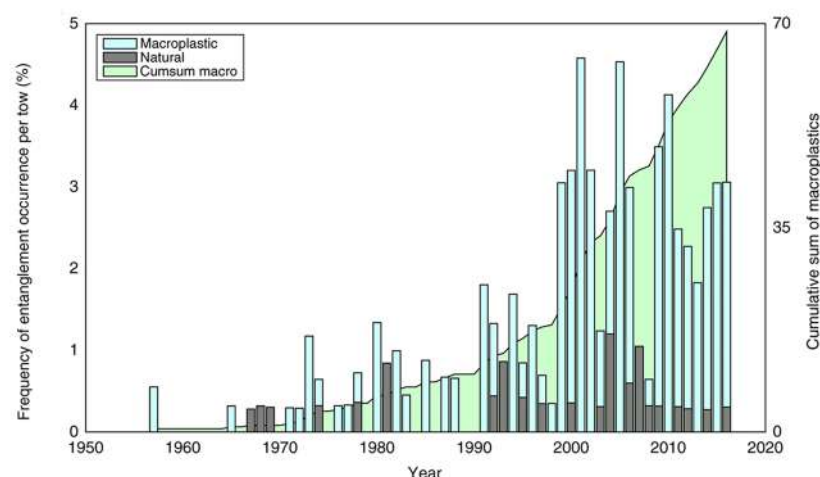
Микро- и нанопластмасата като рисков фактор за разстройства от аутистичния спектър

Заедно с нарастването на замърсяването на околната среда с пластмаса се наблюдава и увеличаване на разпространението на разстройства от аутистичния спектър (РАС) (фиг. 96, 97).



Фигура 96. Ръст на разпространението на аутизъм в САЩ от 1970 до 2023 г.

Източник: Rogers, T. The political economy of autism. Substack. <https://tobyrogers.substack.com/p/the-political-economy-of-autism> (Дата достъпа: 01.05.2025).



Фигура 97. Ръст на количеството пластмаса в океана от 1957 до 2020 г.

Източник: 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>

При 1 от 36 деца в САЩ е диагностицирано разстройство от аутистичния спектър (РАС) (според оценките на Мрежата за наблюдение на аутизма и нарушенията в развитието (ADDM) към CDC). Според данни от 2020 г. броят на случаите на аутизъм е нараснал с 317% спрямо 2000 г.^{250, 251}

Още от ембрионалния период и през първите години от живота се формира нервната система на човека. Изследвания сочат потенциална връзка между въздействието на микро- и нанопластмасата и развитието на РАС. Експериментални данни, получени от корейски учени, демонстрират, че пренаталното и постнаталното въздействие на МНП може да допринесе за възникване на нарушения в невротазвитие²⁵².

Изследване на молекулярните ефекти на полистироловите нанопластмаси върху човешки нервни стволови клетки показва, че въздействието на нанопластмасата може да доведе до увреждане на тъканите и заболявания, свързани с неврологичното развитие²⁵³.

Изследвания върху гризачи²⁵⁴ показаха, че въздействието на микро- и нанопластмасата върху майката по време на бременност и кърмене може да наруши невrogenезата в хипокампуса на потомството, както и да доведе до намаляване на обема на мозъчни структури, включително моторната кора, хипокампуса, хипоталамуса, продълговатия мозък и обонятелната луковица

Известно е, че промяната в структурата и функционирането на протеините в нервните тъкани има особено значение за развитието на множество заболявания, включително аутизъм²⁵⁵.

Наскоро проведени изследвания показват, че нанопластмасите взаимодействат с протеините предимно чрез слаби взаимодействия, като например хидрофобни взаимодействия, водородни връзки, сили на привличане на Ван дер Ваалс и електростатични сили²⁵⁶. Тези взаимодействия предизвикват структурни деформации в протеиновите молекули, като нарушават тяхната функционалност. Като се има предвид ролята на белтъците във формирането на невронните мрежи и синаптичното предаване, такива промени могат да допринесат за развитието на аутизъм.

²⁵⁰Autism Parenting Magazine. Autism Statistics You Need To Know in 2024. (2025) <https://www.autismparentingmagazine.com/autism-statistics> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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>

Участие на МНП в патогенезата на сърдечно-съдовите заболявания

Частиците пластмаса са способни не само да циркулират в кръвния поток, но и да се отлагат по съдовите стени, задействайки каскада от патологични изменения. Особено тревожно е откриването на микропластмаса в атеросклеротични плаки²⁵⁷. Последно изследване показва, че при пациенти с микропластмаса в сънните артерии рискът от инфаркт на миокарда, инсулт и смърт е бил 4,5 пъти по-висок. Това свидетелства за активно участие на пластмасовите фрагменти в образуването и дестабилизацията на атеросклеротичните плаки, провокирайки тяхното разкъсване и тромбообразуване²⁵⁸. МНП също нарушават целостта на ендотела — ключов слой клетки, покриващ вътрешната повърхност на съдовете и отговарящ за регулиране на съдовия тонус, предотвратяване на тромбообразуването и възпалителните реакции. Увреждането на ендотела, причинено от пластмасовите частици, води до хронично възпаление и повишен риск от тромбоза, което е особено опасно за артериите, храняващи сърцето и мозъка²⁵⁹. Микропластмасиата взаимодейства с компонентите на кръвта, като тромбоцитите и червените кръвни клетки, като насърчават агрегацията на тромбоцитите, задействайки процеса на образуване на тромби. Освен това повърхността на микропластмасите може да причини механично увреждане на клетките и да активира каскадите на кръвосъсирването, което с течение на времето може да доведе до хронична хиперкоагулация и микросъдови нарушения.

Имунните клетки могат да поглъщат микропластмасови частици, но не разполагат с механизми за пълното им разграждане, което води до деформация на клетките и увеличаване на размера им. Натрупването на тези променени клетки в малките съдове на мозъка допринася за образуването на микротромбове, което влошава мозъчния кръвоток и повишава риска от инсулт, включително при по-млади хора²⁶⁰. Хроничното понижаване на снабдяването на мозъка с кислород (хипоксия) води до загиване на невроните и развитие на невродегенеративни изменения, включително атрофия на мозъчната тъкан²⁶¹. При продължително въздействие тези процеси могат да предизвикат намаляване на обема на отделни структури на мозъка.

Благодарение на електростатичния заряд МНП активно взаимодействат с клетъчните мембрани, нарушавайки техния електрически потенциал. Това, от своя страна, влияе на съкратимостта на съдовете, предаването на сигнали в миоцитите и сърдечния ритъм. Смъртността от сърдечно-съдови заболявания в света неотклонно нараства (фиг. 98). Особено внимание трябва да се обърне на синдрома на внезапната сърдечна смърт сред млади хора на възраст 25–44 години²⁶² (фиг. 99). В САЩ той е признат за основна причина за смърт. През последните две десетилетия броят на случаите рязко нарасна. Като се има предвид повсеместното разпространение на МНП, не може да се изключи тяхната потенциална роля в тези трагични събития.

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>

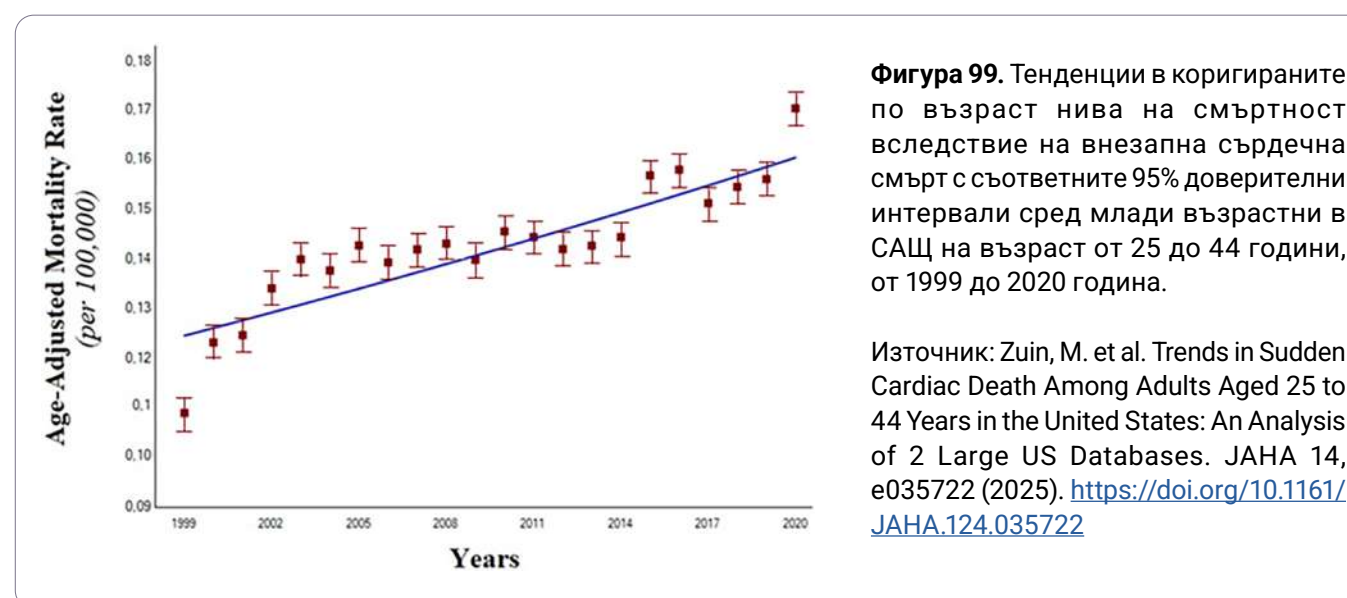
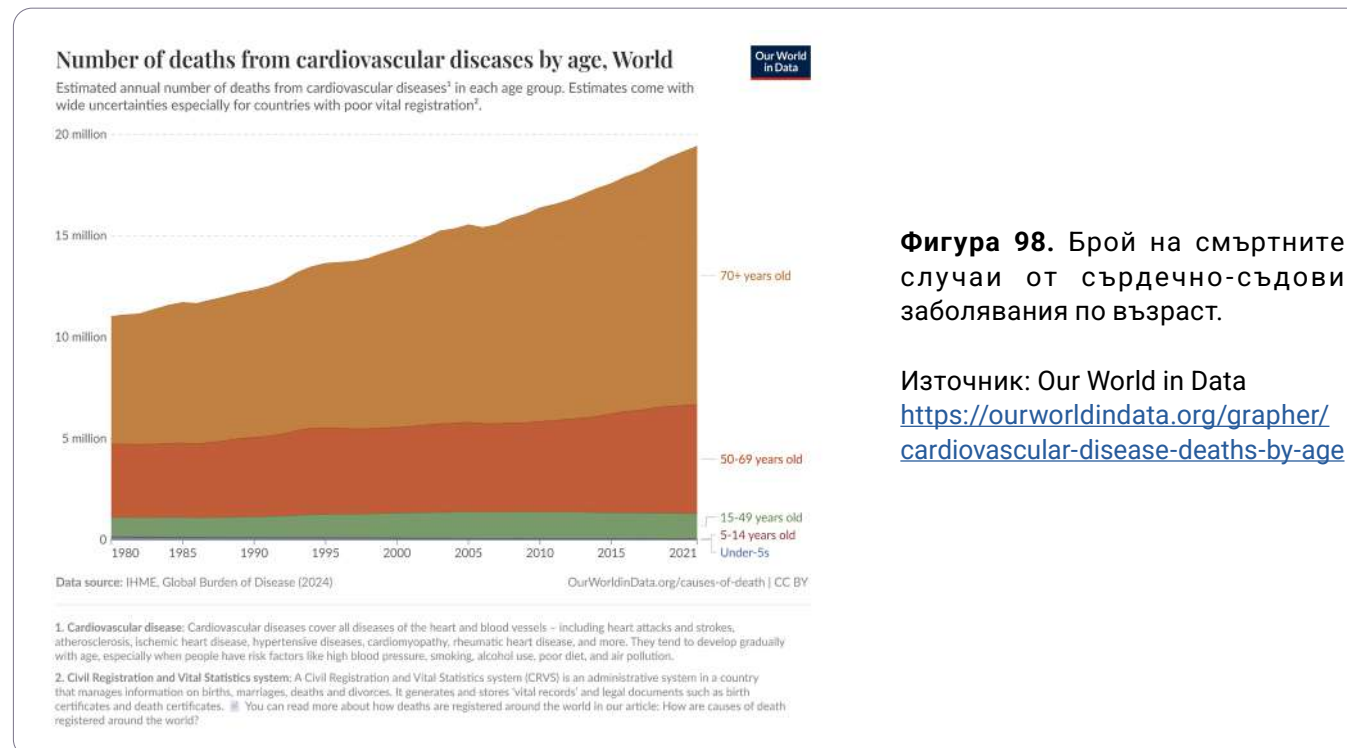
²⁵⁸Marfella, R. et al. Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events. *N Engl J Med* 390, 900–910 (2024). <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2309822>

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>



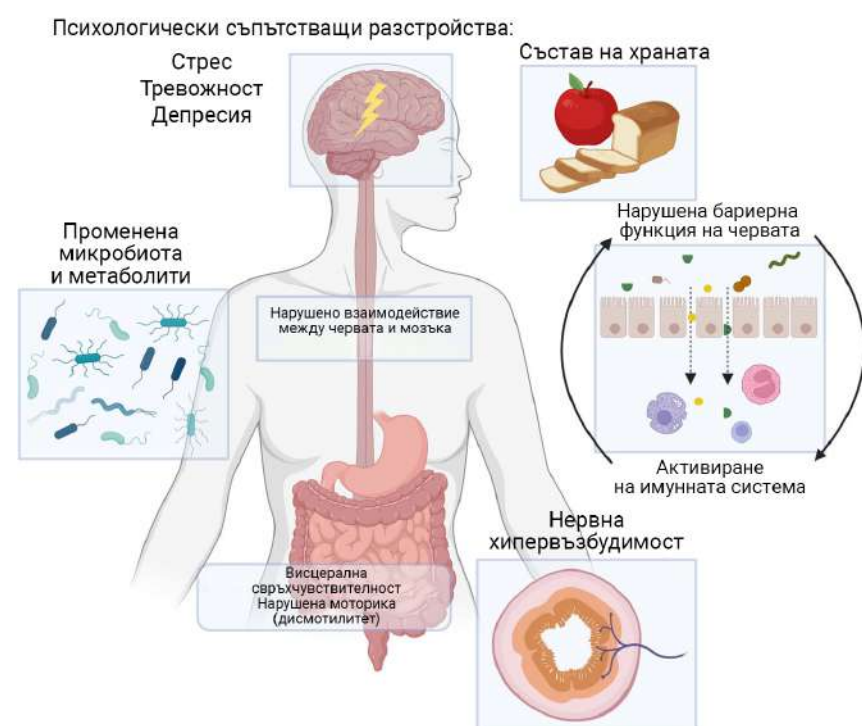
Още един сериозен проблем е нарастването на случаите на внезапна детска смърт (ВДС). Само в САЩ показателят на този синдром се е увеличил с 15% от 2019 до 2020 година, измествайки се от четвърто на трето място сред причините за детска смъртност²⁶³. Въпреки че причините за ВДС все още не са напълно установени, много учени предполагат, че ключова роля могат да играят фактори, които нарушават регулацията на сърдечния ритъм и съдовия тонус при кърмачетата. Нанопластмасата, способна да прониква през плацентата и да се натрупва в тъканите на развиващия се организъм, е един от вероятните рискови фактори. Все повече учени са на мнение, че нанопластмасата е един от основните кандидати за ролята на „невидим убиец“.

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

Сърцето, като един от най-енергоемките органи, критично зависи от ефективната работа на митохондриите, които го снабдяват с енергия. Въздействието на микропластмасови частици нарушава митохондриалните процеси, което може да доведе до енергиен дефицит в миокарда и като следствие до нарушаване на сърдечната функция.

Нарушаване на функциите на стомашно-чревния тракт, причинено от МНП

Червата са най-големият имунен орган на човека. В тях са съсредоточени около 70% от всички имунни клетки, приблизително 500 милиона неврони и над 100 трилиона микроорганизми²⁶⁴. Чревната микробиота играе ключова роля в поддържането на имунната система. Дисбалансът на микробиотата може да отслаби имунитета и да допринесе за възникването на различни заболявания. Червата често се наричат „втория мозък“ заради гъстата мрежа от неврони и способността им да взаимодействат с централната нервна система²⁶⁵. Обменът на сложни биохимични сигнали между мозъка и червата е наречен „оста мозък–черва“ и играе важна роля в регулирането както на физическото, така и на психо-емоционалното състояние (фиг. 100).



Фигура 100. Патофизиологични механизми при нарушения във взаимодействието между червата и мозъка.

Източник: Vanuytsel, T., Bercik, P. & Boeckstaens, 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>

²⁶⁴Yu, C. D., Xu, Q. J. & Chang, R. B. Vagal sensory neurons and gut-brain signaling. *Current Opinion in Neurobiology* 62, 133–140 (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.conb.2020.03.006>

²⁶⁵Sofield, 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>

Здравата чревна бариера предотвратява проникването на микроби и чужди частици от чревния лумен в кръвния поток²⁶⁵. Микро- и нанопластмасата нарушава тази защита, увеличавайки пропускливостта на чревната стена. В резултат се развива възпаление както в червата, така и в други органи, което допринася за отслабване на имунитета²⁶⁶. Едновременно с това МНП влияе върху състава на чревната микробиота, предизвиквайки дисбаланс между полезни и патогенни микроорганизми. Това нарушава процесите на храносмилане, намалява способността на организма да разгражда хранителни алергени и увеличава риска от развитие на хранителна алергия²⁶⁷.

По този начин възниква порочен кръг: пластмасата нарушава микробиотата, усилва възпалението и пропускливостта на чревните стени, през които в кръвта започват да проникват токсини, бактерии и самата пластмаса. Проникването на тези вещества в кръвта задейства имунен отговор, който води до хронично възпаление в целия организъм. От кръвта токсините, бактериите и нанопластмасата преминават през хематоенцефалната бариера в мозъка, като провокират възпалителни реакции в главния мозък. Тези процеси от своя страна още повече нарушават регулацията на имунния отговор, засилват стресовата реакция на организма и могат да окажат негативно влияние върху състоянието на микробиотата чрез невроендокринни механизми, като по този начин затварят порочния кръг по оста „черво – мозък“.

Нарушаването на взаимодействието между чревния микробиом и централната нервна система е пряко свързано с неврологични разстройства. Така при деца с разстройства от аутистичния спектър е установен изразен дисбаланс на микробиотата, което се потвърждава както от микробиологичен анализ, така и от оценка на функциите на храносмилателната система²⁶⁸.

Изследвания на пациенти с възпалителни заболявания на червата показват положителна корелация между тежестта на заболяването и концентрацията на микропластмаса във фекалиите. При пациенти с възпалителни заболявания на червата тя е по-висока (41,8 бр./г) в сравнение със здрави хора (28,0 бр./г). Също така при такива пациенти е установено значително натрупване на микропластмаса в язвените поражения на лигавицата на правото черво²⁶⁹.

Освен това микропластмасата, оставаща в червата, продължава да оказва вредно въздействие дори дълго време след първоначалното ѝ попадане в организма.

²⁶⁵Sofield, 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>

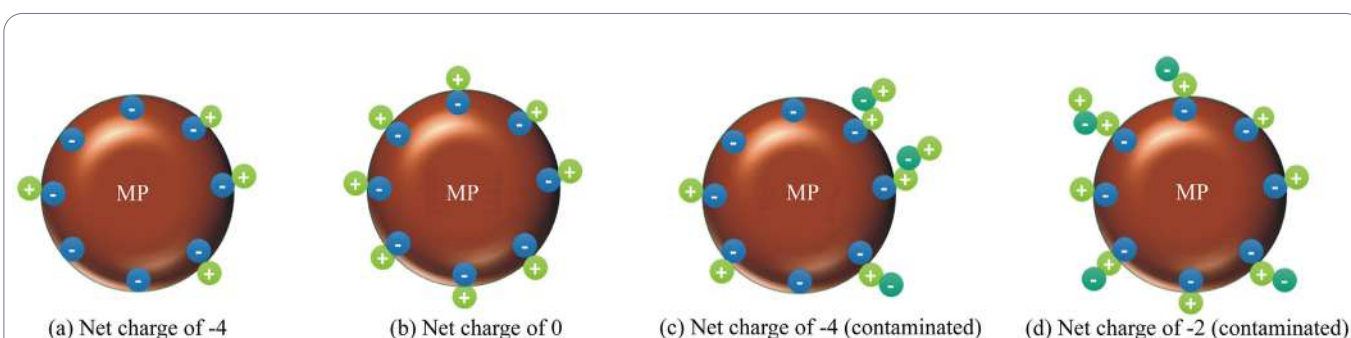
²⁶⁷ScienceDirect. Food allergy. *ScienceDirect Topics*. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/food-allergy> (Accessed May 1, 2025).

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> (Accessed May 1, 2025).

Въздействие на МНП върху имунната система

МНП нарушава имунния отговор в организма, създавайки условия за размножаване на патогени. Заредените частици МНП по-лесно привличат към себе си други молекули — например токсини, соли на тежки метали, бактерии и вируси (фиг. 101). Това ги превръща в своеобразна „транспортна платформа“ за токсични съединения, засилвайки биологичната активност и токсичността на последните. Електростатичният заряд на нанопластмасата е своеобразно хранване или „презареждане“, благодарение на което бактериите и вирусите по-дълго запазват своята жизнеспособност.



Фигура 101. Илюстрация на ефекта от повърхностните заряди на микропластмасата, предизвикани от замърсители във водата.

Източник: 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>

И накрая, заредените частици микро- и нанопластмаса могат да се задържат по-дълго във водата и въздуха, по-лесно да се издигат в аерозоли и да проникват в дихателните пътища, което увеличава риска от навлизането им в човешкия организъм.

Съвкупното въздействие на МНП върху микробиома, патогените и имунната система формира комплексни рискове за здравето.

Имунни клетки, които влизат в контакт с микропластмаса, умират приблизително три пъти по-бързо от тези, които не са в контакт с нея²⁷⁰.

Частиците микропластмаса са способни да абсорбират вируси върху повърхността си поради електростатичните и хидрофобни взаимодействия, като по този начин удължават тяхната жизнеспособност²⁷¹.

²⁷⁰Plastics News. Study highlights health hazards of microplastics. (2019) <https://www.plasticsnews.com/news/study-highlights-health-hazards-microplastics> (Accessed May 1, 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). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119594>

Вирусите на повърхността на микропластмасата остават активни до три дни — това е достатъчно, за да преодолеят разстояния, например, от пречиствателни станции до плажовете²⁷².

Микропластмасата улеснява разпространението на патогени и може да способства за тяхната генетична рекомбинация. Изследване показва, че пластмасовите частици не само намаляват ефективността на лекарствата, но и могат да способстват за развитието на бактерии, устойчиви на антибиотици²⁷³.

Заредените частици МНП служат като платформа за колонизация на микроорганизми²⁷⁴. Бактерии и гъбички, използвайки електростатичните полета на нанопластмасата, демонстрират ускорен растеж. Изследвания върху дафнии показват, че въздействието на нанопластмасата предизвиква оксидативен стрес и увеличава нивото на гъбичните инфекции 11 пъти (вид *Metschnikowia*)²⁷⁵. Това е в унисон с глобалното разширяване на обхвата и устойчивостта на гъбичните заболявания, които СЗО определя като нарастваща заплаха за общественото здраве.



„Излизайки от сянката на пандемията от бактериалната устойчивост към антимикробни препарати, гъбичните инфекции се разпространяват и стават все по-устойчиви при лечение, превръщайки се в проблем за общественото здраве в световен мащаб“, — казва д-р Ханан Балхи, помощник на Генералния директор на СЗО, отговарящ за антимикробната резистентност²⁷⁶.

Гъбични метаболити, отделяни в присъствие на МНП, са свързани с растеж на тумори²⁷⁷ и хронично възпаление. ДНК на гъби е открита в някои видове рак, което сочи към потенциалната роля на МНП в онкогенезата²⁷⁸.

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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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>

Онкогенно действие на МНП.

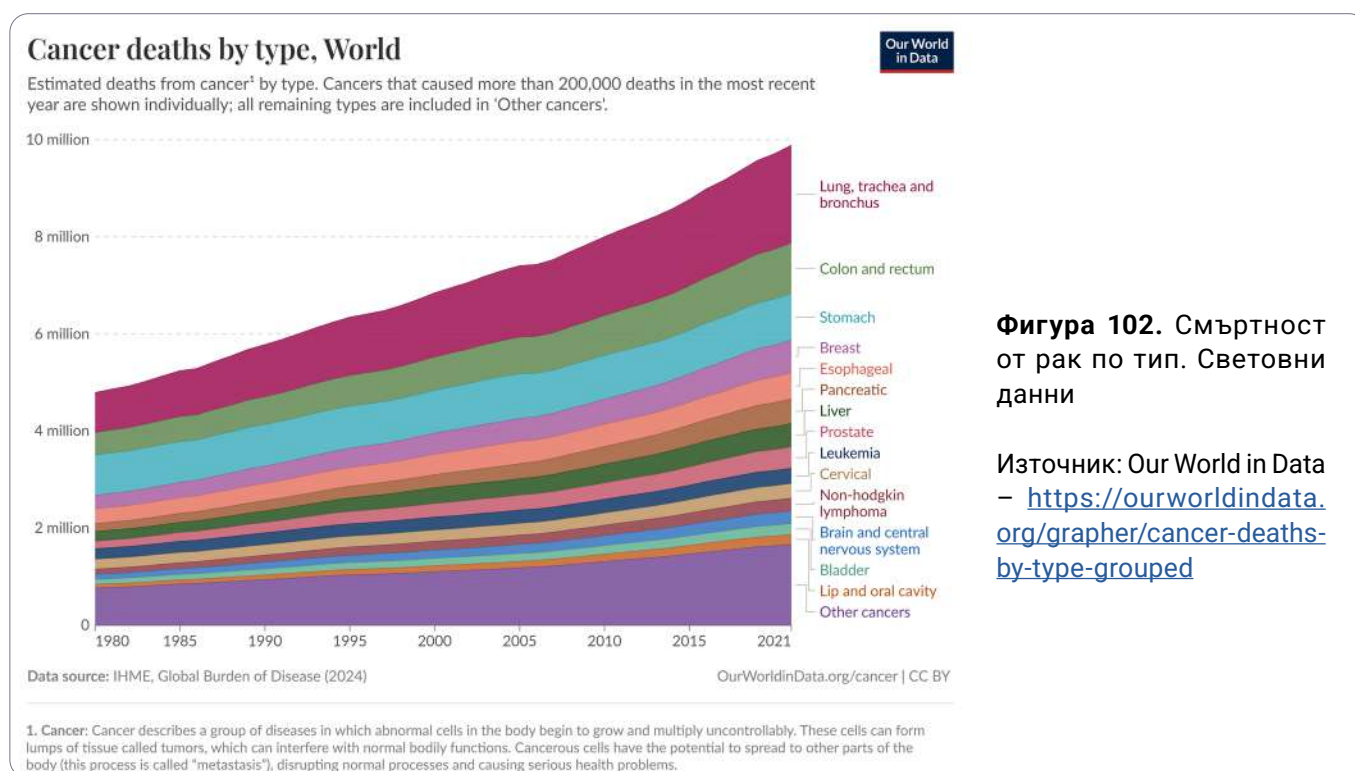
Механизми на мутации и развитие на метастази

Според представената по-горе информация микропластмасата и нанопластмасата са значим фактор в развитието на злокачествени образувания, като се има предвид негативното им влияние на клетъчно и системно ниво.

Изследванията показват, че микропластмасата и нанопластмасата могат да играят роля на скрити катализатори на развитието на рак, като усилват миграцията на клетки и способстват на метастазирането²⁷⁹. Също така е установено, че частиците МНП могат да се задържат вътре в клетките за продължително време и да се предават на дъщерните клетки по време на делене.

В момента смъртността от онкологични заболявания в света продължава да нараства (фиг. 102).

Прогнозира се, че до 2050 година броят на новите случаи на рак ще се увеличи с 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>

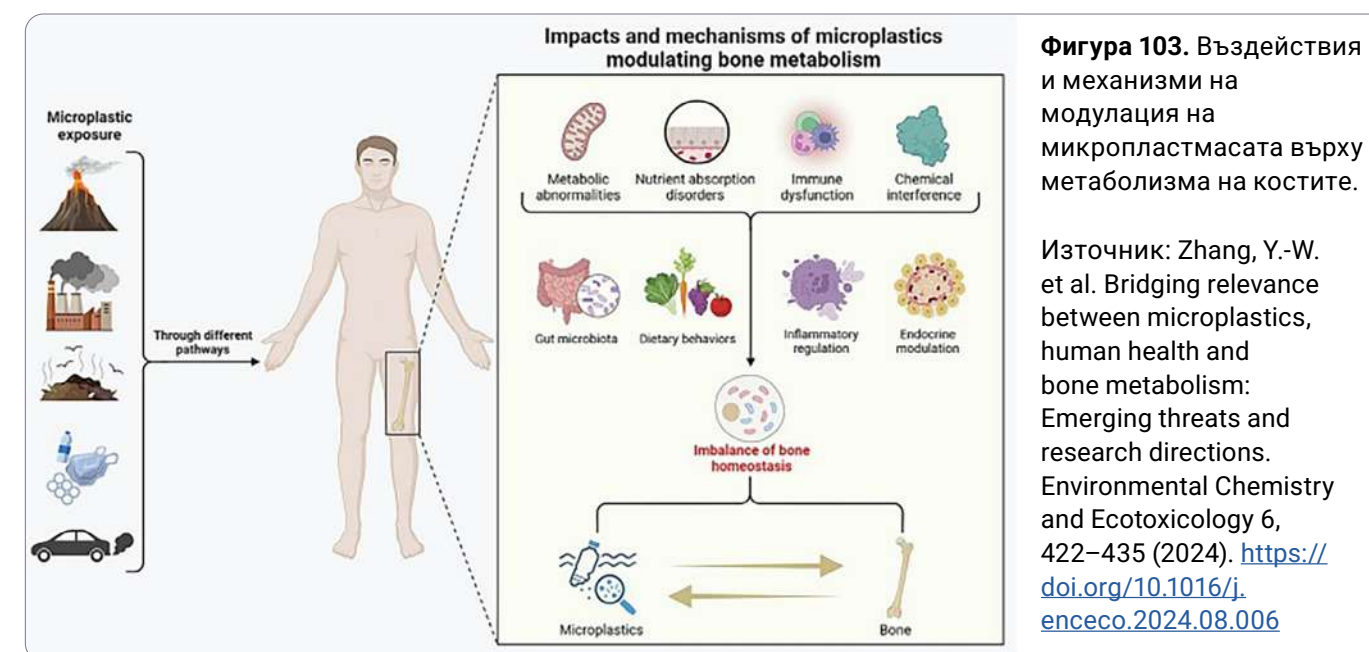
²⁸⁰World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024). <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services> (Accessed May 1, 2025).

Влияние МНП върху калциевия обмен и структурата на костите

Частиците пластмаса са способни да проникват дори в опорно-двигателния апарат — основата на физическото функциониране на човека (фиг. 103). Там, където царува точен баланс между разрушаване и изграждане, където костите ежедневно се обновяват, ставите намаляват триенето, а мускулите поддържат движението и топлината, микропластмасата — отчасти поради своя електростатичен заряд — може да замества строителните молекули и да задейства бавни, разрушителни процеси.

Изследванията показват, че микропластмасата може да прониква в костната тъкан, където молекулярната ѝ структура ѝ позволява да имитира калций и други минерали, необходими за костния метаболизъм. В резултат пластмасата може да бъде погрешно възприемана от организма като строителен материал за костите. Организмът буквално започва да „строи“ кости от пластмаса

Това нарушение на молекулярното разпознаване е свързано с редица негативни последици: микропластмасата може да наруши функциите на остеобластите и остеокластите, да наруши обмена на калций и фосфор, като по този начин спомага за развитието на остеопороза. Стартират възпалителни каскади, нарушава се експресията на гени, а костната тъкан губи плътност и здравина. Освен това присъствието на нанопластмаса може да предизвика хронично възпаление, увреждащо ставния хрущял и костната тъкан, което е свързано с повишен риск от остеоартрит, болков синдром и скованост на движенията^{281, 282}.



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> (Accessed May 1, 2025).

Изследване при гризачи доказва, че количеството остеобласти значително намалява при мишки, получавали полистиролна микропластмаса²⁸⁰.

Не по-малка заплаха представлява пластмасата и за скелетната мускулатура. Изследвания показват, че нанопластмасата е способна да прониква в мускулните клетки, нарушавайки работата на митохондриите. Възниква дефицит на енергия, активират се агресивни форми на активен кислород, което ускорява стареенето на клетките, нарушава възстановяването на мускулите след натоварване и способства тяхната атрофия. Особено уязвими се оказват възрастните хора и пациентите с хронични заболявания.

Микро- и нанопластмасата се натрупва в костния мозък²⁸³, нарушавайки образуването на стволови клетки (хемопоеични и мезенхимни)²⁸⁴, от които се формират еритроцити, левкоцити, тромбоцити, остецити, хондроцити и адипоцити. Тяхната дисфункция предизвиква системни увреждания на организма.

Репродуктивни разстройства, асоциирани с въздействието на МНП. Безплодие и еректилна дисфункция

Намаляване на фертилността

Според прогнози, до 2045 година светът ще стане напълно безплоден²⁸⁵.

Още през 2018 година група водещи лекари и учени на **XIII Международен симпозиум по сперматология** в Стокхолм призова правителствата да признаят намаляването на мъжката фертилност като сериозен проблем на общественото здраве и да признаят важността на мъжкото репродуктивно здраве за оцеляването на човешкия вид²⁸⁶.

Репродуктивното здраве, въпреки разпространеното мнение, се определя не само от хормоналния баланс, наследствеността и начина на живот. Все повече научни изследвания посочват критичната роля на митохондриите в процесите на зачеване и развитие на ембриона. Тези миниатюрни органели, отговорни за производството на енергия, необходима за всички жизнени процеси, играят решаваща роля във фертилността както при мъжете, така и при жените, а тяхното значение за репродуктивната функция на човека се оказва много по-дълбоко.

Нарушения във функционирането на митохондриите могат да бъдат причина за безплодие както при жените, така и при мъжете. При мъжете митохондриите, намиращи се в опашната част на сперматозоида, отговарят за подвижността, необходима за оплождане. Нарушенията в тяхната работа намаляват подвижността на сперматозоидите и могат да предизвикат аномалии.

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> (Accessed May 1, 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-swain-fertility-reproduction-count-down> (Accessed May 1, 2025).

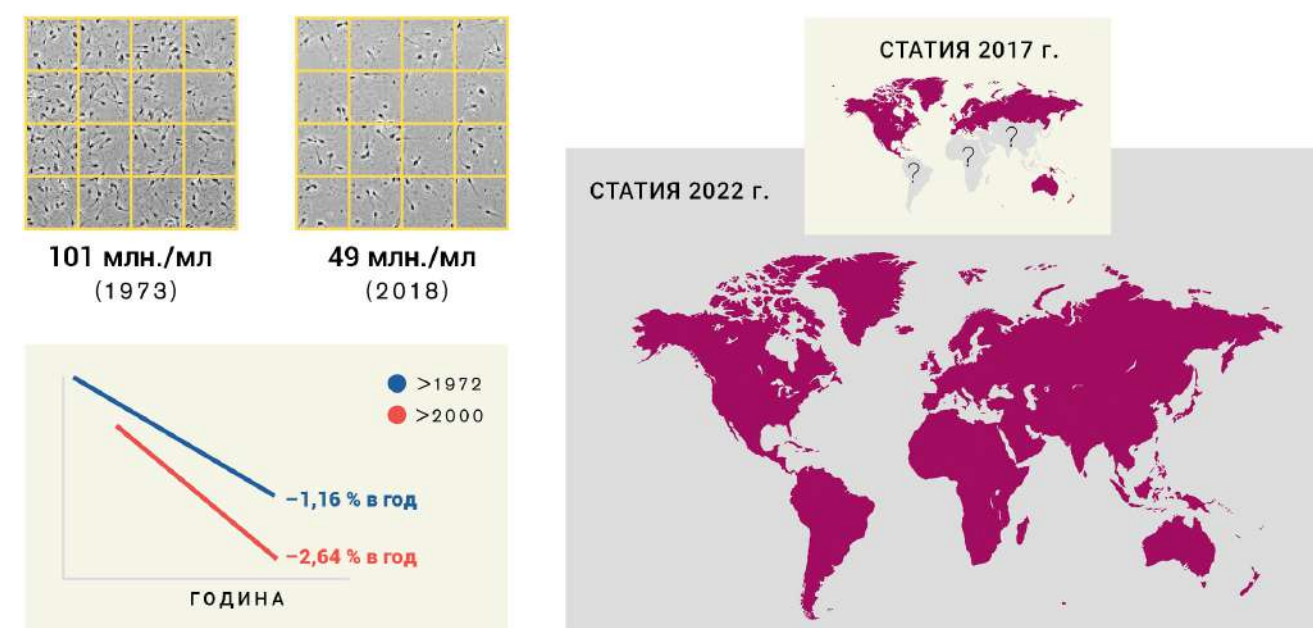
²⁸⁶Levine, H. et al. Male reproductive health statement (XIIIth international symposium on Spermatology, may 9th–12th 2018, Stockholm, Sweden. Basic Clin. Androl. 28, 13 (2018). <https://doi.org/10.1186/s12610-018-0077-z>

В изследвания, проведени от китайски учени, микропластмаса е била открита във всички проби от сперма — средно по две частици с размер до 7 μm , най-често полистирол²⁸⁷. Наличието на микропластмаса е свързано с морфологичните аномалии в сперматозоидите и скъсените теломери. Поради микроскопичния си размер и заряд нанопластмасите могат да преминат кръвно-семенната бариера и да проникнат в репродуктивните органи, нарушавайки техните функции.

Благодарение на микроскопичните си размери и заряда, нанопластмасата е способна да преодолее хематотестикуларната бариера и да проникне в половите органи, нарушавайки тяхната функция.

Особено тревожна е наблюдаваната тенденция на намаляване на общия брой сперматозоиди при мъжете с 62,3% в периода от 1973 до 2018 година²⁸⁸ (фиг. 104).

Броят на сперматозоидите в целия свят намалява с ускорени темпове



Фигура 104. Графична абстракция: количеството на сперматозоидите намалява с ускорени темпове в целия свят.

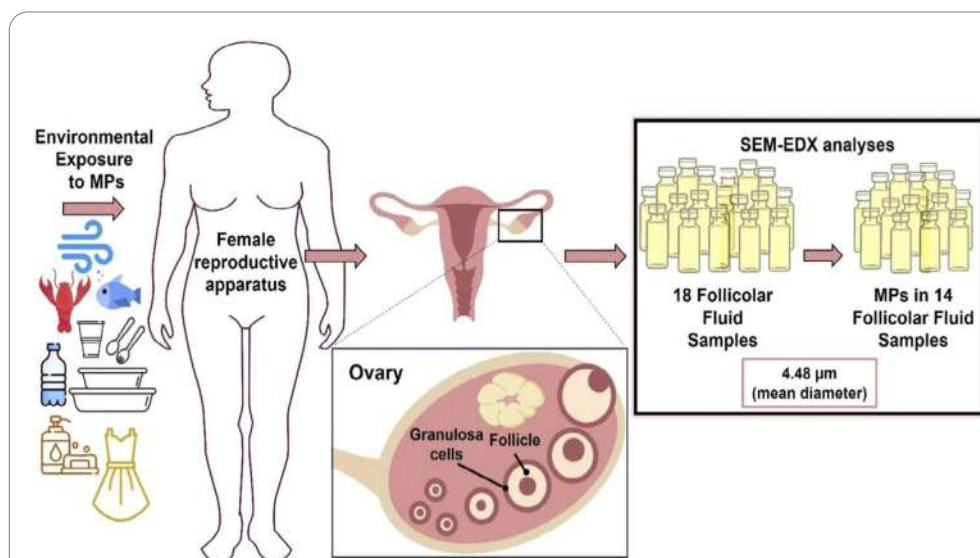
Източник: Levine, H. et al. Temporal trends in sperm count: a systematic review and meta-regression analysis of samples collected globally in the 20th and 21st centuries. Human Reproduction Update 29, 157–176 (2023). <https://doi.org/10.1093/humupd/dmac035>

Въпреки че върху фертилността влияят множество фактори, все повече учени са склонни да смятат, че химичните съединения, съдържащи се в пластмасата, играят една от ключовите роли в този процес. Фталатите, използвани за придаване на гъвкавост на пластмасата, нарушават хормоналния фон, понижават либидото и могат да способстват за преждевременно полово съзряване и нарушаване на функцията на тестисите.

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 по-малко тревожна е и ситуацията с женската фертилност. Изследване от 2025 година откри наличие на частици микропластмаса във фоликулната течност на яйчниците при 14 от 18 жени — средно над 2 000 частици на милилитър, като повечето от тях са с диаметър под $5\text{ }\mu\text{m}^{289}$ (фиг. 105).



Фигура 105. Схема на механизма на проникване на микропластмаса във фоликулната течност на яйчниците: чрез въздействие от околната среда (вдишване, поглъщане и контакт с кожата) те попадат в човешкия организъм, достигайки женската репродуктивна система, по-специално — преодолявайки хематофоликуларната бариера.

Източник: 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>

Тези данни свидетелстват за способността на пластмасовите частици да преодоляват хематофоликуларната бариера в яйчниците. На клетъчно ниво микро- и нанопластмасата могат да увредят ДНК, да нарушават клетъчното делене и да предизвикват възпаление. Доказана е намесата им в хормоналната регулация, нарушаването на функциите на плацентата, влиянието им върху ангиогенезата и връзката им с развитието на миома на матката.

Еректилна дисфункция

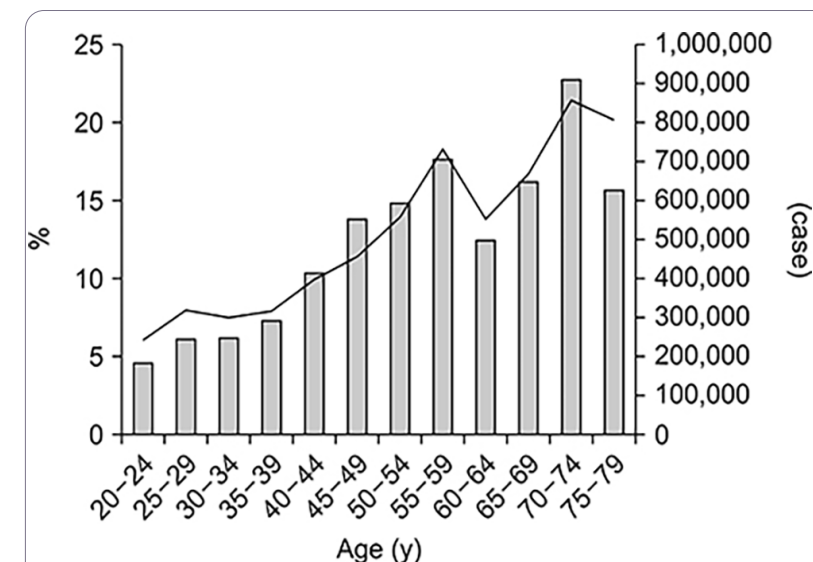
Резултатите от национално изследване в Япония показват, че еректилната функция и сексуалната активност намаляват при младото поколение²⁹⁰. Оценка, основана на EHS, разкрива разпространение на ЕД в 30,9 %, което е засегнало приблизително 14 милиона мъже, и че сексуалното желание, твърдостта на ерекцията, оргазмите и удовлетворението са били по-ниски от очакваното при младите японски мъже, особено на възраст от 20 до 24 години, въпреки че тези фактори имат тенденция да се влошават с възрастта. Всъщност, нивото на разпространение във възрастовата група 20–24 години възлиза на 26,6 %, почти равно на показателя при възрастовата група 50–54 години (27,8 %) (фиг. 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>

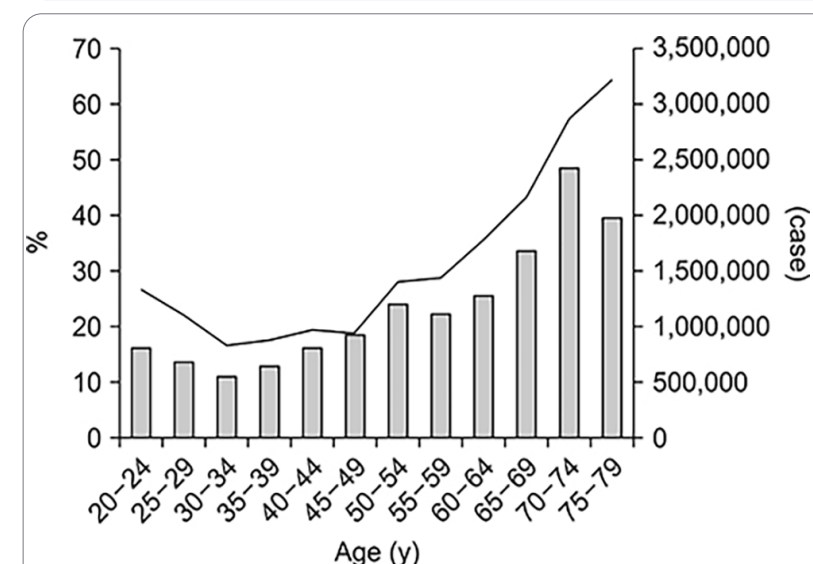
Освен това, в друго проучване, проведено в световен мащаб, се съобщава, че три четвърти от мъжете проявяват симптоми на ЕД, което свидетелства, че ЕД не е рядкост и може да засегне всеки мъж. Първото официално национално изследване на сексуалната функция в Япония, проведено през 1998 година, изчислява, че там има около 11,3 милиона пациенти с умерена или пълна еректилна дисфункция (ЕД). Освен това, националните изследвания на мъжкото безплодие в Япония, проведени през 1996 и 2015 година, разкриват поразителни данни. В проучването от 2015 г. 13,5% от мъжете се сблъскват с мъжко безплодие поради ЕД като основна причина, което е почти четири пъти повече, отколкото през 1996 г.

Съвкупността от съвременни научни данни показва, че микро- и нанопластмасата в организма е една от скритите, но значими причини за влошаване на репродуктивното здраве. Тези частици проникват в половите органи, нарушават функцията на митохондриите, предизвикват възпаления, хормонални смущения и увреждания на ДНК, намаляват подвижността и морфологичното качество на сперматозоидите. Те се откриват в спермата и фоликуларната течност, което свидетелства за преодоляване на биологичните бариери и дълбоко системно въздействие. Всичко това поставя под заплаха не само индивидуалното здраве, но и бъдещето на репродуктивната способност на човечеството като цяло.



Фигура 106. Разпространеност и брой пациенти с еректилна дисфункция, оценени въз основа на разпространеността на еректилната дисфункция (ЕД), изчислена по въпроса „Притеснява ли Ви ЕД“.

Източник: 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>



Фигура 107. Графика, показваща разпространеността и броя на пациентите с еректилна дисфункция според оценката по скалата за твърдост на ерекцията.

Източник: 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>

Проникване на МНП през плацентарната бариера и влиянието ѝ върху развиващия се организъм

Пренатално въздействие на микро- и нанопластмасата върху плода

Бременните жени показват особена уязвимост към въздействието на микропластмасата²⁹¹. Прониквайки в организма на майката, пластмасовите частици могат да достигнат плода през плацентата, да се намесват в секрецията на хормони, регулиращи бременността, и да повишават риска от преждевременно раждане, спонтанни аборти и нарушения в развитието на плода (фиг. 108). По оценки, през 2020 г. 13,4 милиона деца (1 от 10) са се родили преждевременно (<37 седмици), което остава водещата причина за детска смъртност. Оцелелите деца имат повишен риск от сериозни заболявания и хронични състояния²⁹².

Развиващата се ендокринна система на децата също е изключително чувствителна към химичните вещества, съдържащи се в пластмасата, които могат да имитират или блокират хормони²⁹³ (фиг. 109). Въздействието върху бебетата може да се осъществява дори чрез кърмата. Освен това, нанопластмасата може да оказва отложено влияние, нарушавайки процесите на формиране на полови клетки в детска и юношеска възраст и да намалява фертилността в зряла възраст.

Хематоплацентарната бариера (ХПБ) играе ключова роля в регулирането на обмяната на вещества между майката и плода, защитавайки го от вредни вещества. Въпреки това, изследванията показват, че микро- и нанопластмасата могат да проникнат през ХПБ.

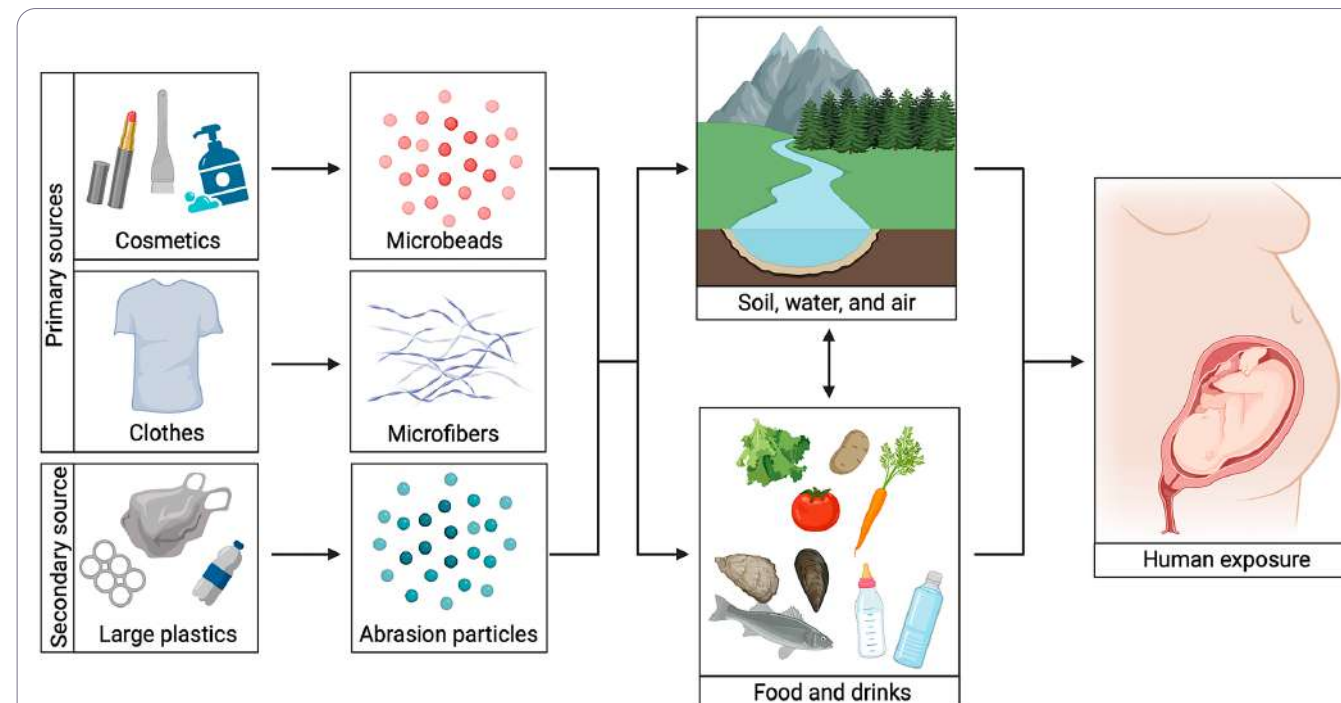
През 2020 г. изследване под ръководството на Антонио Рагуза с използване на рамановата микроспектроскопия (метод, основан на анализа на разсейването на светлина за определяне на химическия състав на материалите) разкрива присъствие на микропластмаса в плацентите на четири от шест изследвани жени с нормално протичаща бременност. В пробите са открити по 12 частици с размер 5–10 µm, включително полипропилен и пигменти, използвани в козметика, бои, лепила и хигиенни средства²⁹⁴.

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/advs.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> (Accessed May 1, 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>



Фигура 108. Попадане на МП в организма на майката.

Източник: 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>



Фигура 109. Влияние на МП върху различни органи и тъкани на развиващия се плод.

Източник: 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>

Изследване, проведено от Университета на Ню Мексико, показва, че концентрацията на микропластмаса и нанопластмаса в плацентите на недоносени деца е по-висока, отколкото при доносни. Анализ на 158 плаценти с използване на мас-спектрометрия показва, че при жените, родили преждевременно, натрупването на пластмасови частици е било в по-голям обем²⁹⁵.



„Изглежда, че наночастиците оказват косвено въздействие върху детето в утробата, потискайки образуването на кръвоносни съдове чрез посреднически вещества“, казва биоложката Тина Бюрки²⁹⁶.

Наноразмерни частици полистирол могат да предизвикат нарушения в развитието на мозъка на плода, особено когнитивни дефицити²⁹⁷.

Според изследванията, въздействието на МП по време на бременността и в първите месеци от живота може да доведе до необратими изменения в репродуктивната и централната нервна система при потомството на различни видове²⁹⁸.

Постнатално въздействие на микро- и нанопластмасата върху новородените

Новородените се сблъскват с непрекъснато постъпване на МНП от външната среда.

Според изследване от 2020 г.²⁹⁹, бебетата могат да поглъщат до 4,5 милиона пластмасови частици дневно, само докато се хранят от полипропиленови шишета. А това са повечето от детските шишета, използвани по света.

Бебетата могат също да поглъщат микропластмаса с майчиното мляко. През 2022 г. анализ на кърмата на 34 здрави жени показва микропластмаса в 76% от пробите³⁰⁰ (фиг. 110). МНП може да има отложено влияние, нарушавайки процесите на формиране на полови клетки в детска и юношеска възраст и да намалява фертилността в зряла възраст.

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.bjrt.admin.ch/en/nsb?id=101285> (Accessed May 1, 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>

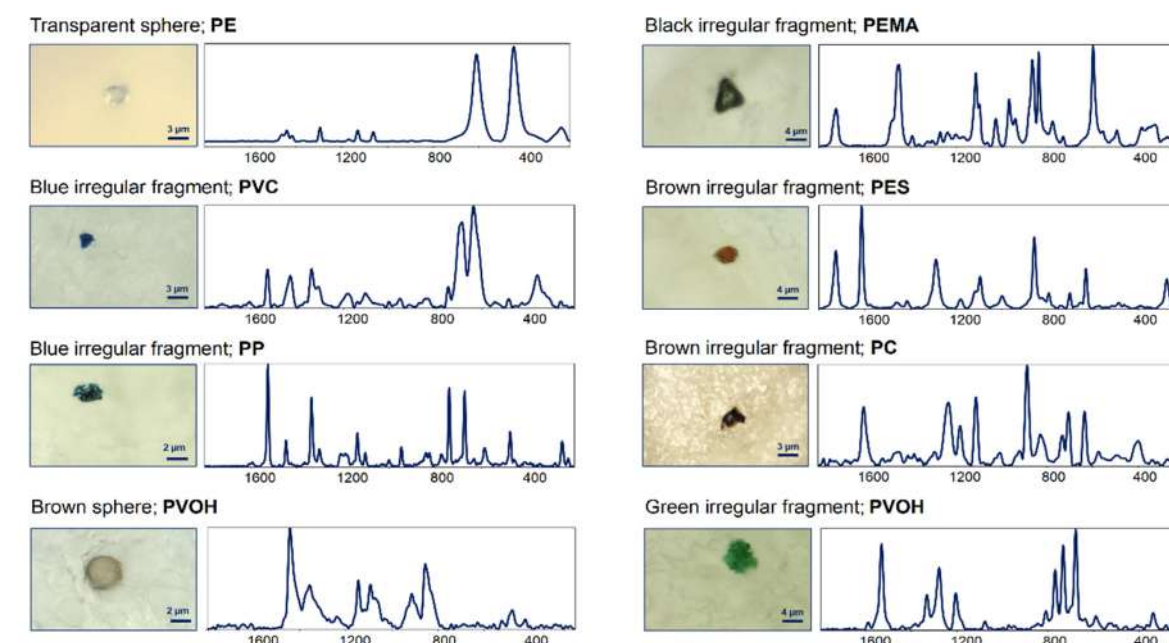
²⁹⁸ Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. Cureus 16, e60712 (2024).

<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>



Фигура 110. Микрофотографии и спектри на комбинационно разсейване (вълнови числа, cm^{-1}) на някои избрани МП, открити в анализирани проби кърма. ПЕ: полиетилен; ПВХ: поливинилхлорид; ПП: полипропилен; ПВС: поливинилов алкохол; ПЕВА: поли(етилен-ко-винилацетат); ПЕМА: поли(етилметакрилат); ПЕС: полиестер и ПК: поликарбонат.

Източник: Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. Polymers 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>

Допълнителни данни показват, че нивото на МНП в изпражненията на кърмачетата е 14 пъти по-високо в сравнение с тези при възрастните³⁰¹.

Нанопластмасите и свързаните с тях химикали нарушават молекулярната структура и функционалността на кърмата. Тези съединения могат да променят протеините в човешката кърма и в храните за кърмачета, което може да доведе до проблеми в развитието на по-късен етап от живота^{302, 303}.

Високите концентрации на МНП оказват кумулативно токсично въздействие върху развиващия се организъм. Прониквайки в клетките, нанопластмасата може да предизвика структурни увреждания на ДНК и да наруши метаболитните процеси. Тези ефекти повишават риска от генетични мутации и дългосрочни патологии, което създава заплаха за здравето на бъдещите поколения.

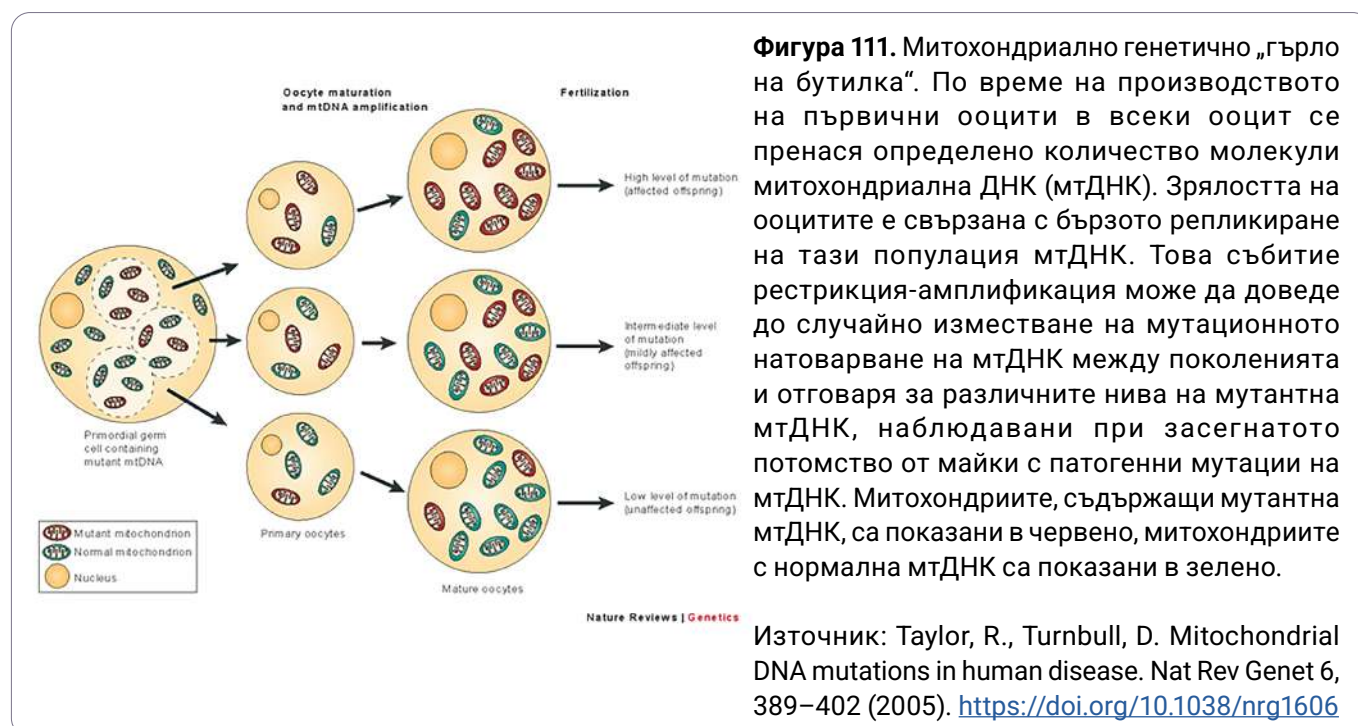
³⁰¹ Zhang, J., Wang, L., Trasande, L. & Kannan, K. Occurrence of Polyethylene Terephthalate and Polycarbonate Microplastics in Infant and Adult Feces. Environ. Sci. Technol. Lett. 8, 989–994 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00559>

³⁰² 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>

³⁰³ 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>

Последици от въздействието на МНП и връзката му с вродени аномалии

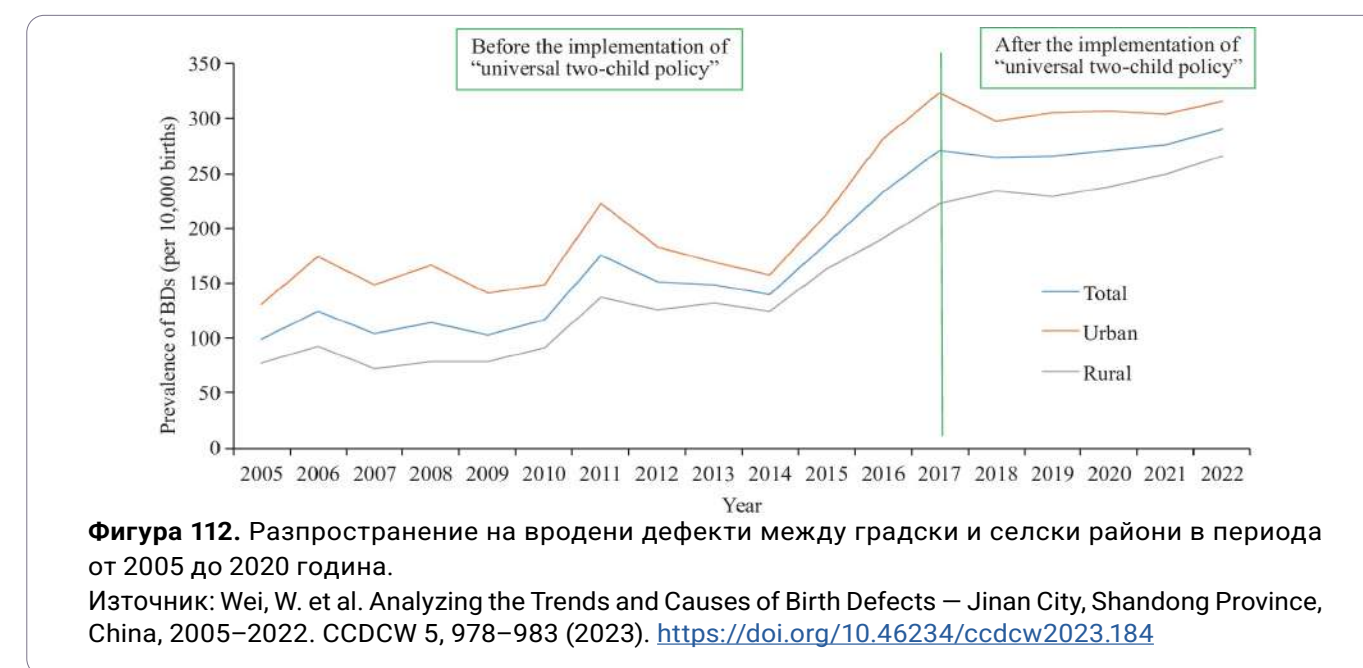
Освен своето всепроникващо в тъканите и клетките свойство, МНП притежава и друга достатъчно опасна способност — да се „предава по наследство“ на бъдещите поколения. При деленето на клетката, фрагменти от микро- и нанопластмасата преминават от клетка в клетка. Освен всичко останало, благодарение на малките си размери и наличието на статичен електрически заряд, те лесно преодоляват хематоплацентарната бариера и проникват в тъканите и клетките на плода, оказвайки своето пагубно въздействие върху развиващия се организъм. И преди всичко, както нееднократно беше подчертано в доклада, микро- и нанопластмасата водят до митохондриална дисфункция. Скорошно менделеевско рандомизирано изследване предостави убедителни доказателства за причинно-следствена връзка между експресията на митохондриални белтъци и риска от вродени аномалии. В изследването са използвани генетични варианти като инструментални променливи, за да се намалят отклоненията, които обикновено се свързват с данните от наблюденията. Сред 66 признака на митохондриални белтъци са установени значими асоциации с пороци на сърцето, ухото, нервната система, пикочо-половата система и крайниците. Това потвърждава хипотезата за ключовата роля на митохондриалната активност в ембрионалния морфогенез³⁰⁴. Мутации митохондриална ДНК (мтДНК), както наследствени, така и *de novo*, причиняват широк спектър клинични синдроми: MELAS, MERRF, NARP, синдром на Лея и др. Те засягат предимно органи с висока консумация на енергия — сърце, мозък, мускули, очи. Предаването се осъществява изключително по майчина линия, което се дължи на митохондриалния произход на ооцита (фиг. 111). Тези разстройства често се проявяват още в ранна възраст и се характеризират с тежки неврологични и метаболитни нарушения.



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>

Децата с митохондриални разстройства често се сблъскват със забавяния в развитието, мускулна слабост, когнитивни нарушения и нарушена координация. Синдромът на Кернс-Сейра, синдромът на Барт, болестта на Алперс и други заболявания могат да доведат до сериозни последици, включително инвалидизация или фатален изход.

През последните две десетилетия лекарите регистрират тревожно увеличение на вродените дефекти при новородени. Само в Китай честотата на такива дефекти се е увеличила почти тройно — от 99,15 на 10 000 раждания през 2005 г. до 290,27 на 10 000 през 2022 г.³⁰⁵ (фиг. 112). Подобна динамика се наблюдава и в други страни. Причините за този скок са многокомпонентни, но все повече научни данни сочат към нова, бързо нарастваща заплаха — микропластмасата и особено нанопластмасата са способни да проникват в ембрионалните тъкани и да пречат на формирането на органите и биологичните системи.



Електростатичният заряд, който носи нанопластмасата, е особено опасен в ембрионалните тъкани, където всяка грешка е потенциална аномалия. Тези частици демонстрират повишена адхезия към повърхностите на клетките, включително към клетките на нервния гребен — критични участници във формирането на сърцето, съдовете и черепно-лицевите структури. В експеримент с пилешки ембриони нанопластмасата предизвиква тежки пороци, включително дефекти на сърцето и големите съдове. Една от най-бързо разпространяващите се аномалии е гастрошизисът — порок на развитие на предната коремна стена, при който органите на плода излизат навън през дефект в кожата и мускулите (фиг. 113, 114, 115). Според международни данни, разпространението му се е увеличило с 161 % през последните три десетилетия, а сред майки под 20 години — няколко пъти³⁰⁶. Предполага се, че нанопластмасата пречи на развитието на коремната стена по време на ранната бременност (4-8 седмица), предизвиквайки възпаление и нарушение в затварянето на предната част на тялото.

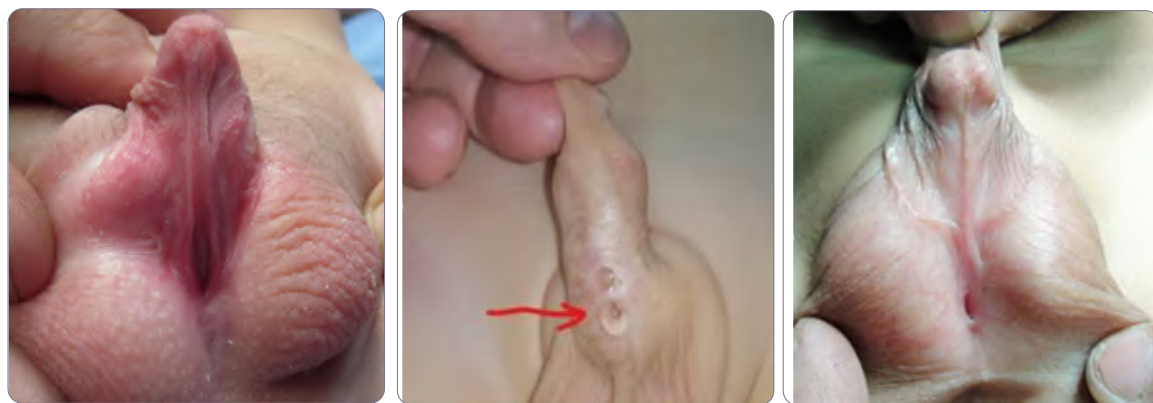
³⁰⁵Wei, W. et al. Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects — Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022. *CCDCW* 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>

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>



Фиг. 113-115. Гастрошизис

Другата аномалия, хипоспадия — отклонение, при което уретрата при момчетата се отваря на неправилно място³⁰⁷ — също показва стабилен ръст (фиг. 116, 117, 118). Например, в САЩ от 1997 до 2018 г. количественото увеличение на случаите е около 1,06 на 1000 живородени момчета (от 6,1 до 7,16 на 1000), а процентният ръст достига приблизително 17%³⁰⁸. Изследвания върху животински модели показват, че въздействието на фталати, които често присъстват в микропластмасата, нарушава синтеза на тестостерон при мъжките фетуси (ембриони).



Фиг. 116-118. Хипоспадия

Тези вещества, закрепени на заредената повърхност на нанопластмасата, лесно се пренасят в кръвния поток и плацентата, засилвайки хормоналните смущения в критичните периоди на полова диференциация. На този фон се регистрира увеличение на честотата на синдрома на Даун, трисомията, атриовентрикуларните дефекти на сърцето и други сериозни нарушения — от 12,78 на 10 000 живородени през 1999–2001 г. до 15,55 на 10 000 през 2016–2020 г.³⁰⁹

Паралелно се наблюдава ръст на психоневрологични проблеми при децата, включително тревожни разстройства и когнитивни дефицити. Въпреки че пряката причинно-следствена връзка с микропластмасата все още се изучава, известните механизми — възпаление, епигенетична модулация, митохондриални дисфункции — дават основания да се подозира, че тя е един от факторите^{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>

Изводи и перспективи. Възможно ли е да се намали въздействието на МНП върху човешкото здраве

Анализът на събраните данни показва, че микро- и нанопластмасата представляват значим и подценен рисков фактор за човешкото здраве. Съвременните научни данни убедително доказват, че микро- и нанопластмасата е неотменна част от глобалното токсично натоварване върху човешкия организъм. Благодарение на способността си да преодолява биологични бариери и да се натрупва в различни тъкани, включително мозък, сърце, бели дробове и плацента, МНП оказва токсично въздействие на молекулярно, клетъчно и системно ниво. В съчетание с химически добавки и абсорбирани замърсители от околната среда, пластмасата се превръща във фактор, който може да предизвика хронично възпаление, оксидативен стрес, митохондриални дисфункции и мутации на ДНК — процеси, стоящи в основата на широк спектър от заболявания, включително невродегенеративни, онкологични, сърдечно-съдови, ендокринни и автоимунни нарушения. Особено тревожно е, че частиците МНП практически не се изхвърлят от организма, а се натрупват с възрастта, усилвайки кумулативния ефект от тяхното въздействие.

Съвременните данни потвърждават, че избягването на контакт с МНП не е възможно: той присъства във въздуха, водата, храната и дори вътре в клетките на животни и растения, които консумираме. Така въздействието на пластмасовите частици става всеобхватно и непрекъснато — от вътреутробното развитие до късните етапи на живота. Вдишването е особено опасно, тъй като наночастиците могат да заобиколят кръвно-мозъчната бариера и да се натрупат директно в мозъчната тъкан, което прави централната нервна система една от най-уязвимите цели.

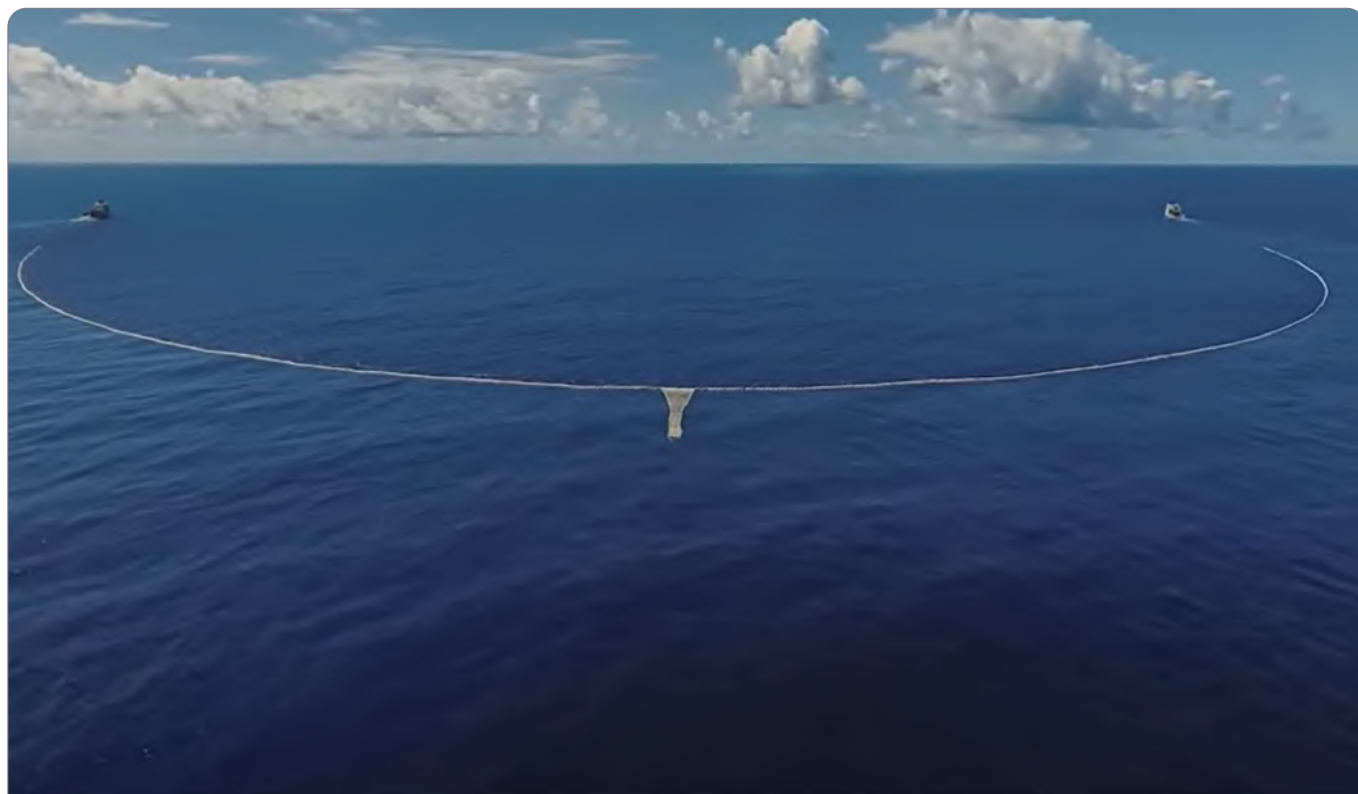
Допълнителният биологичен риск се дължи на електростатичната активност на частиците МНП, която засилва тяхното взаимодействие с биологичните структури и спомага за нарушаването на хомеостазата. Отбелязва се също тяхната потенциална роля в пренасянето на патогени и микроорганизми, резистентни към антибиотици, което придава на проблема с микропластмасовото и нанопластмасовото замърсяване мултидисциплинарен характер, засягащ екологията, токсикологията, имунологията, неврологията и репродуктивната медицина. В тази връзка, в рамките на стратегията за противодействие на заплахата от МНП, едно от стратегическите направления, предложени от „АЛЛАТРА“, е разработването на методи за неутрализиране или екраниране на електростатичния заряд на нанопластика. Намалването на електростатичната активност на такива частици може значително да понижи тяхната вредоносност и да забави натрупването им в организма. Според оценките на авторите на доклада, методите за екраниране или неутрализиране на заряда могат да намалят потенциалния риск, свързан с МНП, поне с 50 %. Това дава възможност да се спечели необходимото време за разработването на по-комплексни стратегии за диагностика, профилактика и извеждане на МНП от организма. В този контекст особено значение придобиват по-нататъшните изследвания в областите на биофизиката, нанотехнологиите и молекулярната токсикология.

Въпреки нарастващия брой научни публикации по тази тема, въздействието на МНП върху здравето на човека все още остава недостатъчно изследвано и слабо взето под внимание при формирането на стратегии за опазване на здравето и околната среда. Като се има предвид мащабът на замърсяването с пластмаса, биологичната активност на частиците и потенциално необратимите последици от тяхното въздействие, това направление изисква приоритетно внимание от страна на научната общност и здравните органи, систематизиране на данните, разработване на стандарти за оценка на рисковете, както и разширяване на междудържавното и международното научно сътрудничество.

АНАЛИЗ НА СЪВРЕМЕННИТЕ ПОДХОДИ ЗА МИНИМИЗИРАНЕ НА ЗАМЪРСЯВАНЕТО С ПЛАСТМАСА

Технологии за отстраняване на едра пластмаса от водни екосистеми

Инициативите за смекчаване на последиците от замърсяването на океана са насочени основно към отстраняване на видимите едри отпадъци от повърхността на водата. На днешен ден една от най-мащабните инициативи, насочена към събиране на пластмаса и други видове плаващи отпадъци, е проектът The Ocean Cleanup. Техните плаващи системи улавят повърхностни отпадъци (фиг. 119), които след това се сортират и опаковат за по-нататъшна преработка или унищожаване.



Фигура 119. На изображението е показана технологията Ocean Cleanup в действие. Дълъг U-образна плаваща бариера от здрав материал събира пластмасови отпадъци от повърхността на океана.

Източник: The Ocean Cleanup. Cleaning up plastic pollution from the oceans. <https://theoceancleanup.com> (Дата на достъп: 01.05.2025).

Въпреки че този метод изглежда обещаващ, важно е да се вземат предвид някои аспекти, които изискват внимание:

1. Процесът на събиране на отпадъци не е избиращ и заедно с пластмасата в капана попадат живи организми, като микроскопични водорасли, рибни ларви и медузи. Понастоящем липсват количествени оценки за обема на съпътстващия улов, но евентуалното мащабно изземване на тези организми може да има отрицателни последици за морските екосистеми, като предизвика смущения в естествените хранителни вериги. Въпреки предприетите мерки за осигуряване на безопасността на морските обитатели, проблемът остава нерешен.

2. Активистите искрено се стремят да прочистят океана, но предприетите усилия не са достатъчни за постигане на значими резултати.

Към ноември 2024 година инициативата The Ocean Cleanup е извадила от Световния океан около 20 000 тона пластмасови отпадъци. Това без съмнение е значим резултат. В контекста на глобалния проблем обаче това представлява едва 0,01 % от общия обем пластмасови отпадъци в океана, който се оценява приблизително на 200 млн. тона. Освен това трябва да се има предвид и постъпването на нови отпадъци, което възлиза на около 11 млн. тона годишно (фигура 120). Тези данни подчертават несъразмерността между усилията за почистване и мащаба на проблема.



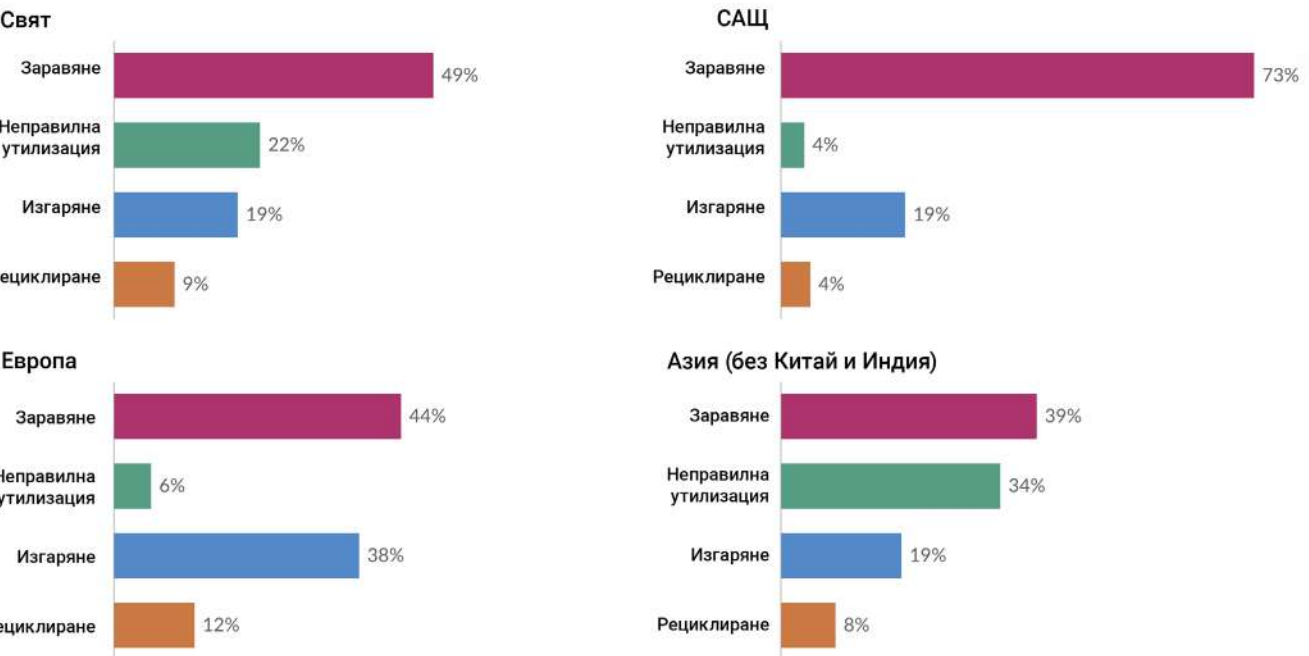
Фигура 120. Графиката сравнява три ключови показателя, свързани с пластмасовото замърсяване на океаните: количеството плаващи пластмасови отпадъци, количеството пластмаса, изхвърляна ежегодно в океана, и обемите на нейното извличане от компанията Ocean Cleanup.

Източник на данните: The Ocean Cleanup. <https://theoceancleanup.com> (Дата на достъп: 01.05.2025).

3. Ключов въпрос остава по-нататъшната съдба на извадената пластмаса. Настоящите световни показатели за преработка на пластмасови отпадъци не надвишават 9 % (фиг. 121). В тази връзка съществува вероятност значителна част от събраната пластмаса да бъде насочена към сметища за депониране на отпадъци, което не решава проблема със замърсяването в дългосрочна перспектива.

Дял на пластмасовите отпадъци, които се преработват, заравят, изгарят и неправилно се изхвърлят – 2019 г.

Неправилно изхвърлените пластмасови отпадъци включват материали, изгаряни на открити сметища, изхвърляни в морета или открити водоеми или депонирани в нехигиенични сметища и депа.



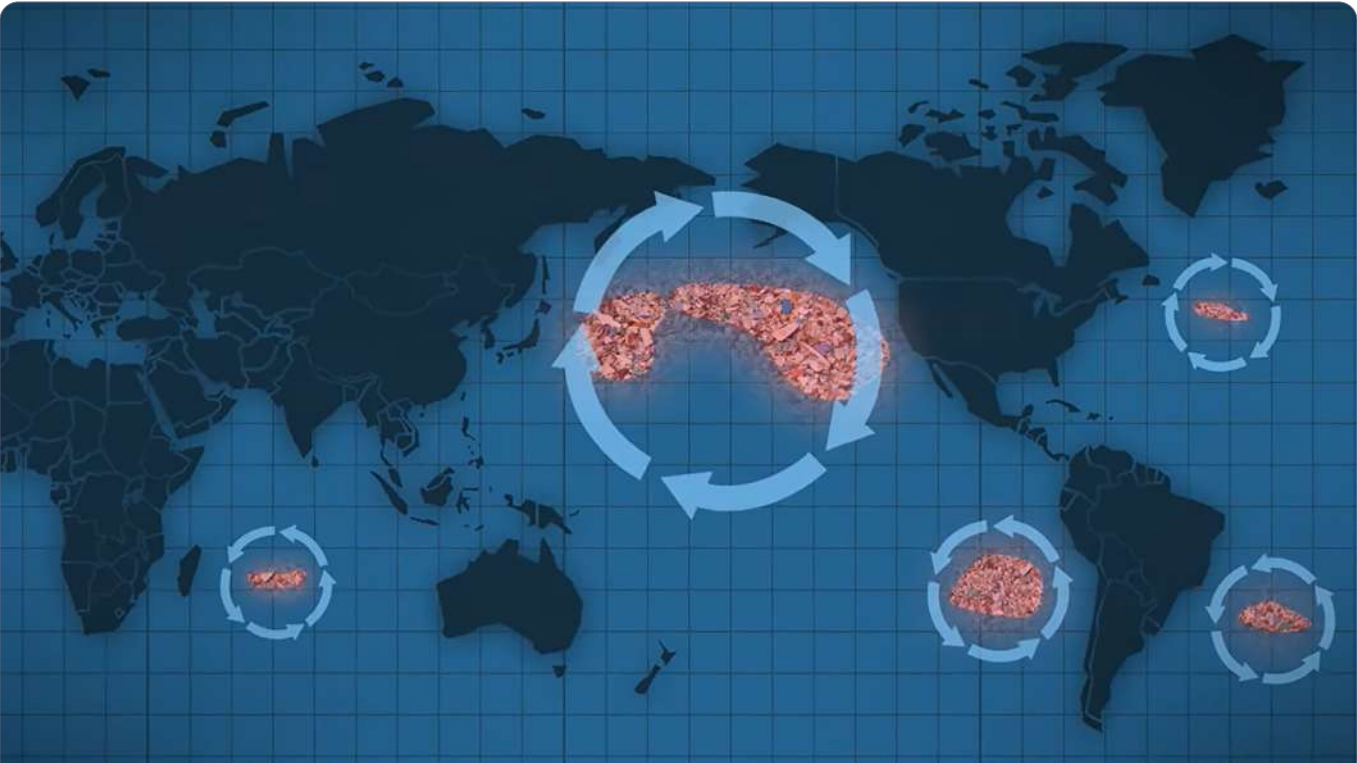
Източник на данни: OECD (2023) OurWorldinData.org/plastic-pollution | CC BY
Забележка: Сборните стойности по региони са изчислени от проекта Our World in Data на базата на данни, предоставени от OECD.

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

Фигура 121. Дял на пластмасовите отпадъци, които се преработват, депонират, изгарят и неправилно се обезвреждат, 2019 година. Неправилно обезвреждане включва отпадъци, изгаряни на открити сметища, изхвърляни в морета или открити водоеми, или извозвани на несанитарни сметища и депа.

Източник на данни: регионалните обобщени данни са изчислени от проекта Our World in Data и се основават на данни, посочени от ОИСП. [OurWorldinData.org/plastic-pollution](https://ourworldindata.org/plastic-pollution) | CC BY <https://ourworldindata.org/grapher/share-plastic-fate?time=2019..latest>

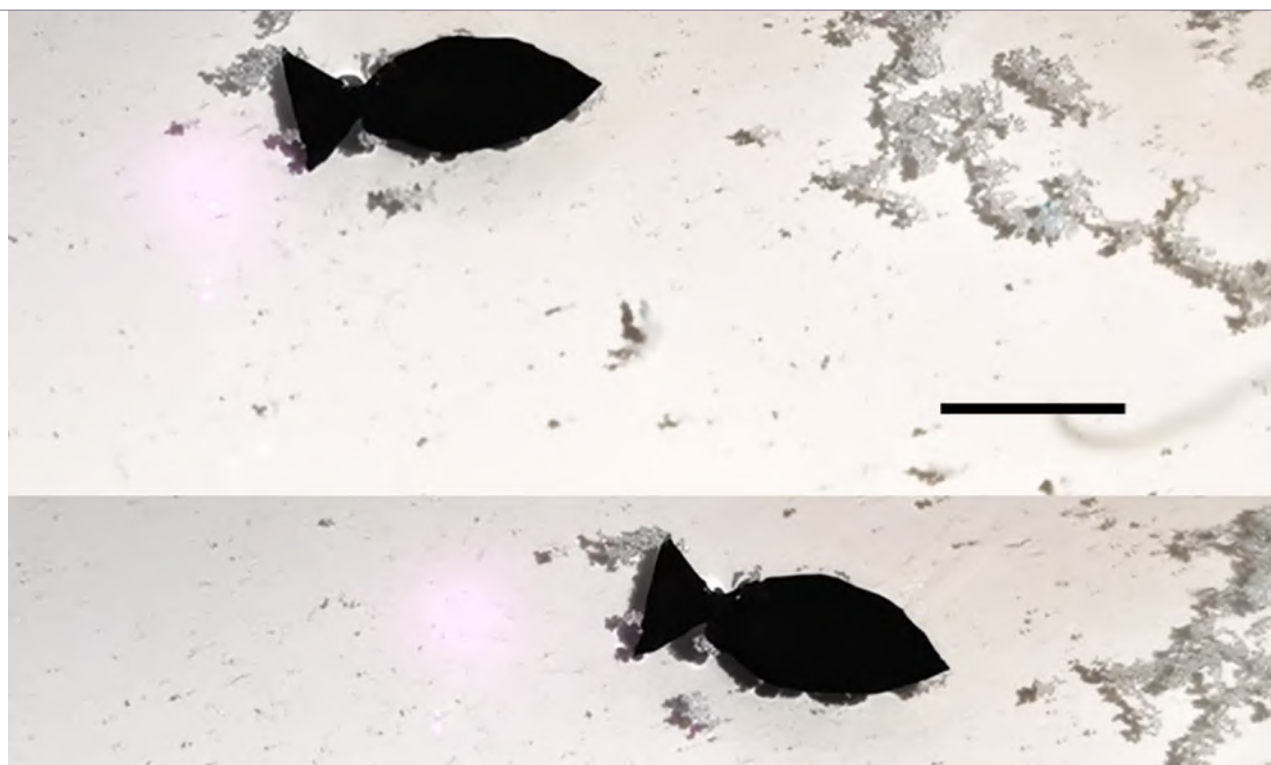
Освен това операциите по почистване на океана са свързани със значителни финансови разходи. Например, отдалечеността на Голямото тихоокеанско сметище от териториалните води на която и да е държава създава ситуация, при която отговорността за финансиране и провеждане на почистващи дейности остава неуточнена. По оценка на Чарлз Мур — океанограф и изследовател, първооткривател на Голямото тихоокеанско сметище — пълномащабното почистване на това сметище „би довело до фалит всяка страна“, която предприеме подобни усилия. Следва да се отбележи, че в Световния океан са идентифицирани пет подобни натрупвания на отпадъци (фиг. 122), което допълнително изостря проблема.



Фигура 122. Схематично изображение на местоположението на петте основни натрупвания на отпадъци в Световния океан

Важно е да се отбележи, че видимият едър боклук представлява само част от общия проблем с пластмасовото замърсяване на океана. Според Мелани Бергман, морски биолог от Института „Алфред Вегенер“, **„става дума само за пластмасата на повърхността на океана, като това е само малка част — по-малко от 1 % от това, което всъщност се намира в океана“**.

С напредващата фрагментация на пластмасата до микро- и наночастици задачата по почистване на океана от този вид замърсяване се усложнява значително. Някои експериментални технологии за отстраняване на микропластмаса от водата вече съществуват. Например, изследователи от Съчуанския университет са разработили миниатюрна рибка-робот (фиг. 123), която е способна да плува във водна среда и да адсорбира намиращите се наблизо свободно плаващи частици микропластмаса³¹¹. Този бионичен робот с дължина 13 мм ефективно събира частици микропластмаса благодарение на здравите химически връзки и електростатичните взаимодействия между материалите на неговия корпус и компонентите на микропластмасата, като органични оцветители, антибиотици и тежки метали.



Фигура 123. На изображението е показана миниатюрна рибка-робот, разработена от изследователи от Съчуанския университет. Компактното устройство, наподобяващо истинска риба, плува във водна среда, като активно адсорбира свободно плаващи частици микропластмаса.
<https://www.theguardian.com/environment/2022/jun/22/scientists-unveil-bionic-robo-fish-to-remove-microplastics-from-seas>

Въпреки подобни иновации, практическото приложение на такива технологии в глобален мащаб към момента е ограничено. Миниатюрните роботи адсорбират микропластмаса само в непосредствена близост до себе си, което прави процеса локален — дори в голямо количество, те не са способни да обхванат обемите на Световния океан. Освен това, самите те могат да се превърнат в част от хранителната верига. Съществуват също така и неясноти относно способността на роботите да функционират в сложни океански условия (течения, налягане, соленост). Следователно съществуващите решения засега не са достатъчно ефективни и се сблъскват с трудности при мащабиране.

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>

Настоящи методи за пречистване от микро- и микропластмаса

Все по-интензивно се разглежда потенциалът за прилагане на микроорганизми, особено бактерии, за ензимно разграждане на синтетични полимери, преди всичко полиетилентерефталат (ПЕТ). Тази технология се представя като потенциално екологично безопасна алтернатива на традиционния метод за обезвреждане на пластмасови отпадъци — изгарянето. Въпреки това натрупаните до момента емпирични данни позволяват да се постави под съмнение нейната ефективност, безопасност и приложимост в промишлен мащаб.

През 2016 година екип японски учени под ръководството на Шьосуке Ода откри бактерията *Ideonella sakaiensis*, способна да разгражда полиетилентерефталат чрез продукция на два ензима — ПЕТаза и МЕТаза. Това се превърна във важно събитие в микробиологията³¹². Въпреки това лабораторни изследвания показаха, че процесът на разграждане е изключително бавен: за разграждането на пластмасово фолио с маса 20 грама на бактериите им бяха необходими около седем седмици при оптимални условия. Очевидно е, че подобна скорост на обезвреждане не може да бъде призната за задоволителна за решаването на проблема с пластмасовото замърсяване. В мащабите на световното замърсяване, при което милиони тонове пластмаса попадат в природата ежегодно, тази скорост е съпоставима с опит да се изчерпи океан с чаена лъжичка.

Научните усилия са съсредоточени върху модификацията на ензима ПЕТаза, който бактерията използва за разрушаване на пластмасата. Въпреки това, както самите изследователи признават, ензимът на *Ideonella sakaiensis* се намира в ранен етап на еволюция. Неговата ефективност е ниска, стабилността — ограничена, а ускоряването на реакцията изисква температури, нетипични за естествената среда. Дори генното инженерство засега не може да предвиди кои мутации действително ще доведат до подобрение. Става дума за „две стъпки напред, една назад“, както се изразява Елизабет Бел от Националната лаборатория за възобновяема енергия на САЩ.

Освен това ензимното разграждане далеч не е универсално. Само някои видове пластмаса (например ПЕТ) теоретично подлежат на такова разграждане. Полиетиленът, полипропиленът и други широко използвани материали остават практически неразградими за микроорганизмите. И учени от списание *Nature* твърдят, че повечето пластмаси са твърде енергоемки за ефективно биохимично разрушаване.

Дори ако си представим, че се появи такъв високоефективен микроб, възниква много по-тревожен въпрос: възможно ли е той безопасно да бъде пуснат в околната среда? **Всяка генетично модифицирана бактерия е потенциален източник на екологична катастрофа. В момента почти всички страни строго регулират или напълно забраняват пускането на такива организми в дивата природа.**

³¹²Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). Science 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.1235999>

Причините са очевидни: неизвестно е как бактерията ще се държи след „изпълнение на своята мисия“. Няма ли да започне да разрушава други важни органични съединения? Няма ли да измести други микроби? Няма ли да доведе до мутации с още по-непредвидими последици?

По този начин един екологичен проблем може лесно да бъде заменен с друг — много по-непредсказуем и разрушителен.

Въпреки безспорното значение на фундаменталните изследвания в областта на бактериалната преработка на пластмаси, на настоящия етап тази технология не може да бъде разглеждана като ефективно, мащабируемо и безопасно решение на проблема с пластмасовото замърсяване.

Изследване на влиянието на кипящата вода върху отделянето на микропластмаса: ефективност и рискове

Специалисти в областта на биомедицинското инженерство и изследването на микропластмасата от Медицинския университет в Гуанчжоу и университета Цзинан (Китай) са провели изследване³¹³. Експериментът е бил насочен към изучаване на влиянието на кипенето на водата с повишено съдържание на калциеви соли (твърда вода) върху отделянето на микропластмаса.

За изследването са били взети проби от водопроводна вода с различна твърдост от град Гуанчжоу. Към водата са били добавени 3 вида пластмасови частици: полистирен, полиетилен и полипропилен — с размер от 0,1 до 150 микрометра. Пробите са били варени в продължение на 5 минути, след което са ги охлаждали и е било измервано остатъчното съдържание на микропластмаса.

По време на варенето в твърда вода, наситена с калциеви соли, се образува неразтворим калциев карбонат (CaCO_3), известен като котлен камък. Изследователите са предположили, че частиците микропластмаса могат да се свързват с кристалите на калциевия карбонат и да се утаяват, което обяснява понижаването на концентрацията на микропластмасата във врялата вода.

Ефективността на пречистването се е оказала най-висока при пробите с висока твърдост (300 mg CaCO_3 на литър), където варенето е позволило отстраняването на до 90 % от микропластмасата. В пробите с мека вода (по-малко от 60 mg CaCO_3 на литър) ефектът бил значително по-нисък: отстранявали се едва 25 % от пластмасовите частици.

Въпреки известния положителен ефект от варенето на твърда вода, възниква важен въпрос: възможността за попадане на микро- и нанопластмаса във въздуха. При варене на водата

се отделя водна пара, заедно с която частиците микропластмаса могат да попаднат във въздуха. Вдишването на такива частици представлява по-сериозна заплаха от поглъщането им с храна или вода.

Изследвания показват, че при вдишване нанопластмасата може да проникне в мозъка за по-малко от 2 часа, докато при попадане в храносмилателната система микропластмасата частично се извежда от организма. Попадането на пластмаса в мозъчната тъкан е свързано с дългосрочни рискове, тъй като извеждането на такива частици от мозъка е невъзможно.

По този начин методът с варене на вода потенциално увеличава риска от замърсяване на въздуха с микропластмаса, което може да се окаже още по-опасно за човешкото здраве. Това подчертава необходимостта от разработване на по-безопасни и ефективни методи за пречистване на водата..

Пиролизата като метод за преработка на пластмаса: ефективност

Пиролизата представлява една от технологиите за преработка на пластмаса, основана на нейното термично разграждане при високи температури в среда с ограничен достъп на кислород. Процесът обикновено се провежда при температури между 300 и 800 °C и позволява получаване на газообразни и течни въглеводородни съединения, както и твърд остатък под формата на въглерод.

При високотемпературното разпадане полимерните вериги на пластмасата се разрушават и образуват смес от въглеводороди, която може да се използва като гориво. Въпреки това този метод, подобно на традиционното изгаряне на пластмаса, е съпроводен със значителни екологични рискове, свързани с отделянето на нанопластмаса.

Под въздействието на високите температури пластмасата се разрушава до изключително фини частици, включително нанопластмаса (с размер под 100 нанометра). Тези частици са толкова малки, че съвременните филтриращи системи не могат напълно да ги задържат, в резултат на което те попадат в атмосферата.

Освен това изгарянето на пластмаса е съпроводено с отделянето на диоксини и фурани — високо токсични съединения с доказан канцерогенен ефект³¹⁴.

Следователно използването на пиролиза и изгаряне на пластмаса за производство на гориво е свързано със значителен риск от атмосферни емисии, което представлява заплаха не само за околната среда, но и за човешкото здраве. Такива методи за обезвреждане на пластмасови отпадъци не могат да се считат за безопасни и устойчиви решения на проблема със замърсяването. Цената на такова гориво е заплахата за живота и здравето на хората.

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>

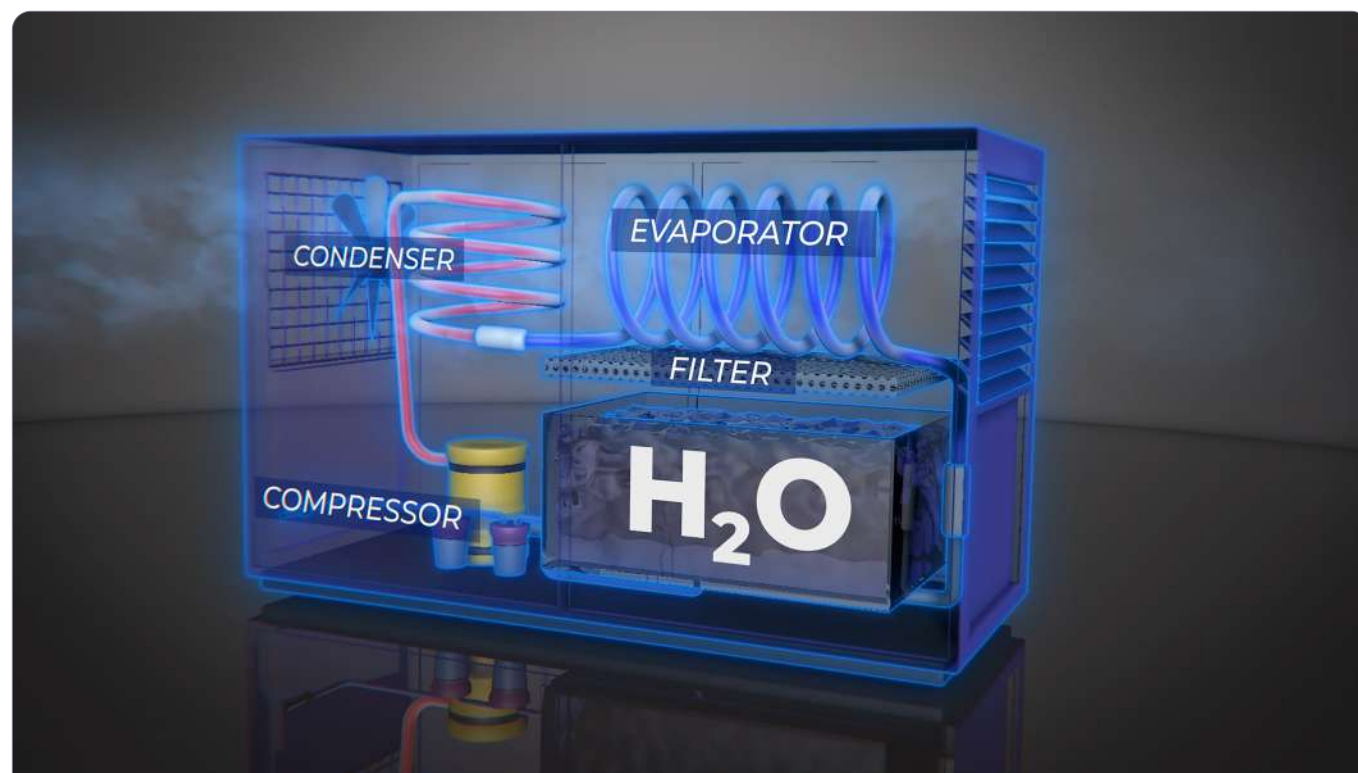
³¹⁴Baca, D. et al. Dioxins and plastic waste: A scientometric analysis and systematic literature review of the detection methods. Environmental Advances 13, 100439 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100439>

ПОДХОДИ НА НАУЧНАТА ОБЩНОСТ „АЛЛАТРА“ В БОРБАТА С ЕПИДЕМИЯТА ОТ МИКРО- И НАНОПЛАСТМАСА

Технология на атмосферните генератори на вода (АГВ) за пречистване на океана от МНП

Възстановяването на екологичното равновесие изисква масово внедряване на иновативни технологии, като например атмосферните генератори за вода (АГВ). Към днешна дата такива устройства се предлагат в широк диапазон — от битови до индустриални модели. Тези устройства са способни да произвеждат питейна вода от въздуха, като ефективно премахват замърсителите, включително микропластмасата (фиг. 124). За подобряване на вкуса и качеството водата също така може допълнително да бъде минерализирана.

Принципът на работа на генераторите се основава на кондензацията на влагата, съдържаща се във въздуха.



Фигура 124. Изображението показва схематично устройство на атмосферен генератор на вода, илюстриращо съставните му части и принципа на работа

АГВ работят по два основни технологични принципа:

1. **Технология, основана на кондензация** — при този метод околният въздух се засмуква в устройството и се подлага на контакт със студена повърхност или охлаждаща спирала, в резултат на което водните пари се кондензират в течност. Този процес наподобява образуването на влага върху студен предмет, изваден от фризер. Кондензационните АГВ функционират най-ефективно в топъл и влажен климат.

2. **Технология, основана на адсорбция** — използват се влагопоглъщащи материали, като силикагел, цеолити или метал-органични рамки, за извличане на влага от въздуха. Абсорбираната вода впоследствие се освобождава чрез нагряване на материала.

Днес такива инсталации се използват локално за осигуряване на питейна вода, включително в ситуации на климатични бедствия.

Масштабното прилагане на АГВ с цел задоволяване нуждите както на промишлеността, така и на населението, може да доведе до значително намаляване на замърсяването на океаните в рамките на няколко години.

На днешен ден основният източник на вода за битови нужди, включително готвене, са водоеми, които често съдържат високи нива на микро- и микропластмасата. Тази вода допринася за натрупването на пластмаса в човешкия организъм. Преминването към добив на вода от въздуха, а не от замърсени източници, може значително да подобри качеството на консумираната вода.

Възстановяване на екосистемите чрез естествена филтрация и атмосферни генератори за вода

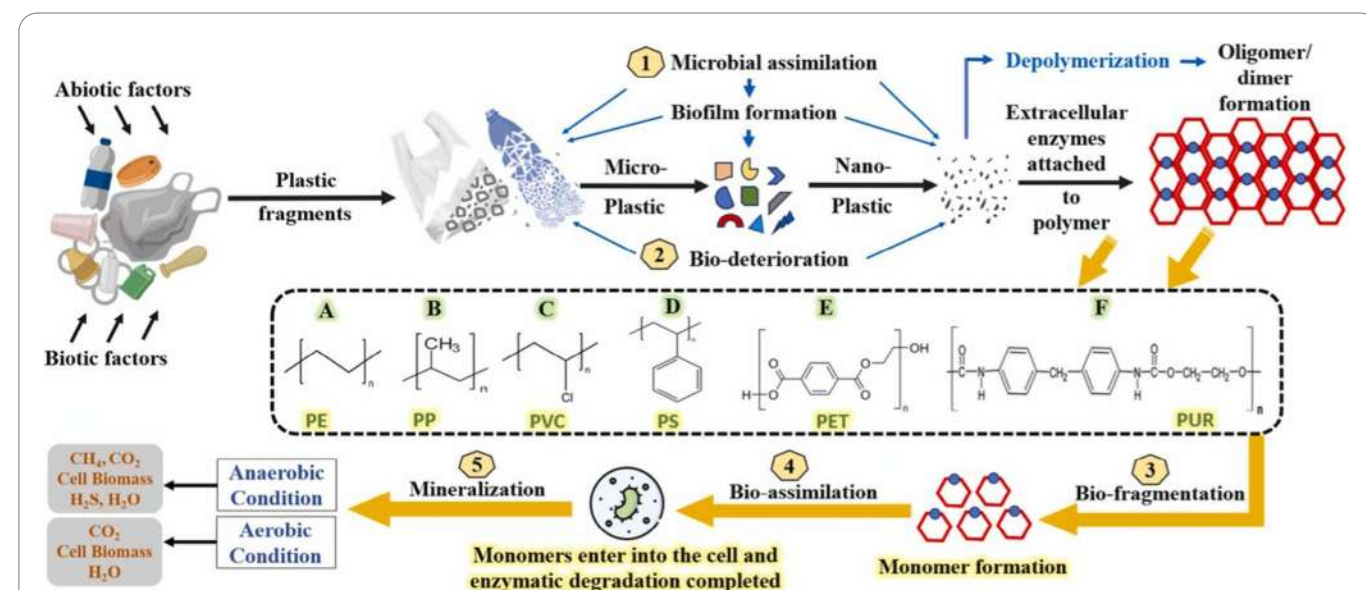
За ефективното премахване на микропластмасата от използвана вода е необходимо прилагането на иновативни технологии, съвременни филтрационни и асимилационни системи. Освен това е важно пречиствателните станции да бъдат преоборудвани така, че пречистената вода да не се излива във водоеми, а да се насочва в почвата, тъй като в почвата живеят микроорганизми, които по естествен път са способни да разграждат пластмаса³¹⁵.

Тези организми се различават съществено от генетично модифицираните или изкуствено създадените в лабораторни условия. Присъствието им в екосистемите е естествено и те не проявяват признаци на инвазивни видове в съответната среда.

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>

Изследвания³¹⁶ показват, че редица почвени микроби, обитаващи в естествена среда³¹⁷, демонстрират значителна ефективност при разграждането на полимери³¹⁸, такива като полиетилен³¹⁹ и полиетилентерефталат³²⁰. Например, най-висока активност при гъбичната деградация – средно намаляване на масата на полиетилена с $36,4 \pm 5,53\%$ за 16 седмици – е отчетена при щама *Aspergillus oryzae* A5,1.

Способността на микробите към биоразграждането на полимери се дължи на това, че те произвеждат ензими, които им позволяват да разграждат сложните молекулярни структури на пластмасите³¹⁷.



Фигура 125. Разграждане на микро- и нанопластмаса от бактериални ензими.

Източник: 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>

Тези данни, потвърдени от експериментални наблюдения, сочат потенциала за използване на природни микробни общности за намаляване на нивото на замърсяване на околната среда с микро- и нанопластмаса.

„Сред няколкото метода за рекултивация, достъпни на днешен ден, микробната рекултивация показва най-добри перспективи за разграждане или устойчиво отстраняване на микропластмасата от околната среда“, – се казва в обзорното изследване³¹⁸.

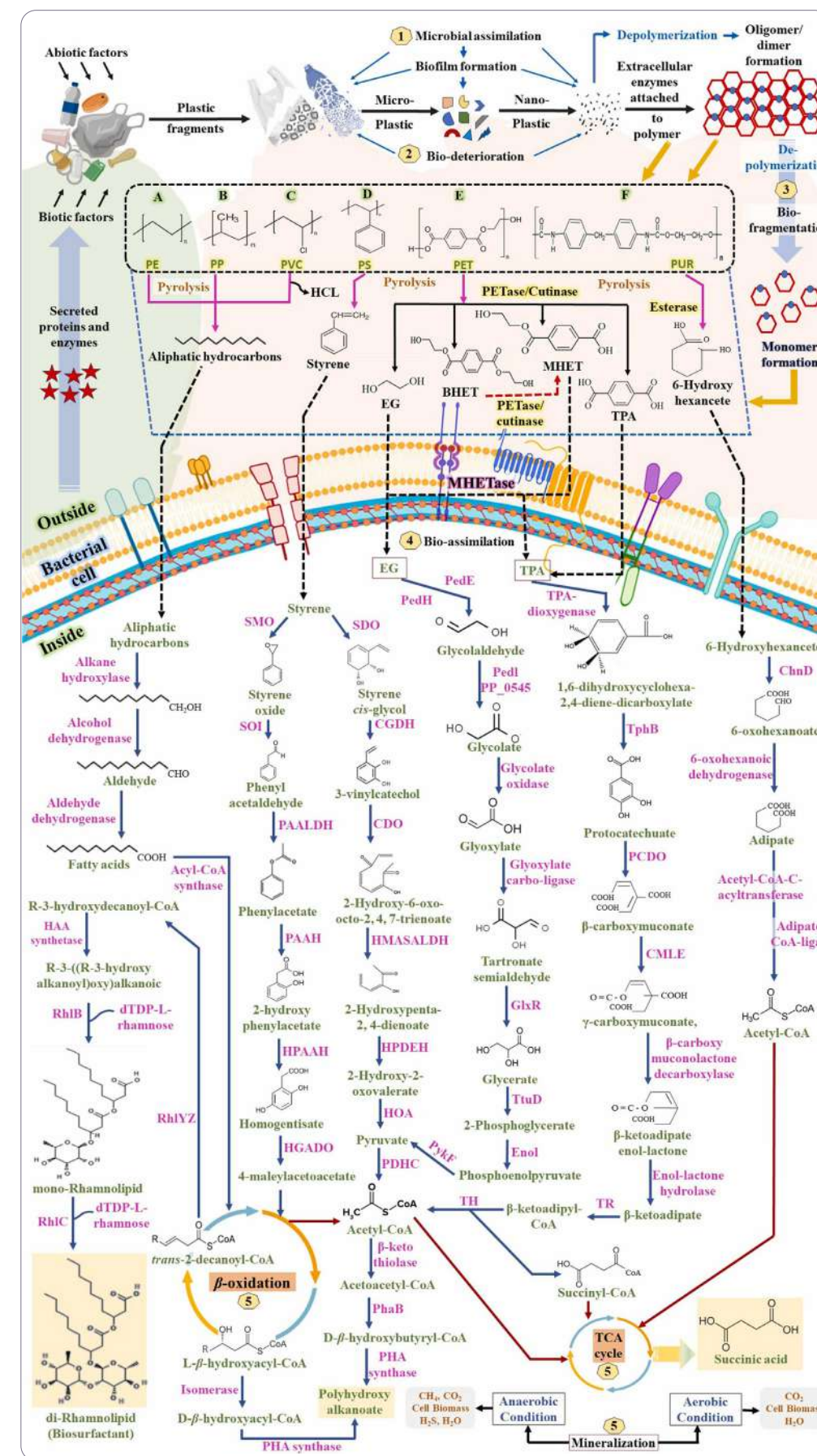
³¹⁶Auta, H. S. et al. Enhanced microbial degradation of PET and PS microplastics under natural conditions in mangrove environment. Journal of Environmental Management 304, 114273 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114273>

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.1246359>

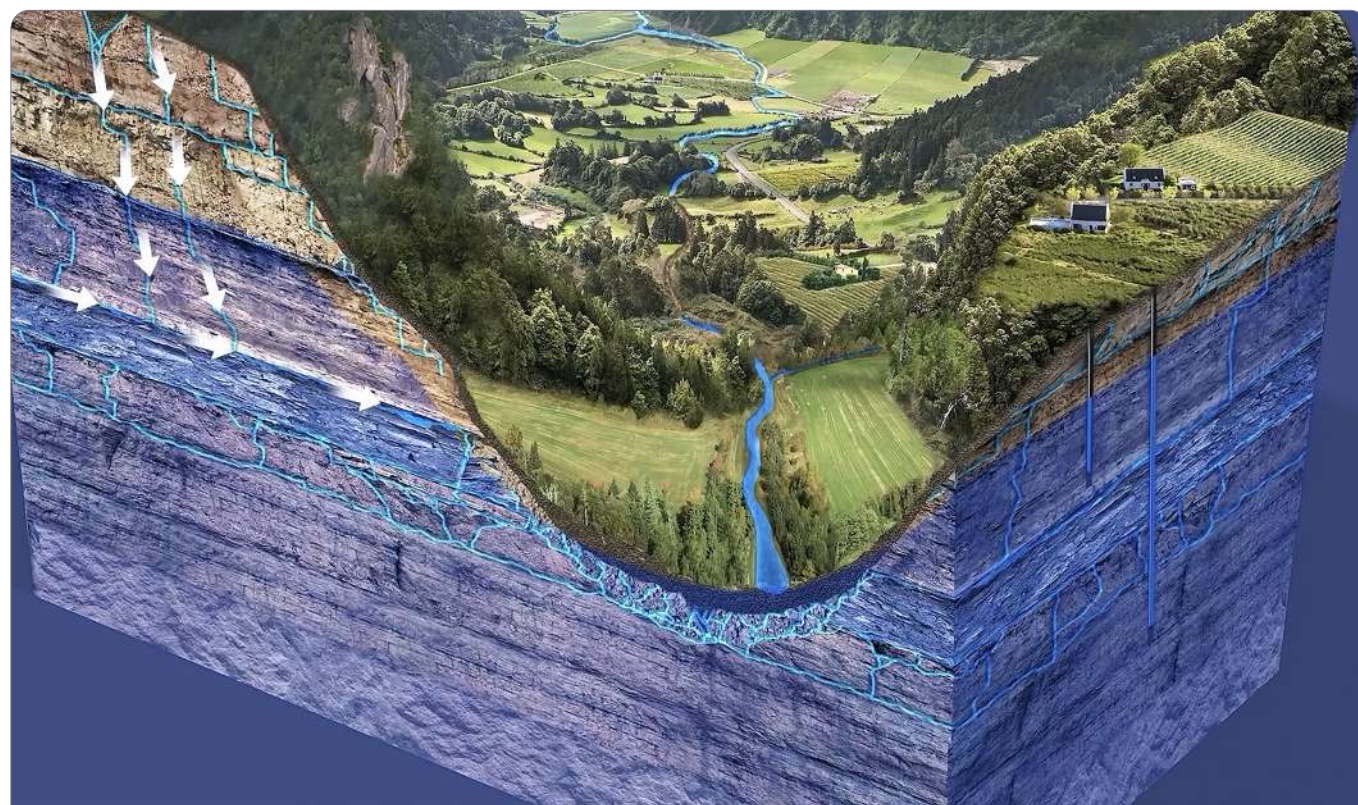


Фигура 126. Пластмасовите отпадъци се разграждат до МНЧ поради различни абиотични и биотични фактори.

Източник: 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>

По този начин, преминаването към технология за добив на вода от въздуха значително ще подобри качеството на консумираната вода, а в съчетание с технологията на микробна рекултивация това ще способства значително намаляване на микро- и нанопластмасовото замърсяване в околната среда.

В горните слоеве на почвата, както и във водоемите, концентрацията на пластмаса известно време ще остане висока. Обаче с проникването на водата на по-голяма дълбочина ще настъпи самоочистване (фиг. 127). Микроорганизмите, обитаващи почвата, ще способстват разграждането на дребните частици нанопластмаса.



Фигура 127. Схематично изображение на процеса на биологично доочистване на вода, изливана в почвата, през геоложки слоеве. Стрелките показват пътя на отпадъчните води, преминаващи през почвените и скалните слоеве, където микроорганизми и филтриращи материали премахват замърсителите. Почвените слоеве са обозначени с различни цветове: кафяво — за почва, сиво — за пясък и чакъл.

Увеличаването на обема използвана и филтрирана в пречиствателни станции вода, изливана в почвата, способства за размножаването на микроорганизми, включително бактерии, гъбички и археи, които играят основополагаща роля във формирането на здрава почва, кръговрата на хранителните вещества и устойчивостта на екосистемите. Впоследствие пречистената вода ще се просмукува в по-дълбоки слоеве и ще се връща в океаните.

Разполагането на установки на атмосферни генератори за вода в пустинни региони, както и връщането на използвана вода в почвата, изглежда като перспективно решение

за преодоляване на водната криза и борбата с опустиняването, тъй като активира процеси, способстващи за възстановяването на растителността³²¹ и екосистемите. Използването на АГВ ще доведе до подобряване на качеството на живот на местното население, решавайки проблема с недостига на питейна вода.

В съчетание с микробна рекултивация прилагането на АГВ може да се превърне във важна стъпка към устойчивото управление на водните ресурси и възстановяването на деградирани земи.

Пълният преход към АГВ предполага използването на атмосферна вода за всички нужди на населението, включително битови, промишлени и селскостопански. Внедряването на тази технология в глобален мащаб ще доведе до по-интензивно изпарение, което ще предизвика охлаждане на океана, както и ще ускори неговото пречистване. Освен това намаляването на излишната влага в атмосферата с помощта на АГВ ще намали количеството на екстремни валежи и ветрове, което може да смекчи разрушителното въздействие на природни катаклизми (подробно във филма „Вода от въздуха. Пътят към спасението на човечеството“).

Предизвикателства и рискове, свързани с прилагането на атмосферни генератори за вода

Въпреки това съществува и обратната страна на глобалното прилагане на АГВ. Проблемът се състои в това, че в контекста на използването на технологии за атмосферно генериране на вода не се отчита прякото им въздействие върху човека. Макар използването на тази технология действително да може да допринесе за пречистването на океанските води и подобряване на топлопроводимостта, масовото прилагане на АГВ също така може да доведе до значително увеличение на концентрацията на микропластмаса в атмосферата. Механизмът на функциониране на АГВ включва кондензация на влага от атмосферата, която впоследствие се възстановява за сметка на изпарения от океанските води. Тъй като тези води съдържат високи нива на микропластмаса и нанопластмаса, влагата, постъпваща в атмосферата в хода на този процес, може да пренася най-фини пластмасови частици. В резултат на това в онези региони, където ще се прилагат тези технологии, включително големи мегаполиси, нивата на нанопластмаса във вдишвания въздух могат да достигнат същите показатели, каквито понастоящем се наблюдават в крайбрежните зони. Това създава риск от увеличаване на концентрацията на нанопластмаса във въздуха, което представлява заплаха за човешкото здраве. Вдишването на нанопластмаса способства за нейното натрупване в организма, включително в главния мозък.

И това е ключовият момент. Необходимо е да се разбере, че самата идея за използване на АГВ като средство за пречистване на океански води беше издигната от учените на

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>

„АЛЛАТРА“ преди повече от 20 години — в условия, когато концентрацията на микропластмаса в атмосферата оставаше изключително ниска. В този период реализацията на подобни технологии действително можеше да донесе осезаема екологична полза без сериозен риск за човека. Но днес ситуацията се е променила коренно. Масовото прилагане на АГВ в съвременните условия, напротив, ще доведе на първо място до увеличаване на концентрацията на МНП във въздуха. Сега, при вече високи нива на МНП в атмосферата, добавянето на допълнителни обеми чрез АГВ може да стане фатално за здравето на хората.

По този начин технологията, някога перспективна и иновативна, е загубила своята актуалност. Ние като човечество пропуснахме онзи критично важен момент, когато АГВ можеха да се превърнат в спасение. Времевият фактор във въпросите на климата и замърсяването на околната среда играе решаваща роля. Това, което можеше да съхрани здравето на милиони и действително да пречисти планетата преди две десетилетия, днес е станало потенциално опасно. АГВ вече не е технологията на бъдещето, а напомняне за пропусната възможност. В настоящите реалности приоритет трябва да бъдат разработки, които ще позволят извеждането на МНП от атмосферата и от човешкия организъм. На първо място трябва да спечелим време.

Иновативен научен подход за намаляване на токсичността на микро- и нанопластмасата

С оглед на представените данни за многостепенното и кумулативно въздействие на микропластмасата, и особено на нанопластмасата, върху здравето на човека, става очевидно: съвременната цивилизация се сблъсква с еколого-биомедицинско предизвикателство, което излиза извън рамките на традиционните представи за замърсяване на околната среда. Този проблем засяга не само отделни биосфери, но и устойчивостта на популацията *Homo sapiens* в дългосрочна перспектива.

На днешен ден практически цялата произведена пластмаса — над 9 милиарда тона — продължава да се натрупва в околната среда, като се подлага на фрагментация до микро- и наноразмери, притежаващи висока химическа и биологична активност. Микро- и нанопластмасата се открива в почвата, водата, въздуха и във всички основни категории хранителни продукти — от зеленчуци и плодове до месо, риба, мед, мляко и сол. Това сочи към тотално проникване на пластмасови частици в хранителните вериги, което съществено трансформира традиционната представа за „безопасна“ или „здравословна“ храна.

Пътят на постъпване на частиците в човешкия организъм в голяма степен определя тяхното биологично поведение и разпределение. Докато пластмасата, постъпваща чрез храносмилателния тракт, може частично да се изхвърли, инхалационният път се характеризира със значително по-висока степен на риск. Вдишаната нанопластмаса се утаява в белодробната тъкан, преминава хематогенните бариери и може директно да достига до главния мозък, където е способна да се натрупва с продължително действие. При това естествените механизми за детоксикация (черен дроб, бъбреци) не разполагат с ефективни средства за разпознаване и изхвърляне на такива частици.

Най-голяма плътност на микропластмаса се регистрира в близост до водоеми, крайбрежни зони и горски масиви — особено при условия на повишена влажност и температура.

В такива ландшафти пластмасата се задържа по-дълго, участва в аерозолното пренасяне, провокира оксидативен стрес при растенията и намалява ефективността на фотосинтетичните процеси. Почивката на брега, доскоро разглеждана като благоприятна от гледна точка на оздравяване, днес е съпроводена с допълнително инхалационно натоварване: според оценки обемът на вдишаната пластмаса в близост до открити водоеми може многократно да надвишава показателите на градската среда.

Епидемиологични изследвания показват устойчива връзка между нивото на замърсяване с МНП и разпространеността на хронични незаразни заболявания — включително артериална хипертония, захарен диабет, инсулт, депресивни и когнитивни разстройства. Вследствие на способността да преодолява биологичните бариери и да се натрупва в различни тъкани, включително в мозъка, сърцето, белите дробове и плацентата, МНП оказва токсично действие на молекулярно, клетъчно и органично ниво. Пластмасата, акумулирайки се в организма, оказва имunosупресивно, възпалително и генотоксично действие. Въпреки напредъка в разкриването на рисковете, ефективни механизми за неутрализация и извеждане на МНП от човешкия организъм до сегашния момент не са разработени.

Едно от най-критичните свойства на нанопластмасата, оказващо системно биологично въздействие, е нейната способност да задържа електростатичен заряд. За разлика от инертните частици, нанопластмасата активно взаимодейства с клетъчните повърхности, белтъци, рецептори и дори с генетичния материал, формирайки устойчиви връзки на молекулярно ниво. Това свойство не само засилва проникването на частиците нанопластмаса през биологични бариери, включително кръвно-мозъчната, но и затруднява последващото им извеждане, способствайки за продължително задържане в тъканите, особено в главния мозък. Електростатичното взаимодействие инициира каскада от клетъчни нарушения, включително деполяризация на мембраните, митохондриални дисфункции, оксидативен стрес и апоптоза, което значително повишава токсичността дори при минимални концентрации на частици нанопластмаса.

Авторите на дадения доклад изказват предположение, че решението на тази задача — неутрализация или екраниране на електростатичния заряд на микро- и нанопластмасата — може да се превърне във фундаментален пробив, способен значително да намали биологичната активност на нанопластмасата и да забави скоростта на нейното натрупване в критично важни органи. Според оценките на авторите на доклада, екранирането или неутрализацията на електростатичния заряд могат да намалят потенциалната опасност от МНП поне с 50 %, което прави това направление на изследванията критично важно. Това ще даде на научната общност времеви резерв, необходим за разработване

на по-комплексни подходи към диагностика, детоксикация и профилактика на последствията от МНП. В този аспект изследванията в областта на биофизиката, науката за наноматериали и молекулярната токсикология придобиват приоритетно значение. Забавянето в този случай е потенциално ускорение на деградационните процеси.

Паралелно с биомедицинските решения е необходима научно обоснована стратегия за безопасно боравене с пластмасови отпадъци. Съществуващата система за утилизация не е в състояние да предотврати по-нататъшната фрагментация и навлизането на микропластмаса в биосферата. В условията на глобализация е необходима разработка на международна технологична платформа за създаване, внедряване и мащабиране на безопасни методи за събиране и преработка на пластмаса. Такива мерки могат да бъдат реализирани единствено при наличие на институционална подкрепа, трансгранично регулиране и научна дипломация.

Особено значение придобива повишаването на информираността на научната общност, представителите на здравеопазването и широката общественост. На днешен ден повечето хора не осъзнават мащабите на въздействието на МНП и продължават неосъзнато да способстват за нейното разпространение.

По този начин проблемът с микро- и нанопластмасата вече не е потенциална заплаха, а се е трансформирал в фактор на системен риск. Това направление изисква приоритетно внимание от страна на научната общност и органите на здравеопазването, систематизация на данните, разработване на стандарти за оценка на рисковете, както и разширяване на междудържавното и международното сътрудничество. За изработване на ефективни решения, осигуряващи биологична безопасност в краткосрочна и дългосрочна перспектива, са необходими интердисциплинарен подход, институционално признание и международна консолидация на усилията.

ФАКТОР X. ВЪЗДЕЙСТВИЕ НА МИКРО- И НАНОПЛАСТМАСАТА ВЪРХУ ДИНАМИКАТА НА ЦИКЪЛА НА ПРИРОДНИТЕ КАТАКЛИЗМИ

Както вече беше споменато в главата „Въздействие на микро- и нанопластмасата върху климата“, частиците микро- и нанопластмаса намаляват топлопроводната функция на океанските води, което води до натрупване на топлина в океана и, като следствие, до критично повишаване на температурите на океана. Въпреки това самите микро- и нанопластмаси не са източник на нагряване на океана.

От пролетта на 2023 година и в продължение на повече от година средната температура на повърхността на Световния океан ежедневно поставя нови исторически максимуми, което се превръща в безпрецедентно явление в историята на наблюденията (фиг. 128). Учени по целия свят изразяват сериозна загриженост относно това аномално повишение.



Д-р Брайън Макнолди, старши научен сътрудник в Школата по океанология към Университета на Маями, отбелязва: **„Не става дума просто за рекордни температури на океана, които се наблюдават вече цяла година – важно е с колко много тези нови рекорди надвишават предишните. Съвременните показатели дори не се доближават до предишните рекордни стойности“**³²².



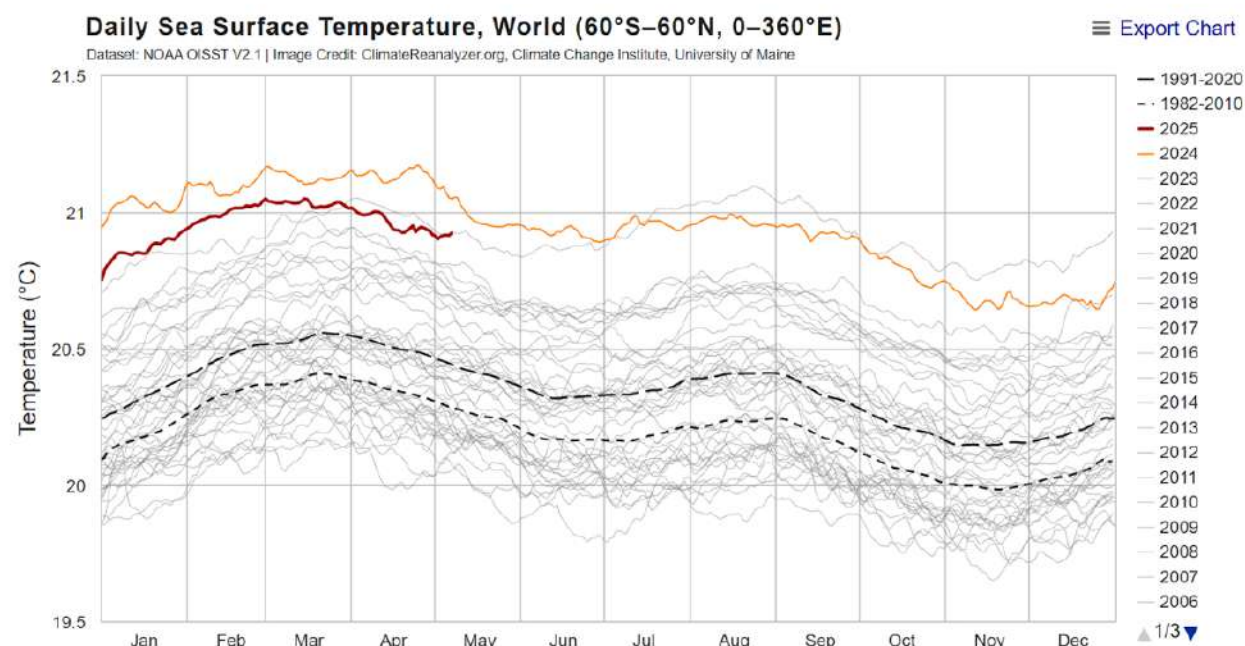
Тази загриженост споделя и доктор Роб Лартър, британски морски геофизик: **„Това наистина е тревожно, в това число и защото не чувам нито един учен, който да даде убедително обяснение защо се наблюдава толкова силно отклонение. Но сега се създава впечатление, че всичко се развива много по-силно и по-бързо, отколкото очаквахме“**³²³.

Според данните от климатичните изследвания, съвременните модели предвиждат постепенно повишаване на температурата на повърхността на океана, но наблюдаваната скорост на този процес значително надвишава всички прогнози. Учените смятат, че антропогенното изменение на климата играе определена роля, но то не може напълно да обясни наблюдавания 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>

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>. (Accessed May 1, 2025).

Професор Джон Абрахам от Университета „Св. Томас“, който изучава температурата на океана, изказа предположение за наличие на досега неизвестни фактори, които могат да влияят върху дългосрочните промени в температурата на повърхността на океана³²². Той отбеляза, че тези фактори не са били взети предвид в предишните прогнози. Авторите на дадения доклад изказват предположение за съществуването на някакъв „фактор Х“, който може да бъде отговорен за допълнителното затопляне на океана и атмосферата.



Фигура 128. Средна дневна температура на повърхността на океана, 1981–2025 година.

Източник на данни: Dataset NOAA OISST V2.1 | Източник на изображение: [ClimateReanalyzer.org](https://climateanalyzer.org), Climate Change Institute, University of Maine, Dataset NOAA OISST.
https://climateanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2

³²²NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024). <https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179>

Може ли микро- и нанопластмасата в океана да бъде неизследваният фактор Х?

Анализът на възможността именно микро- и нанопластмасата да са основната причина за текущото затопляне на океаните разкрива сериозно противоречие. Нанопластмасата действително влошава способността на океана да отвежда топлина. Въпреки това, тя не генерира топлинна енергия — тя само възпрепятства нейното освобождаване от океана.

През последните 60 години средните океански дълбочини са се затопляли 15 пъти по-бързо, отколкото през предходните 10 000 години^{324, 325}, и този процес продължава да се ускорява. Това нарастване прогресира с всяка изминала година все по-бързо. За повишаване на температурата на такава дълбочина, където слънчевата светлина вече не прониква^{326, 327}.

От своя страна, мащабното постъпление на микро- и нанопластмаса в океана е започнало сравнително наскоро — преди около 30 години, докато ускореното затопляне на океанските дълбочини се наблюдава вече през последните 60 години. Следователно пластмасата не може да обясни дългосрочната и нарастваща тенденция на затопляне на средните дълбочини в океана, започнала много преди значителното навлизане на тези замърсители в океанската среда.

Също така, това затопляне не може да бъде обяснено със слънчевата радиация, тъй като слънчевите лъчи проникват само до дълбочина около 200 м. Водата може да се затопли от Слънцето максимум до 700 м в резултат на смесване³²⁸.

За затоплянето на дълбоките слоеве, в които слънчевите лъчи не проникват, е необходимо колосално количество енергия. Това означава, че натрупаната в океана топлина трябва да идва от друг източник, а присъствието на нанопластмаса води до това, че тази топлина бива „заклучена“ вътре в океана.

С оглед на факта, че затоплянето от Слънцето не обяснява причините за експоненциалния растеж на океанските температури, беше изказано предположение за наличие на допълнителни източници на нагриване на океана в различни негови части.

Вертикално разпределение на температурните аномалии

Анализът на данни от системата Argo за глобалните температурни колебания на различни дълбочини през последните две десетилетия разкри редица температурни аномалии, които

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> (Accessed May 10, 2025).

³²⁶NOAA Ocean Service. 'How far does light travel in the ocean?'. (n.d.) https://oceanservice.noaa.gov/facts/light_travel.html (Accessed May 10, 2025).

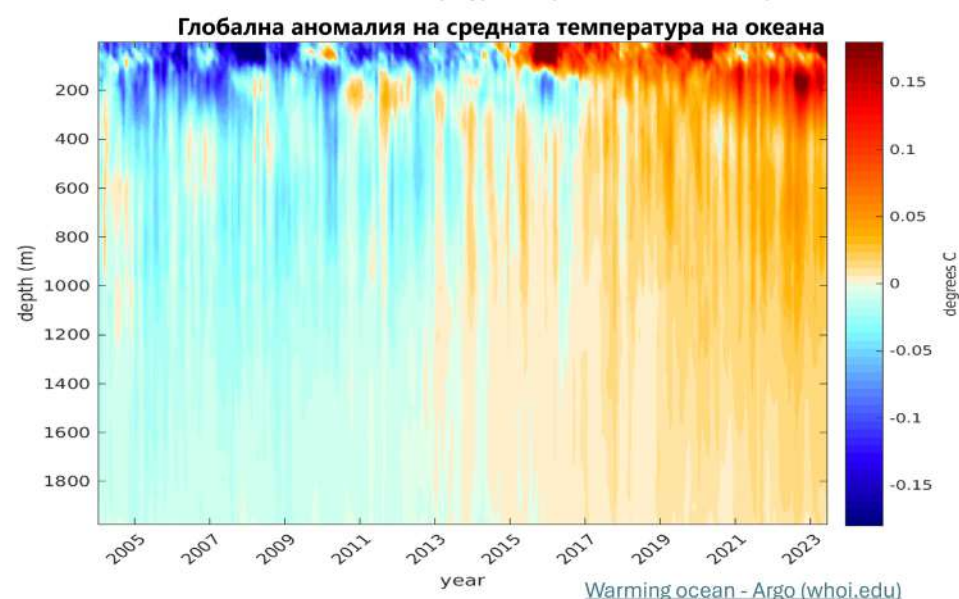
³²⁷NOAA Ocean Exploration. 'Marine Life'. (n.d.) <https://oceanexplorer.noaa.gov/explainers/marine-life.html> (Accessed May 10, 2025).

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> (Accessed May 10, 2025).

не съответстват на традиционния модел на низходящ топлообмен от повърхността към дълбоките слоеве на океана^{329, 330}.

Бяха регистрирани статистически значими случаи на инверсия на температурния градиент, при които по-топли водни маси се намират под относително студени повърхностни слоеве (фиг. 129). Подобна температурна стратификация е физически невъзможна при изключително низходящ топлообмен от повърхността, тъй като топлинната енергия, съгласно законите на физиката, не е способна да преодолее междинен студен слой отгоре надолу.

Данните на ARGO показват колебанията в температурата на различни дълбочини през последните 20 години.



Фигура 129. Глобални температурни аномалии в океана на дълбочина 0–1900 м от 2004 година насам.
Източник: Argo <https://www2.who.edu/site/argo/impacts/warming-ocean/>

Нови изследвания на учени от Китайския океанологичен университет³³¹ потвърждават заключенията относно наличието на топлинни аномалии в дълбоките слоеве на водата, които не се проявяват на повърхността на океана. Изследванията доказват, че една трета от морските топлинни вълни изобщо не се наблюдават на повърхността на океана, а около половината се проявяват само в определени етапи от жизнения си цикъл.

Годишният брой на тези подповърхностни морски топлинни вълни значително се увеличава в резултат на затоплянето на океана през последните три десетилетия. Фактът, че значителна част от топлинните вълни изобщо не се наблюдава на повърхността на океана, еднозначно показва, че те не могат да бъдат причинени от атмосферното затопляне.

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>.

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>

Изследване на източниците на затопляне на дъното на океана

Изследванията и редовният мониторинг на температурата на океанското дъно на днешен ден са изключително редки и ограничени. В продължение на дълго време науката не си е поставяла за цел да проследява промените именно на тези дълбочини. Съвременните системи за наблюдение, такива като мрежата от буйове ARGO, позволяват събирането на данни само от около 0,03 % от площта на океана, при това повечето буйове се потапят едва до половината от средната океанска дълбочина, без да достигат самото дъно³³².

Реално човечеството е изследвало само около 3–3,5 % от повърхността на океанското дъно³³³. Това се дължи на редица сериозни причини. Първо, по-голямата част от Световния океан се намира на дълбочини от 3 000 до 6 000 метра. Създаването на дълбоководни апарати, способни да издържат на колосалното налягане на дълбочини до 6 000 метра, изисква огромни финансови и технологични ресурси. На второ място, самите експедиции са изключително сложни и скъпоструващи: в цялата история са построени само осем специализирани апарата за такива изследвания. Поради това днес сме изследвали космоса в някои аспекти по-дълбоко, отколкото най-отдалечените ъгълчета на Световния океан.

В същото време става все по-очевидно, че геоложките процеси на дъното на океана могат да играят съществена роля в изменението на климата и топлинния баланс на океаните. На дъното се намират милиони уникални геоложки обекти — вулкани, разломи и хидротермални извори, които притежават огромна енергия. Въпреки това, поради трудния им достъп и недостатъчния обхват на мониторинга, мащабът на тяхното потенциално въздействие все още до голяма степен остава загадка за науката.

Въпреки тези ограничения, изследвания на океанското дъно все пак се провеждат, и редица от тях сочат към затопляне на океанската вода на дъното.

Например, **в два дълбоки участъка на Аржентинския басейн**³³⁴, на дълбочина над 4 500 м, се наблюдават значителни тенденции на затопляне: $0,02\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ на десетилетие в периода 2009–2019 година. Това представлява огромно количество енергия, необходимо за нагряване на такъв обем студена вода на дъното.

Директно край бреговете на Западна Антарктида се наблюдава аномално затопляне на дълбоките води на море Уедъл³³⁵, докато горните 700 м от водния слой почти не се затоплят. В по-дълбоките региони обаче се отчита постоянно покачване на температурата. От едната страна море Уедъл е оградено от Западно Антарктическият разлом, а от другата — от подводния вулканичен хребет със Южните Сандвичеви острови.

³³²Argo Program. "Mission". (n.d.) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (Accessed May 10, 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>.

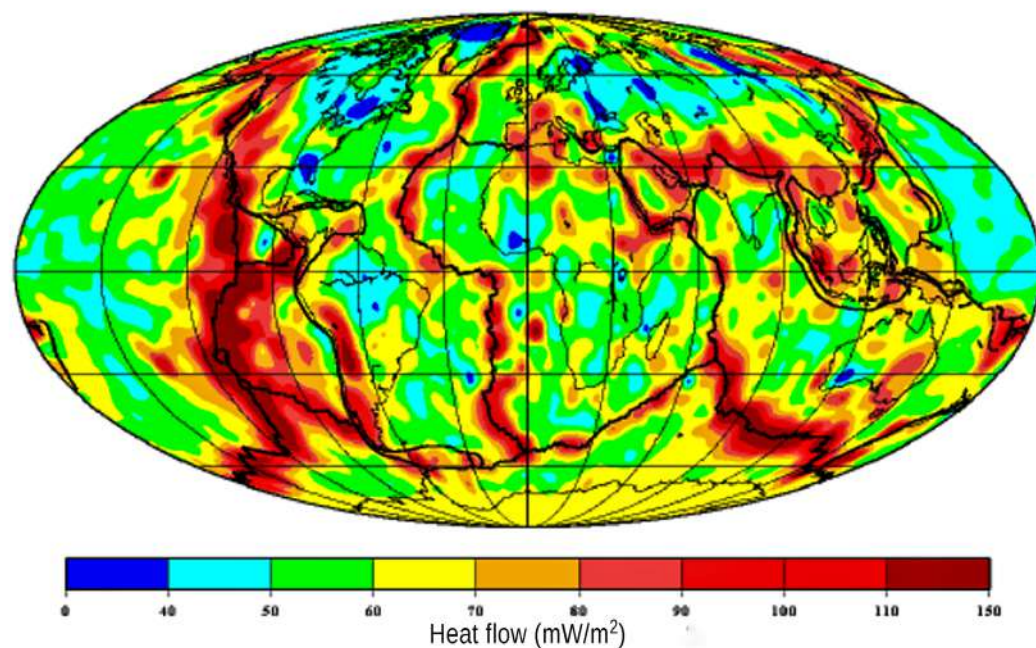
³³⁴Meinen, C. S., Perez, R. C., Dong, S., Piola, A. R. & Campos, E. Observed Ocean Bottom Temperature Variability at Four Sites in the Northwestern Argentine Basin: Evidence of Decadal Deep/Abyssal Warming Amidst Hourly to Interannual Variability During 2009–2019. Geophysical Research Letters 47, e2020GL089093 (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>

Роля на геотермалния топлинен поток, тектонските процеси и вулканичните изригвания на дъното на океана

В контекста на наблюдаваните аномалии на затопляне в дълбоководните слоеве, където влиянието на атмосферата е минимално, логично е да се разглежда геотермалният поток от недрата на Земята като потенциален източник на допълнителна топлина. Традиционно в климатичните модели геотермалният поток, постъпващ отдолу, се приема за постоянен и равен на приблизително $0,09 \text{ W/m}^2$ (или 90 mW/m^2)³³⁶, което е с няколко порядъка по-малко от слънчевия поток^{337,338}.

Въпреки това, нарастващ обем научни данни сочи към значимостта на този подценен източник на топлина. Мащабни геотермални изследвания показаха, че енергията на топлинния поток, излизаща през океанското дъно, зависи от възрастта на океанската кора: тя е максимална в младите зони на спрединг и минимална в старите океански басейни³³⁹ (фиг. 130). Подобни локални аномалии могат да оказват влияние върху вертикалната структура на температурата на водата, да отслабват термоклина и да спомагат за смесване на водните маси, което от своя страна влияе върху циркулацията, продуктивността и дори върху устойчивостта на ледниците в приполярните области.



Фигура 130. Глобално представяне на топлинния поток.

Илюстрация от статията: 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>

³³⁸World Energy Council. World Energy Resources: Solar 2013. (2013) <https://www.worldenergy.org/publications> (Accessed May 10, 2025).

³³⁹Khutorskoy, M. D., & Polyak, B. G. (2014). Reflection of contrasting geodynamic settings in the thermal field. Georesources, (2), 24–43.

Геотермалният топлинен поток — това е количеството топлинна енергия, което постъпва от недрата на Земята през единица площ от повърхността за единица време, измервано в миливати на квадратен метър (mW/m^2).

Докато средната енергия на геотермалния поток за континентите е $40\text{--}60 \text{ mW/m}^2$, а за океанското дъно — приблизително 100 mW/m^2 , в някои региони се регистрират стойности, многократно превишаващи тези показатели. Най-екстремните стойности на геотермалния топлинен поток се откриват в тектонично и вулканично активни зони: например, в зоните на средно-океанските хребети и активните рифтови области, където потокът може да надхвърли $200\text{--}1\,000 \text{ mW/m}^2$ ³⁴⁰.

Особено висок топлинен поток се наблюдава в зоните на хидротермални полета — това са области, където горещи флуиди излизат на океанското дъно, като температурата на водата достига $350\text{--}400^\circ\text{C}$. Тези системи формират уникални екосистеми и създават локални аномалии на топлинния поток, които съществено влияят върху температурния режим на придънните води.

Основната добре изследвана зона с повишен геотермален топлинен поток на океанското дъно са средно-океанските хребети — това са зони на раздалечаване на литосферните плочи, където активно се формира нова океанска кора. Тази глобална система от подводни хребети има обща дължина около $60\,000 \text{ km}$ ³⁴¹, обхващайки цялото земно кълбо като шевове на бейзболна топка. Средно-океанските хребети се характеризират с висока концентрация на хидротермални извори, подводни вулкани и активни разломи, през които в океана постъпва значително количество топлинна енергия от мантията на Земята³⁴².

Топлинният поток в тези зони е $10\text{--}100$ пъти по-висок от средните стойности за останалата част на океанското дъно³²⁶, което ги прави ключови участъци в топлообмена между вътрешните слоеве на Земята и Световния океан.

Професор Артър Витерито от Университета на Мериленд установява нарастване на броя на земетресенията по дъното на океана в зоните на средно-океанските хребети от 1995 година насам (фигура 131)³⁴³. С корелационен коефициент $0,7$, това увеличение съвпада с нарастването на глобалните температури. Наблюдава се също, че повишението на температурата следва с изоставане от около две години след повишената сеизмична активност. Увеличаването на земетресенията в тези области е свързано с повишена магмена активност, при която се формира нова океанска кора.

³⁴⁰Polyak, 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>

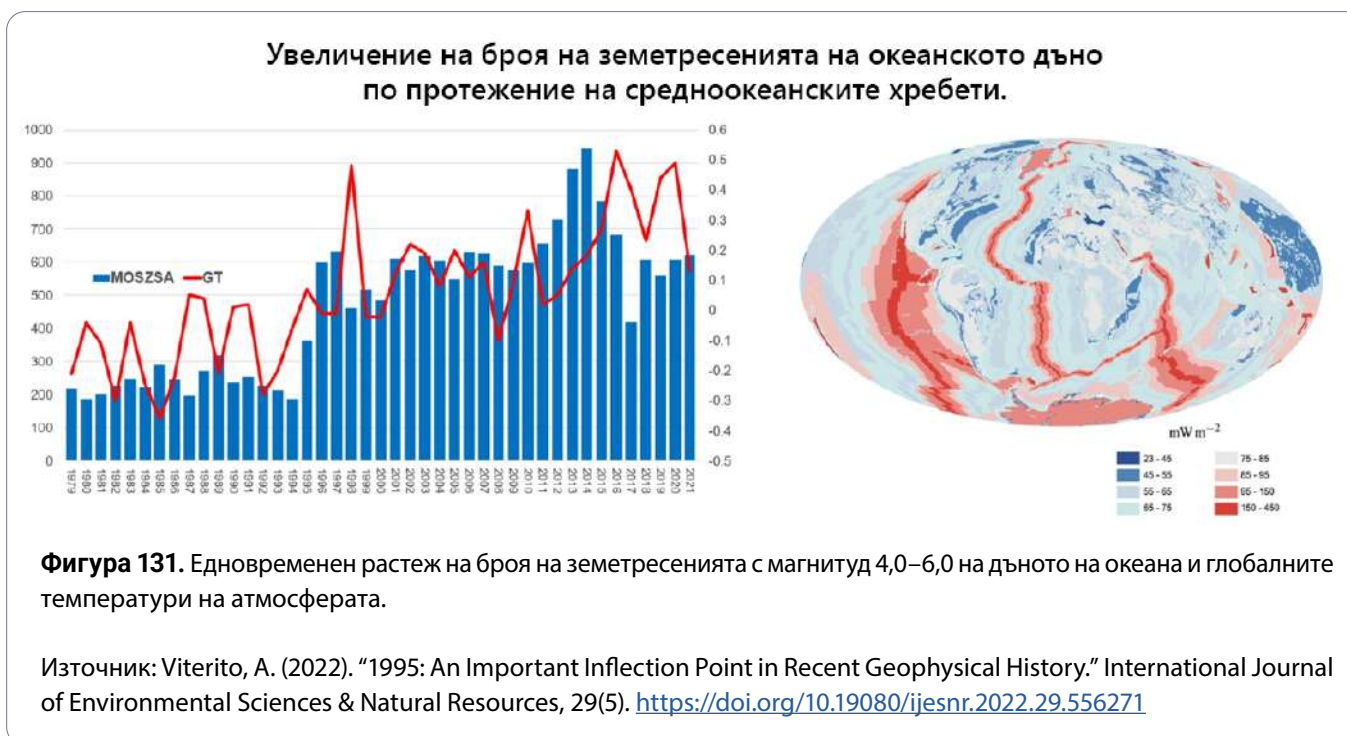
³⁴¹LaFemina, P. C. Plate Tectonics and Volcanism. in The Encyclopedia of Volcanoes (ed. Sigurdsson, H.) 65–92 (Academic Press, 2015).

<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).

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>



Въпреки че директни измервания на обемите издигаща се магма отсъстват, глобалната мрежа за сеизмичен мониторинг позволява да се съди за мащабите на тези процеси косвено — по броя и интензивността на сеизмичните събития, които се увеличават независимо от количеството сеизмични данни. Според хипотезата на Витерито, сеизмичната и вулканична активност по протежение на средноокеанските хребети води до увеличаване на темповете на хидротермални изхвърляния и загряване на водите, което от своя страна води до изпускане на парникови газове и затопляне на атмосферата. По този начин Витерито показва: океаните се затоплят не само отгоре, но и отдолу — поради геоложки процеси.

Подводният вулканизъм също може да играе важна роля в формирането на топлинния режим на океанското дъно. Съвременни данни свидетелстват, че около 75% от всички вулканични изригвания на Земята се случват под вода³⁴⁴. По-рано се смяташе, че подводните изригвания протичат със спокойно изливане на лава и експлозивни изригвания са невъзможни поради налягането на водния стълб. И затова се предполагаше, че подводните вулкани не могат да загряват водния стълб — изтичащата лава почти веднага се втвърдява. Но скорошни изследвания промениха разбирането за механизма на изригванията на подводните вулкани.

Налягането на магмата е 10 000–30 000 бара, а налягането на водния стълб в най-дълбоките части на океана е само 1 000 бара.

При пробив на магмата настъпва мигновено кипване на водата с разпад на молекулите H_2O , формирайки газово-водна кухня с налягане от стотици или хиляди бара³⁴⁵, което води до мощни експлозивни изригвания.

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>

Такива изригвания са съпроводени с изхвърляне на тефра и хидротерми — гигантски струи прегрята вода, чийто обем може да достигне еквивалента на 40 милиона олимпийски басейна. Такива изхвърляния могат да нарушават топлинното равновесие на океана не само локално, но и на глобално ниво.

Изследвания на Лидския университет разкриха километрови полета от вулканична тефра на дъното на Тихия океан³⁴⁶, което потвърждава мощни експлозивни подводни изригвания. Едно такова изригване може да отделя топлинна мощност от порядъка на 1 ТВт, което е два пъти повече от годишното енергопотребление на САЩ.



Приносът на експлозивните изригвания към затоплянето на океана се потвърждава от професор Бернд Зимановски от Университета Юлиус Максимилиан в Бавария³⁴⁷:

*„При подводни изригвания на лава топлината от лавата към водата се предава доста бавно. Обаче при експлозивни изригвания магмата се разпада на миниатюрни частици. Това може да създава толкова силни топлинни импулси, че топлинните равновесни течения в океаните се нарушават локално или дори глобално.“*³⁴⁸

Според съвременните оценки, количеството хидротермално активни подводни образувания възлиза от 100 хиляди до 10 милиона^{349,350}, което показва, че вероятно приносът на хидротермалната активност към топлинния баланс на океана е подценен. Експлозивните изригвания на магма водят до формирането на мощни топлинни импулси, способни да нарушават топлинните течения в океаните локално. Въпреки това, като се имат предвид размерите на океана, дори такива силни подводни изригвания не са достатъчни, за да го загряят. Вулканите не са разположени навсякъде, а техните изригвания са епизодични и тяхната енергия не е достатъчна за затопляне на целия океан. Все пак тя може да бъде достатъчна, за да предизвика локални вълни на топлина в океана.

Частен пример за такива локални топлинни аномалии са морските вълни на топлина, тоест локално продължително затоплена вода в океана. Друго тяхно наименование е блобове. Това са гигантски области от повърхностна вода с аномално високи температури. От 1995 година броят на блобовете значително се е увеличил³⁵¹, и те започнаха по-често да се появяват в различни части на Световния океан, включително край бреговете на Нова Зеландия, Югозападна Африка и в южната част на Индийския океан.

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> (accessed 1 May 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>

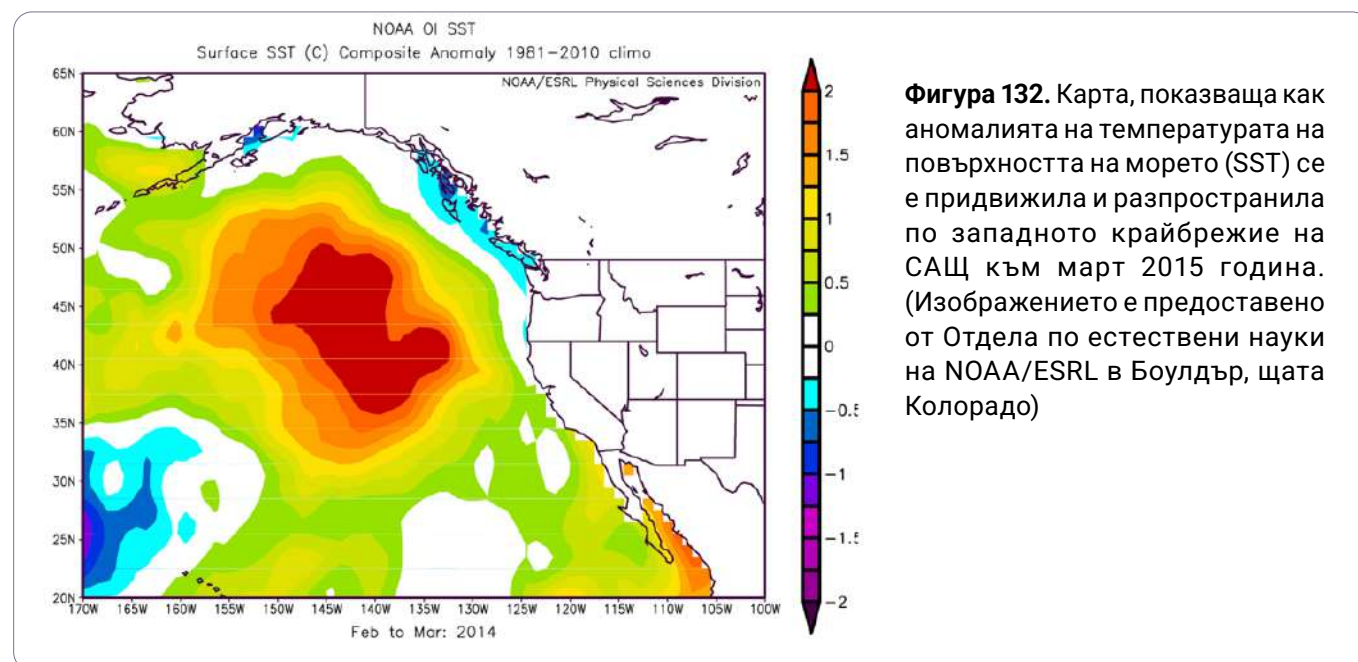
³⁵⁰Science News Explores. Seafloor hosts surprising number of deep-sea vents. (2016)

<https://www.snews.explores.org/article/seafloor-hosts-surprising-number-deep-sea-vents> (Accessed May 10, 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>

Един от най-известните и мащабни блобове се формира в залива Аляска през 2013 година и бързо се разпространи в Тихия океан. Площта му възлизаше на над 4 млн км² (което надвишава площта на Индия), а температурата на водата на някои места превиши средната с 5–6 °C (фиг. 132). Блобът се придвижваше по океана от Аляска до Мексико в продължение на три години – до 2016 година. Това явление оказва негативно влияние върху морската екосистема и климата в региона.

Причината за възникването на блоба най-вероятно е активният вулканизъм край бреговете на Аляска и магменият плум Коб³⁵², които затоплиха водата на дъното на океана, и тя изплува на повърхността в такъв огромен обем.

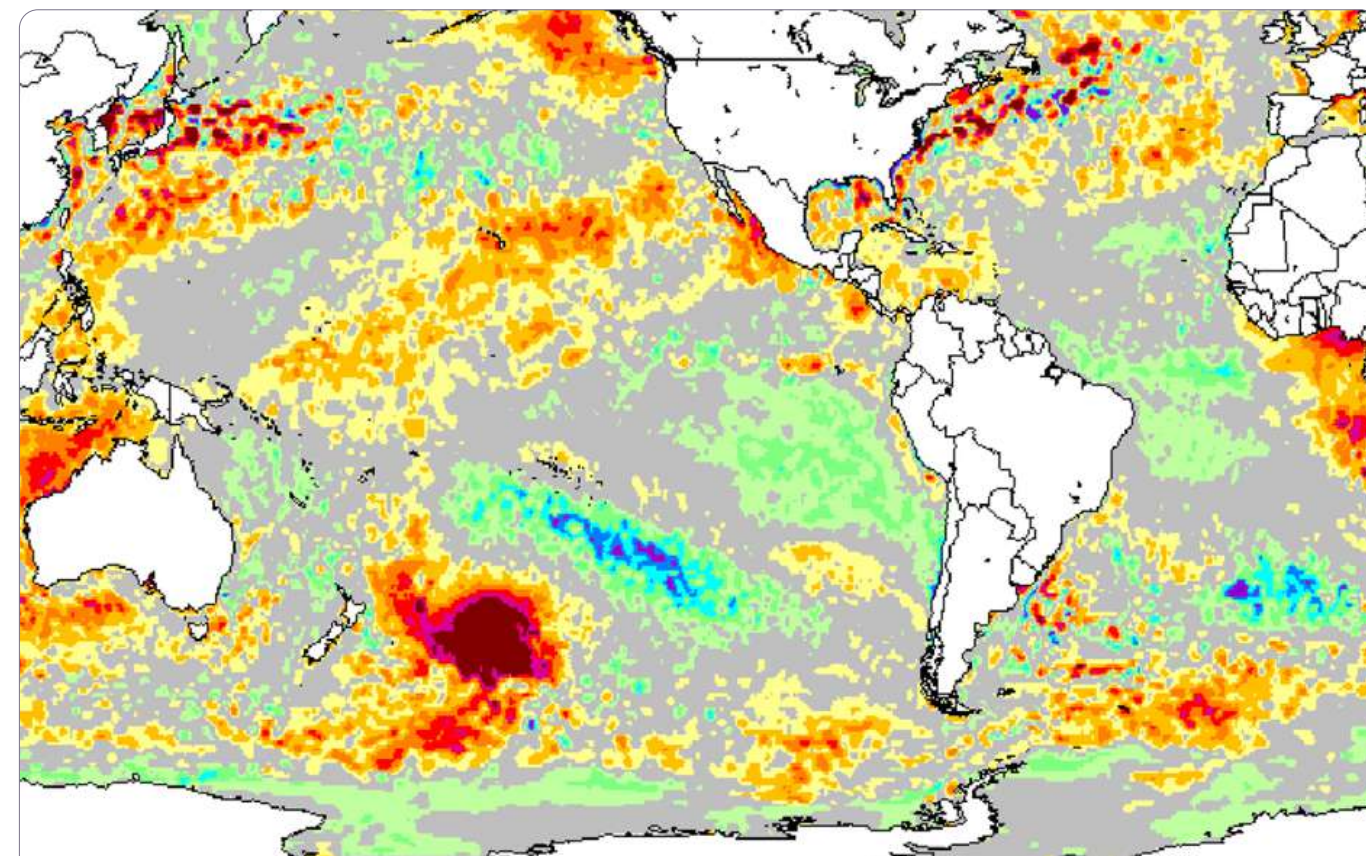


Фигура 132. Карта, показваща как аномалията на температурата на повърхността на морето (SST) се е придвижила и разпространила по западното крайбрежие на САЩ към март 2015 година. (Изображението е предоставено от Отдела по естествени науки на NOAA/ESRL в Боулдър, щата Колорадо)

Източно от Нова Зеландия, в южната част на Тихия океан, през декември 2019 година се появи блоб, чиято температура в определени дни беше с 6 °C по-висока в сравнение със средните стойности. Блобът имаше площ над 1 000 000 км², което е еквивалентно на 1,5 пъти площта на Тексас или 4 пъти площта на Нова Зеландия (фиг. 133). Както се съобщаваше, по онова време това беше най-големият блоб в Световния океан. Освен това тази капка стана второто по големина събитие за цялата история на наблюденията в този регион.

66

Джеймс Ренуик, професор в катедрата по география, екология и науки за Земята в Университета Виктория в Уелингтън, отбеляза, че **„това е най-голямата зона на аномално затопляне на планетата. Обикновено температурата на водата там е около 15 °C, а сега – около 20 °C“**.³⁵³



Фигура 133. Аномалия на температурата на повърхността на морето в южната част на Тихия океан на 25 декември 2019 година.

Източник: 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 на достъп: 11.05.2025)

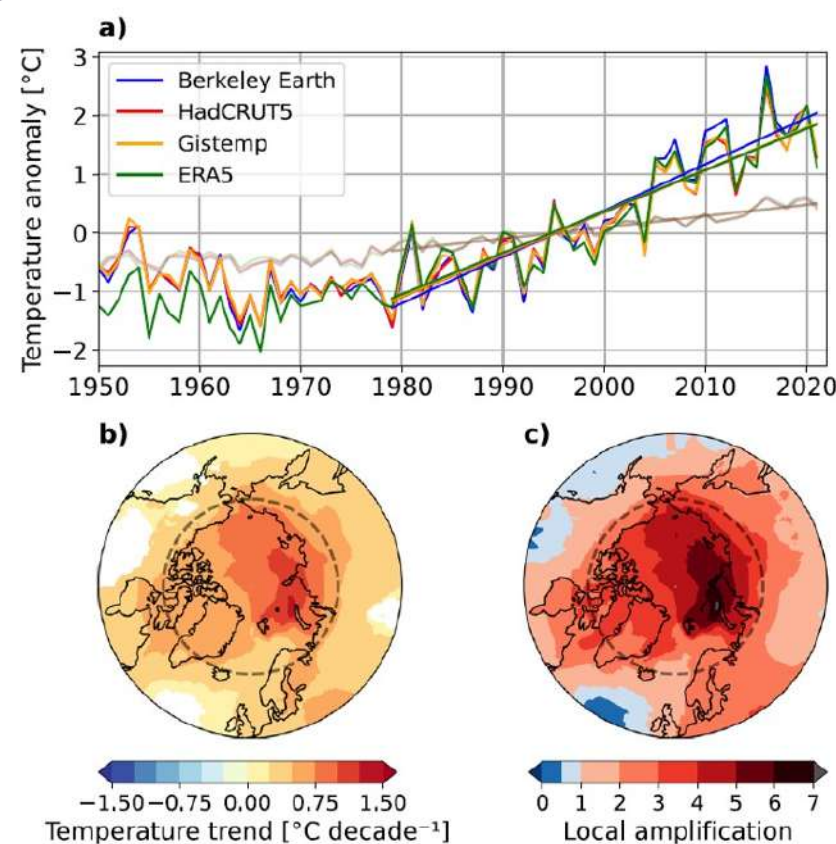
Вероятната причина за формирането на този блоб е активността на древното вулканично плато край бреговете на Нова Зеландия³⁵⁴.

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>

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> (Accessed May 10, 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>

Още един частен пример за влиянието на геотермалната топлина върху повишаването на температурата на океанските води за сметка на магматични процеси са аномалиите на затопляне в арктическите морета по крайбрежието на Сибир. Съгласно изследвания от 2022 година, Сибирската Арктика се затопля почти четири пъти по-бързо от земното кълбо, което е по-високо съотношение, отколкото по-рано се отчиташе в климатичните модели, и се оказа крайно неочаквано за учените³⁵⁵ (фиг. 134).

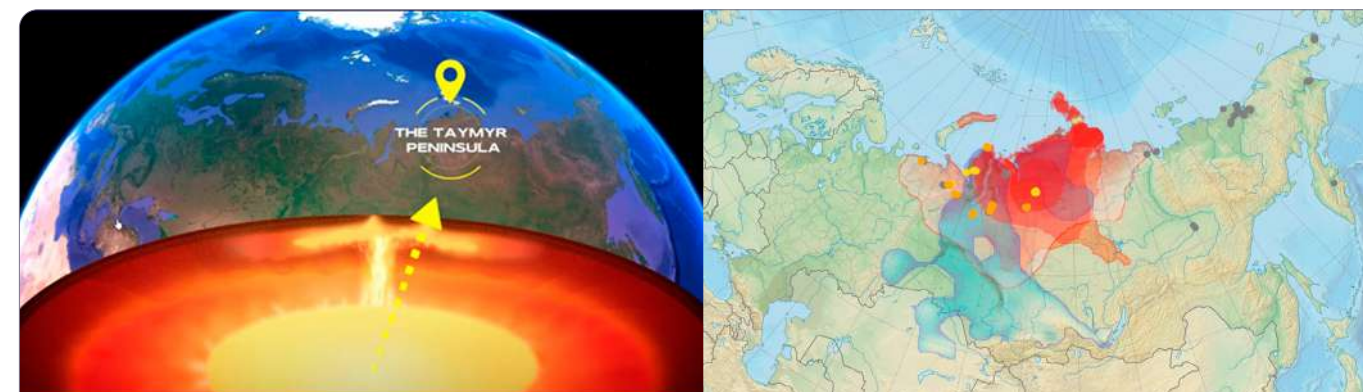


Фигура 134. Еволюция на средногодишната температура в Арктика. (а) Средногодишни температурни аномалии в Арктика 66.5°–90° с. ш. (тъмни цветове) и в глобален мащаб (светли цветове) за периода 1950–2021, получени от различни наблюдателни набори от данни. Температурните аномалии са изчислени спрямо стандартния 30-годишен период 1981–2010. Пунктираната линия на графиките (b) и (c) обозначава Северния полярен кръг (ширина 66,5° с. ш.).

Източник: 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>

Именно в този регион на света, в района на полуостров Таймир, се случва активизация на Сибирския магматичен пълум, който стремително се издига в момента в този регион, където преди 250 милиона години е станало изливането на Сибирските трапове. И всичко сочи, че главата на пълума в настоящия момент активно размива Източносибирския кратон и магмата се разлива под цялата му площ (фиг. 135). Съгласно предварителни оценки, областта на разливане на потоците магма под Сибир може да достига 2 500–3 000 км в диаметър, което е съпоставимо с площта на Австралия.

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>



Фигура 135. Локализация на местоположението на пълума според резултатите от различни изследвания

Важно е да се отбележи, че толкова интензивното затопляне на Арктическите морета се случва именно в района на полуостров Таймир. Такава аномалия именно в акваториалната зона на Сибир може да се обясни с това, че океанската кора е по-тънка и по-бързо провежда топлина, а водата притежава по-голяма топлемост, отколкото атмосферата. Затова именно океанската вода интензивно натрупва и задържа топлината от издигания се магматичен пълум, въпреки че неговото издигане се осъществява под континенталната кора на относително отдалечено разстояние от крайбрежието.



По-подробно може да се запознаете с информацията за Сибирския магматичен пълум и неговото влияние върху климатичната система, както и със заплахите, които носи тази геоложка структура, и възможните решения в доклада

**„ЗА ЗАПЛАХАТА ОТ ПРОРИВ НА
МАГМАТИЧНИЯ ПЛЮМ В СИБИР
И ПЪТИЩАТА ЗА РЕШАВАНЕ
НА ТОЗИ ПРОБЛЕМ“**

Съвкупността от всички тези данни свидетелства, че геоложките процеси на океанското дъно представляват съществен фактор за глобалното затопляне. Увеличаването на сеизмичната и вулканичната активност на дъното на океана корелира с ръста на глобалните температури, което сочи възможна причинно-следствена връзка. Подводните изригвания, особено с експлозивен характер, са способни да създават мощни топлинни импулси, нарушаващи локалния и дори глобалния топлинен баланс.

Хидротермалните системи и вулканичните процеси формират мащабни аномалии, като блобовете, които оказват забележимо въздействие върху океанските екосистеми и климата, а магматичните процеси предизвикват аномално затопляне на Арктическите морета. Така океанът се нагрива не само отгоре, под въздействието на атмосферата, но и отдолу — благодарение на динамичните процеси в земните недра. Това изисква преразглеждане на съществуващите климатични модели и по-задълбочено изучаване на подводната геоложка активност като важен компонент в общия топлинен баланс на планетата.

Обаче има един въпрос, който има ключово значение: защо в настоящия период от време се наблюдава увеличаване на магматичните и тектоничните процеси на Земята?

Кратко описание на геодинамичния модел на климатичните промени на Земята в настоящия период от време

През последните 30 години на Земята се наблюдава безпрецедентно и синхронно нарастване не само на климатичните промени, но и на аномалиите във всички слоеве на планетата и нейните геофизични параметри. Ръстът на тези промени протича експоненциално. Комплексният анализ на научни данни показва, че основната причина за това са астрономически цикли, които се повтарят на всеки 12 000 години.

Хипотезата за влиянието на космически фактори се потвърждава от аналогични изменения, които едновременно със Земята започнаха да се случват и на други планети от Слънчевата система и техните спътници. Например, на Уран³⁵⁶, Юпитер³⁵⁷ и Венера³⁵⁸ се увеличава скоростта на ветровете и се разширяват зоните на ураганите. На Марс се наблюдава топене на полярните ледени шапки³⁵⁹, а вулканичната активност на Венера³⁶⁰ и Марс продължава да нараства³⁶¹. Освен това на Марс, мъртва планета, се засилват земетресенията³⁶², което показва поява на аномална активност в неговите недра.

Критичните изменения в системата на Земята започнаха да се проявяват от 1995 година, когато бяха регистрирани значителни геофизични аномалии, такива като рязко ускоряване на въртенето на Земята, изместване на нейната ос и начало на дрейфа на северния магнитен полюс (фиг. 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).

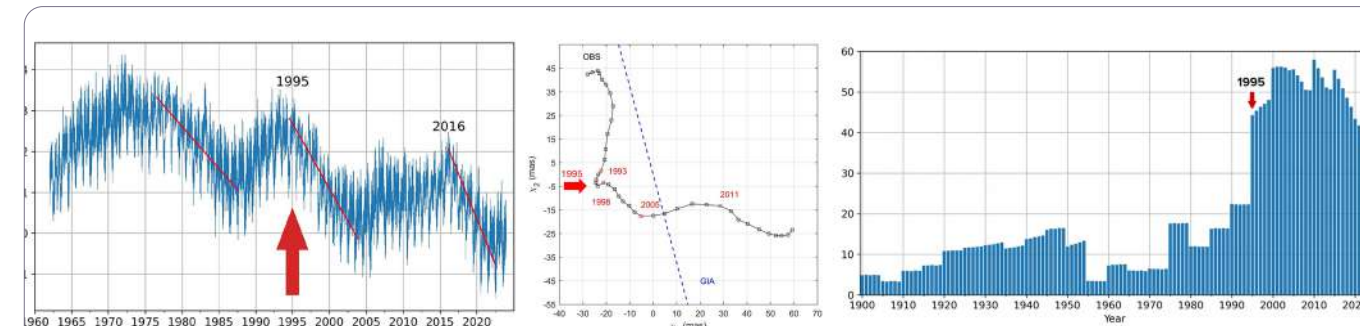
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833511>

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>



Внезапното и рязко ускоряване на въртенето на планетата, регистрирано от Центъра за ориентация на Земята към Парижката обсерватория.

Източник на данни: 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

Аномални изменения в оста на въртене на Земята: рязка промяна в посоката на нейния дрейф и увеличаване на скоростта на движение 17 пъти.

Източник: 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>

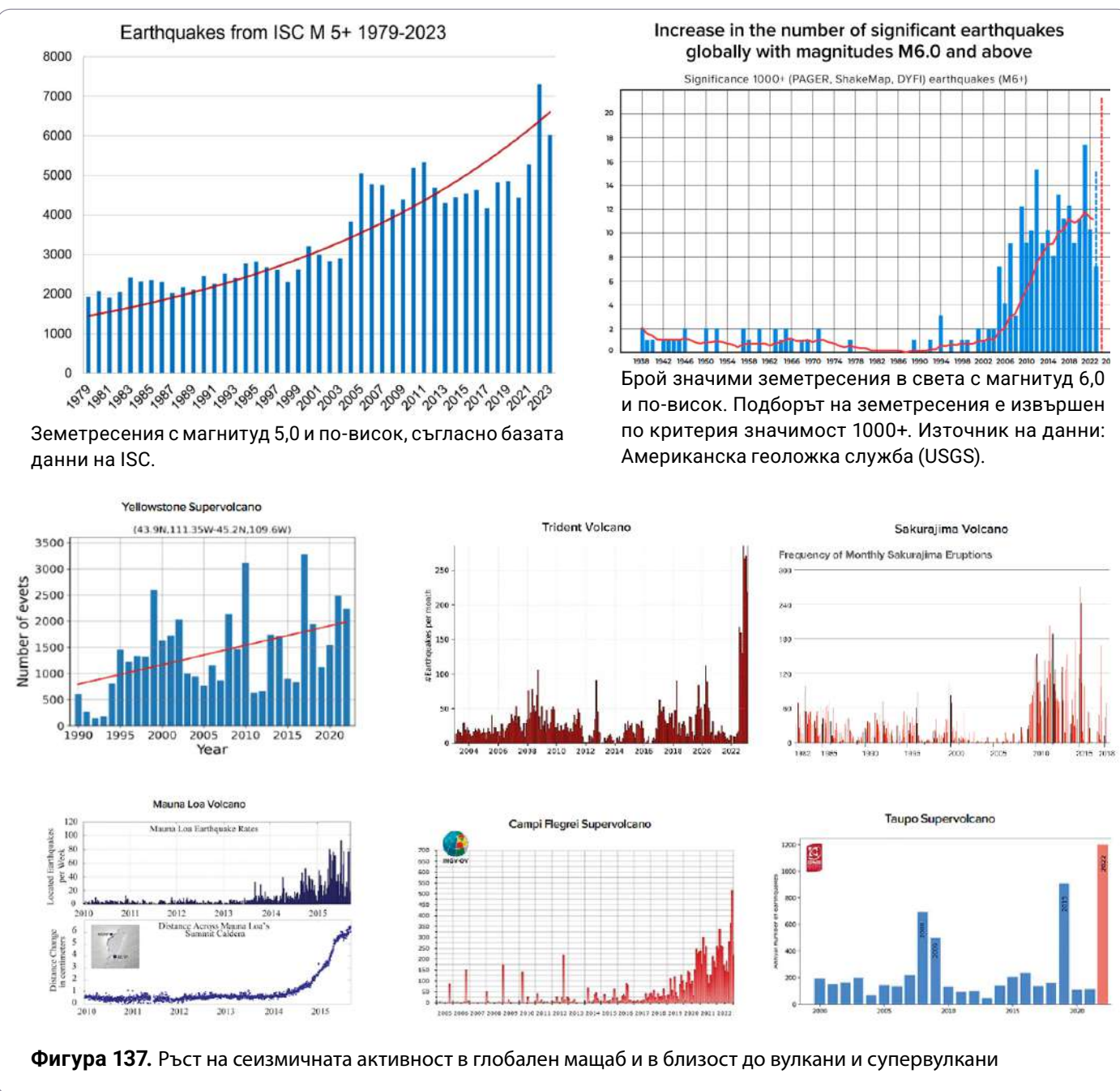
Движението на северния магнитен полюс, който по-рано се е измествал със скорост 10 км/година, внезапно се е ускорило до 55 км/година и е променило траекторията си в посока към полуостров Таймир в Сибир. Източник на данни: NOAA data on the position of the North Magnetic Pole <https://www.ncei.noaa.gov/products/wandering-geomagnetic-poles>

Фигура 136. Промени в геофизичните параметри на Земята през 1995 година

Тези аномалии сочат към дълбоки изменения в ядрото на Земята, които изискват квадрилиони пъти повече енергия, отколкото човечеството е произвело за цялото време на съществуването на цивилизацията. Причината е външно космическо въздействие, влияещо на земното ядро, както и на ядрата на други планети в Слънчевата система. Това външно въздействие засилва топенето на мантията, което води до нейното издигане по-близо до повърхността. В резултат се задейства верижна реакция: усилва се вулканичната и сеизмичната активност, увеличава се топлината, излъчвана от недрата, и се наблюдава ръст на природните катастрофи по целия свят.

От 1995 година се наблюдава забележим ръст на сеизмичната активност, характеризиращ се с увеличаване на честотата, силата и енергията на земетресенията. Тази тенденция е забележима както на сушата, така и в океаните, включително в региони, където по-рано практически не е регистрирана сеизмична активност. Всичко това сочи към глобален мащаб на измененията. Важно е да се отбележи, че увеличаването на броя на земетресенията с магнитуд 5,0 и по-висок не е свързано с разширяване на мрежата или чувствителността на датчиците, а действително отразява промени в геодинамиката на Земята. Според обобщени данни от Международния сеизмологичен център, броят на такива земетресения през последните 25 години съществено се е увеличил и продължава да нараства (фиг. 137).

Освен това расте сеизмичната активност в близост до вулкани, включително супервулкани като Йелоустоун в САЩ, Флегрейските полета в Италия³⁶³, и Таупо в Нова Зеландия³⁶⁴, както и други вулкани, чиито изригвания са се случвали в предишни 12-хилядолетни цикли (фиг. 137).



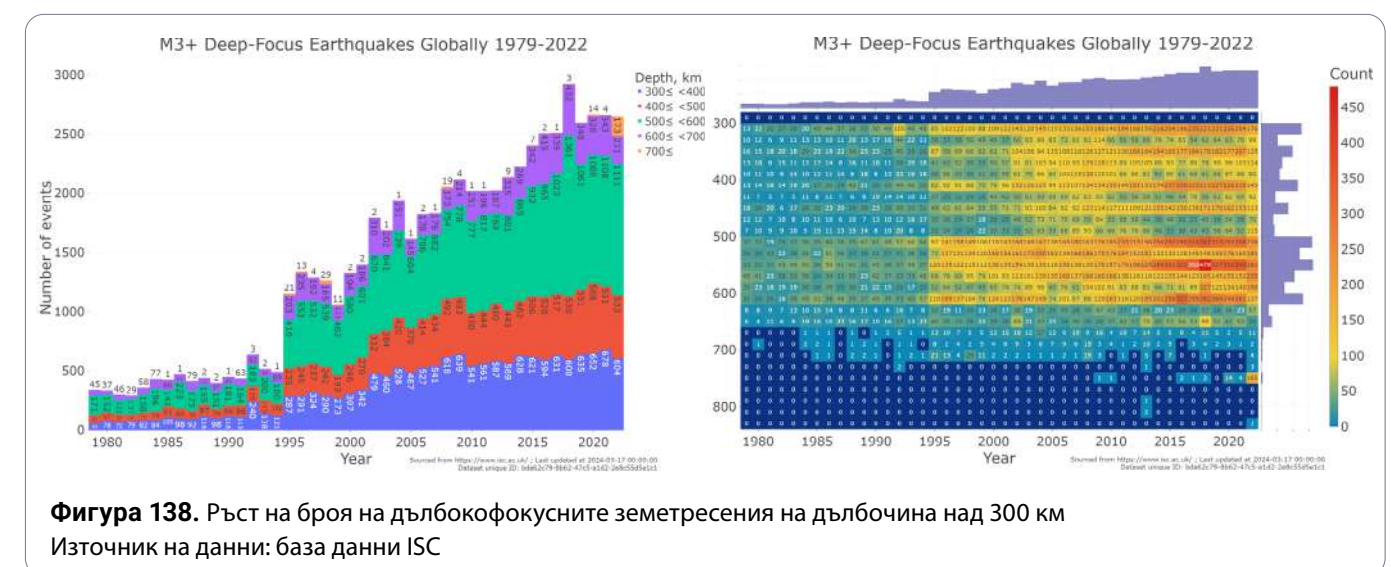
С всяка година се регистрират все повече дни с изригвания на вулкани, при това изхвърляната лава често притежава аномални свойства: тя е прегрята и има необичаен химичен състав, характерен за магма, която идва от дълбоки слоеве на мантията.

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> (Accessed May 1, 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/yabs/7tu66lDztDnlaYDG0LYSgl> (Accessed May 1, 2025).

Особено безпокойство предизвиква увеличаването на броя на дълбокофокусните земетресения, които се случват на дълбочина над 300 км, понякога достигащи до 750 км под повърхността на Земята. Тези явления не възникват в земната кора, а в мантията, където материалът не се разрушава, а се деформира, подобно на пластилин, което прави природата на тези земетресения необичайна. Тъй като тези земетресения възникват при екстремно налягане и високи температури, може да се направи извод, че тези мощни взривове в мантията са съизмерими по енергия с едновременно детониране на множество атомни бомби вътре в земната мантия.

Освен това дълбокофокусните земетресения често предизвикват мощни сеизмични трусове в земната кора, като засилват тяхното разрушително въздействие. От 1995 година насам се наблюдава стремителен ръст в броя на такива дълбочинни земетресения (фиг. 138), което съвпада с други геодинамични аномалии, започнали в същия период. Ръстът на количеството на тези вътрешномантийни взривове сочи към нарастването на енергията в дълбините на планетата и интензивното топене на мантията, което може да доведе до мащабни вулканични изригвания.



Под въздействие на центробежните сили от 1995 година разтопената магма в мантията започва активно да се издига към повърхността на Земята, размивайки и усилвайки нагряването на литосферата отвътре повече от обичайното. Това издигане на магмата води до увеличаване на геотермалния поток от недрата на планетата и активира магматични плюмове под ледниците на Западна Антарктида, Централна Гренландия и Сибир. В резултат на това ледниците и вечната замръзналост започват да се топят ускорено отдолу нагоре^{365, 366, 367}.

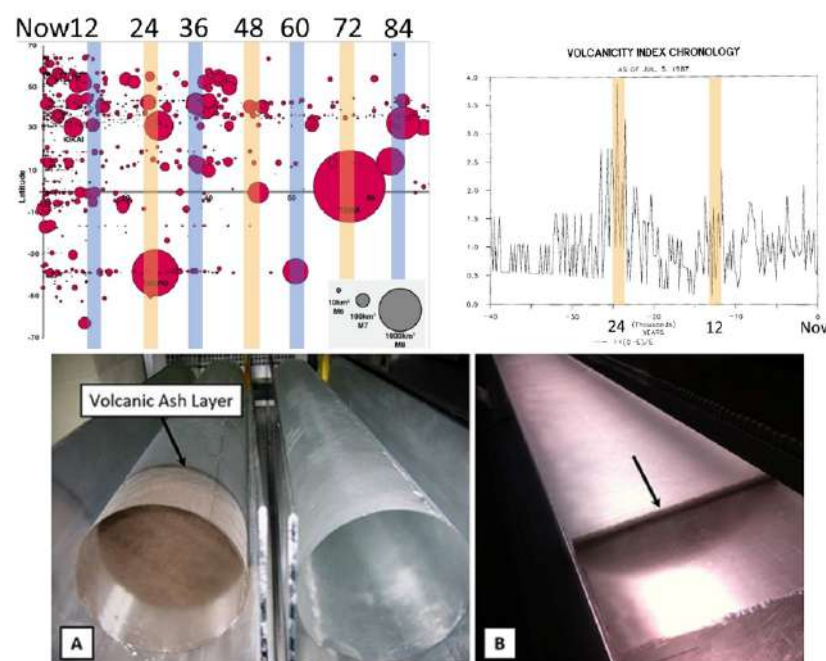
По този начин причините за затоплянето на океана се крият в издигащата се магма, която особено силно нагрява океанската кора, тъй като тя е по-тънка и по-уязвима в сравнение

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>

с континенталната. Историческите данни от геоложки и ледени сондажи свидетелстват, че Земята се е сблъсквала с подобни катастрофални цикли на всеки 12 000 години. Всеки втори цикъл, тоест на всеки 24 000 години, планетарните катастрофи имат по-разрушителен характер (фиг. 139).



Фигура 139. Графики, илюстриращи катастрофалната вулканична активност, която се случва на всеки 12 000 години, и още по-интензивни събития на всеки 24 000 години.

Източници: 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>

Именно в такъв цикъл навлиза в момента Земята. Обаче този път, поради антропогенното замърсяване на океана с микро- и нанопластмаса, се е засилил топлинният дисбаланс в мантията, което води до увеличаване на броя на дълбокофокусните земетресения, образуването на нови магматични огнища и общата нестабилност на планетата. Именно затова катаклизмите сега нарастват много по-бързо и по-силно, отколкото в предишните цикли. Фактически замърсяването на океана се е превърнало в основна причина Земята да не успее да се справи с този цикъл. Важно е да се разбере, че решаването на проблема със замърсяването на океана с микро- и нанопластмаса може да забави развитието на катаклизмите, но няма да ги спре.



По-подробна информация за геодинамичната активизация на недрата на Земята в настоящия период, цикъла на катаклизмите от 12 000 години и възможните решения на този проблем може да се намери в доклада

„ЗА ПРОГРЕСИЯТА НА КЛИМАТИЧНИТЕ КАТАКЛИЗМИ НА ЗЕМЯТА И ТЕХНИТЕ КАТАСТРОФАЛНИ ПОСЛЕДИЦИ“

Както показаха дългогодишни интердисциплинарни изследвания на геодинамичните промени в цикъла от 12 000 години, причината за първичното затопляне на океана е издигащата се магма, която оказва особено силно въздействие върху океанската кора, по-тънка и по-уязвима в сравнение с континенталната. Замърсяването на Световния океан с пластмаса и натрупването на частици микро- и нанопластмаса се превръща в критичен фактор, който променя топлофизичните свойства на океана. Присъствието на тези синтетични частици в океанската вода значително намалява нейната способност да провежда топлина, което нарушава естествените процеси на топлообмен между дълбоките слоеве на океана и повърхността, но което е още по-критично — нарушава отвеждането на топлина от литосферните плочи. В условията на увеличаваща се геодинамична активност по време на цикъла от 12 000 години критичната промяна в топлопроводящата функция на океанската вода увеличава не само затоплянето на океана и атмосферата, но и нагряването в недрата. Това води до увеличаване на топенето на мантията и, като следствие, до още по-силна геодинамична активност.

Това предизвиква натрупване на излишна енергия в недрата на Земята, водещо до увеличаване на броя на дълбокофокусните земетресения и ускорено формиране на нови магматични огнища. От своя страна, тези процеси още повече задълбочават нестабилността на планетата и ускоряват затоплянето на океана.

Формира се опасен затворен цикъл:

геодинамичната активност затопля океана → затоплянето ускорява разлагането на пластмасата → увеличената концентрация на микропластмаса намалява топлопроводимостта на водата → нарушава се отвеждането на топлина от недрата → засилва се геодинамичната активност и честотата на земетресенията → океанът се затопля още повече и това още повече ускорява процеса на разпад на пластмасата до микро- и наночастици.



Това води до нарастване на честотата и силата на екстремните метеорологични явления и природни катаклизми, такива като наводнения, урагани и тропически циклони, които днес достигат безпрецедентна интензивност.

По този начин замърсяването на океана с микро- и нанопластмаса не само нанася значителна вреда на човешкото здраве, екосистемите, биосферата и климатичната система, но също така допринася за усилване на затоплянето на океана. Освен това влошава и разрушителните катастрофи от 24 000-годишния цикъл, в който Земята в момента навлиза. Това създава безпрецедентни рискове не само за оцеляването на човечеството, но и за самата планета Земя.

Решаването на глобалната екологична, климатична и геодинамична криза изисква международно сътрудничество между учени от различни дисциплини за спешна разработка и прилагане на комплексни мерки. Тези решения трябва да включват не само пречистване на океана от микро- и нанопластмаса и намаляване на тяхното негативно въздействие върху човешкото здраве, но и разработване на фундаментални решения за отстраняване на геодинамичните заплахи. Можете да се запознаете с предложените решения в съответните доклади:



ДОКЛАД

**„ЗА ПРОГРЕСИЯТА НА
КЛИМАТИЧНИТЕ КАТАКЛИЗМИ
НА ЗЕМЯТА И ТЕХНИТЕ
КАТАСТРОФАЛНИ ПОСЛЕДИЦИ“**



ДОКЛАД

**„ЗА ЗАПЛАХАТА ОТ ПРОРИВ НА
МАГМАТИЧНИЯ ПЛЮМ В СИБИР
И ПЪТИЩАТА ЗА РЕШАВАНЕ
НА ТОЗИ ПРОБЛЕМ“**

ИЗВОДИ. НАНОПЛАСТМАСАТА — ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВО, КОЕТО НЕ МОЖЕ ДА БЪДЕ ПРЕНЕБРЕГНАТО

Проблемът с пластмасовото замърсяване, особено под формата на микро- и нанопластмаса, вече е излязъл извън рамките на локалните екологични последици и е придобил характер на многоаспектна глобална заплаха. Съвременните изследвания потвърждават както прякото, така и косвеното въздействие на микро- и нанопластмасата (МНП) върху климатичната система, устойчивостта на екосистемите и човешкото здраве. Частиците микропластмаса са способни да проникват в живи организми, да предизвикват възпалителни реакции, да нарушават хормоналния баланс, функциите на имунната и репродуктивната система, както и да изменят физико-химичните свойства на околната среда — от морската вода до атмосферата.

Още преди повече от 10 години представители на международната научна общност „АЛЛАТРА“ изказаха предположение за нарастващото влияние на пластмасовото замърсяване върху климатичните аномалии и задълбочаването на обществено-здравните проблеми. Днес тези хипотези намират потвърждение в независими изследвания, проведени от водещи научни институции. Бързото натрупване на данни относно екологичните и биологичните ефекти на МНП открива нови хоризонти за анализ, включително трансформацията на климатичните модели, измененията в хидросферата и нарастването на системните рискове за устойчивото развитие. Особено обезпокоителен е фактът, че дори микроскопични концентрации на нанопластмаса могат да задействат каскадни ефекти в биосферата и климата. Пластмасата вече не е просто твърд отпадък — тя се превръща в активен агент на трансформация на жизнената среда и човешкия организъм. Последствията от нейното разпространение вече се проявяват. Проблемът с МНП засяга не само екологията и медицината, но също така изисква осмисляне в контекста на националната сигурност, макроикономиката и международните отношения.

В рамките на стратегията за противодействие на тази заплаха, Движението „АЛЛАТРА“ предложи две ключови направления, притежаващи както приложен, така и прогностичен потенциал. Първото от тях е мащабното внедряване на технологии за атмосферна генерация на вода (АГВ), които са способни едновременно да решават проблема с дефицита на прясна вода и да допринасят за почистването на атмосферата и океаните от частиците микропластмаса. Въпреки това, реализацията на АГВ-технологиите изисква отчитане на възможните рискове — по-специално повишаването на концентрацията на МНП във въздуха и, като следствие, усилване на инхалаторното въздействие върху човека. Това налага необходимостта от паралелна разработка на високоефективни филтрационни и защитни системи.

Второто стратегическо направление, също предложено от „АЛЛАТРА“, е разработването на методи за неутрализиране или екраниране на електростатичния заряд на нанопластмасата — един от главните фактори на нейната токсичност. Заредените частици нанопластмаса активно взаимодействат с клетъчните мембрани, белтъците и генетичния материал, формирайки

устойчиви молекулярни връзки. Такива частици проникват през биологичните бариери, включително хематоенцефалната, натрупват се в тъканите и инициират каскада от клетъчни нарушения — от оксидативен стрес до апоптоза. Намалването на електростатичната активност на микро- и нанопластмасата може значително да намали нейната вредност и да забави натрупването ѝ в организма.

Според оценките на авторите на доклада, екранирането или неутрализирането на електростатичния заряд може да намали потенциалната опасност от МНП поне с 50 %, което прави това направление изключително важно. Това ще създаде необходимото времево пространство за разработване на по-комплексни стратегии за диагностика, профилактика и изчистване на МНП от човешкия организъм и биосферата. В този контекст особено значение имат изследванията в областите на биофизиката, нанотехнологиите и молекулярната токсикология.

Следователно ефективният отговор на заплахата от МНП изисква не точкови мерки, а глобален и междудисциплинарен подход. Необходимо е координиране на усилията в сферата на научните изследвания, технологичните решения, нормативното регулиране и международното сътрудничество. Пластмасовото замърсяване трябва да се разглежда не като тесен екологичен проблем, а като системно предизвикателство, което засяга здравето, сигурността, ресурсната обезпеченост и устойчивостта на социалната инфраструктура.

Уникалността на настоящия доклад се състои в комплексния междудисциплинарен подход, обединяващ данни от физиката, химията, биологията и медицината. Този синтез позволява да се разглежда проблемът с МНП като цивилизационно предизвикателство, което изисква решения на множество нива. В момента световната общност постепенно осъзнава истинските мащаби на тази заплаха. Въпреки липсата на универсално решение, именно стремежът към неговото търсене и развитието на научното сътрудничество могат да определят пътя към преодоляването на кризата. Главното предизвикателство не е в липсата на решение, а в способността то да бъде открито преди достигане на критичната точка.

Източници

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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 2025).

- Argo Program. 'Mission'. (n.d.) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (Accessed May 10, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 10, 2025).
- ClimateReanalyzer.org, Climate Change Institute, University of Maine, Dataset. NOAA OISST. https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2 (Accessed May 1, 2025).
- Columbia Climate School. 'Is Global Heating Hiding Out in the Oceans?'. (2013) <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Accessed May 10, 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/acsnano.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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 2025).
- Enders, K., Lenz, R., Stedmon, C. A. & Nielsen, T. G. Abundance, size and polymer composition of marine microplastics ≥ 10 µm 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> (Accessed May 1, 2025)
- European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024 <https://www.essl.org/cms/hailstorms-of-2024> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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 (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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 (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 2025).

IPCC. Global Warming of 1.5°C. (Cambridge University Press, 2022). <https://doi.org/10.1017/9781009157940> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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 (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 2025).

NASA. Tracking 30 Years of Sea Level Rise <https://earthobservatory.nasa.gov/images/150192/tracking-30-years-of-sea-level-rise> (Accessed May 1, 2025).

NASA. What are Phytoplankton? <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton> (Accessed May 1, 2025).

National Center for Biotechnology Information. Bisphenol A, 2D Structure. PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1017#section=2D-Structure> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 10, 2025).

NBC News. Oceans hit record-hot temperatures. (2024) <https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 2025).

NOAA Ocean Exploration. 'Marine Life'. (n.d.) <https://oceanexplorer.noaa.gov/explainers/marine-life.html> (Accessed May 10, 2025).

NOAA Ocean Service. 'How far does light travel in the ocean?'. (n.d.) https://oceanservice.noaa.gov/facts/light_travel.html (Accessed May 10, 2025).

NOAA. Data on the position of the North Magnetic Pole. <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/data/poles/NP.xy> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 2025).

NOAA. How much oxygen comes from the ocean? <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-oxygen.html> (Accessed May 1, 2025).

NOAA. Ocean heat content. www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 2025).

OECD (2023) Note: Regional summary data was calculated by Our World in Data based on OECD-provided data. [OurWorldinData.org/plastic-pollution](https://ourworldindata.org/plastic-pollution) | CC BY <https://ourworldindata.org/grapher/share-plastic-fate?time=2019..latest> (Accessed May 1, 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 (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Cancer deaths by type, World. <https://ourworldindata.org/grapher/cancer-deaths-by-type-grouped> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Deaths from diabetes by type 1980-2021. <https://ourworldindata.org/grapher/deaths-from-diabetes-by-type> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Microplastics in the ocean. <https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean> (Accessed May 1, 2025).

Our World in Data. Number of deaths from cardiovascular diseases by age, worldwide. <https://ourworldindata.org/grapher/cardiovascular-disease-deaths-by-age> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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](https://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> (Accessed May 10, 2025).

- Plastics News. Study highlights health hazards of microplastics. (2019) <https://www.plasticsnews.com/news/study-highlights-health-hazards-microplastics> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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., Volaro, 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> (Accessed May 1, 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.snxplores.org/article/seafloor-hosts-surprising-number-deep-sea-vents> (Accessed May 10, 2025).
- ScienceDirect. Food allergy. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/food-allergy> (Accessed May 1, 2025).
- ScienceDirect. Inflammatory bowel disease. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/inflammatory-bowel-disease> (Accessed May 1, 2025).
- ScienceDirect. Ingestion. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/ingestion> (Accessed May 1, 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/swhbj/467/503/content/post_550539.html (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 10, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 2025).

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1> (Accessed May 1, 2025).

The International Union for Conservation of Nature (IUCN). Ocean deoxygenation. <https://iucn.org/resources/issues-brief/ocean-deoxygenation> (Accessed May 1, 2025).

The Ocean Foundation. Ocean conservation. The Ocean Foundation. <https://oceanfdn.org> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 2025).

Thompson, R. C. et al. Twenty years of microplastic pollution research—what have we learned? Science 386, ead12746 (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> (Accessed May 1, 2025).

United Nations Development Programme. Ocean hypoxia: Dead zones. <https://www.undp.org/publications/issue-brief-ocean-hypoxia-dead-zones> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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 (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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-PLASTICSOUF.pdf> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 2025).
- World Energy Council. World Energy Resources: Solar 2013. (2013) <https://www.worldenergy.org/publications> (Accessed May 10, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 2025).
- World Health Organization. Mental disorders. WHO Fact Sheets. (2022) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders> (Accessed May 1, 2025).

- World Health Organization. Obesity and overweight. WHO Fact Sheets. (2025) <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight> (Accessed May 10, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 2025).
- World Meteorological Organization (WMO). State of the Global Climate 2024. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024> (Accessed May 1, 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> (Accessed May 1, 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.enccco.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>