

БАЯНДАМА

МИКРОПЛАСТИК  
ЖӘНЕ НАНОПЛАСТИК

# БИОСФЕРАДАҒЫ НАНОПЛАСТИК

МОЛЕКУЛАЛЫҚ ӘСЕРДЕН  
ПЛАНЕТАЛЫҚ ДАҒДАРЫСҚА ДЕЙІН



БАЯНДАМА

# БИОСФЕРАДАҒЫ НАНОПЛАСТИК

МОЛЕКУЛАЛЫҚ ӘСЕРДЕН  
ПЛАНЕТАЛЫҚ ДАҒДАРЫСҚА ДЕЙІН

## АВТОРЛАР



«АЛЛАТРА» халықаралық қоғамдық қозғалысы

## ИНСТИТУЦИОНАЛДЫҚ ШОЛУ Академиялық ынтымақтастық



UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
BOLIVIANA

Сан-Паблодағы Боливия католиктік университеті (UCB)  
Экологиялық инженерия және ғылыми зерттеу факультеті



**DICYT**  
Departamento de Investigación,  
Ciencia y Tecnología - UAJMS.

Хуан Мисаэль Сарачо атындағы Автономды Университет (UAJMS)  
Зерттеулер және ғылым, технологиялар департаменті

## ҒЫЛЫМИ ҚАТЫСУШЫ



**CREATIVE  
SOCIETY**

«Жасампаз қоғам» халықаралық жобасы

# МАЗМҰНЫ

Аннотация.....	5
<b>Пластикалық ластанудың салдары: микро- және нанопластик (МНП) планеталық дағдарыстың жаңа факторы ретінде.....</b>	<b>7</b>
Пластикалық қалдықтардың жаһандық өндірісіндегі сандық бағалаулар мен тенденциялар.....	7
Тынық мұхитының аса үлкен қоқыс континенті.....	12
Пластиктің микро- және нанобөлшектерінің түзілу процестері.....	12
МНП-тің қоршаған ортада таралуы.....	18
<b>Микро- және нанопластикпен ластанудың экологиялық және климаттық салдары.....</b>	<b>23</b>
МНП экожүйелерді молекулалық деңгейде қалай бұзады.....	23
<b>МНП-тің климатқа әсері.....</b>	<b>46</b>
<b>Микро- және нанопластиктің адам денсаулығына әсері.....</b>	<b>71</b>
МНП – ХХІ ғасырдағы эпидемиялардың дамуының жаңа қауіп факторы.....	71
МНП улы әсерінің молекулалық механизмдері.	
ДНҚ, митохондрия және жасуша мембраналарының зақымдануы.....	72
МНП-тің ерте қартаю және онкогенез механизмдеріне қатысуы.....	84
МНП әсерінен гормоналды жүйенің тұрақсыздануы.....	87
Адам ағзасына нанопластиктің жоғары уыттылығына әсер ететін негізгі фактор ретінде оның электростатикалық заряды.....	93
МНП-тің адам ағзалары мен функционалдық жүйелеріне жүйелі әсері.....	100
МНП-пен тыныс алу кезіндегі тыныс алу жүйесінің зақымдану механизмдері.....	101
МНП-тің нейротоксикалық әсері.	
Орталық және перифериялық жүйке жүйесінің зақымдануы.....	102
Жүрек-қантамыр ауруларының патогенезіне МНП-тің қатысуы.....	114
МНП туындатқан асқазан-ішек жолдарының бұзылуы.....	116
МНП-тің иммундық жүйеге әсері.....	117
МНП-тің онкогенді әсері. Мутациялар мен метастаздардың даму механизмдері.....	120
МНП-тің кальций алмасуына және сүйек құрылымына әсері.....	121
МНП әсеріне байланысты репродуктивті бұзылулар. Бедеулік және эректильді дисфункция.....	122
МНП-тің плацентарлық тосқауылдан өтуі және дамушы ағзаға әсері.....	126
Микро- және нанопластиктің әсерінің салдары мен туа біткен аномалиялармен байланысы.....	130
Қорытындылар мен перспективалар. МНП-тің адам денсаулығына әсерін азайту мүмкін бе?.....	133
<b>Пластикалық ластануды азайтудың заманауи тәсілдерін талдау.....</b>	<b>134</b>
Су экожүйелерінен үлкен пластикті жою технологиялары.....	134
Микро- және нанопластиктерді тазалаудың қазіргі әдістері.....	139
<b>«АЛЛАТРА» ғылыми қоғамдастығының микро- және нанопластик эпидемиясымен күресудегі тәсілдері.....</b>	<b>142</b>
Мұхитты МНП-тен тазартуға арналған атмосфералық су генераторларының (АСГ) технологиялары.....	142
Микро- және нанопластик улылығын төмендетуге арналған инновациялық ғылыми көзқарас.....	148
<b>Х фактор. Табиғи апат циклінің динамикасына микро- және нанопластиктің әсері.....</b>	<b>151</b>
<b>Қорытындылар. Нанопластик – елемеу мүмкін емес сын-қатер.....</b>	<b>171</b>
<b>Дереккөздер.....</b>	<b>173</b>

## АННОТАЦИЯ

«Егер Жер күнделік жүргізсе, ол соңғы ғасыр туралы қара сиямен: «Пластик дәуірі» деп жазар еді». Тірі организмдердің жасушаларына енетін микроскопиялық бөлшектерден бастап мұхиттағы алып қоқыс аралдарына дейін пластик геологиялық жазбаның ажырамас бөлігіне айналды. Бірақ қандай бағамен?

Жыл сайын әлемде 400 миллион тоннадан астам пластик қалдықтары шығарылады, оның 11 миллион тоннаға жуығы мұхиттарға түседі. Мұхиттарда қазірдің өзінде 200 миллион тоннадан астам пластик жиналды. Жер үсті суларының сынамаларын талдау пластик массасы зоопланктон массасынан б есе артық екенін анықтады. Болжам бойынша 2050 жылға қарай мұхиттағы пластик массасы балық массасынан асып түседі.

Пластик жүздеген, тіпті мыңдаған жылдар бойы ыдырайды, бірақ толқындардың, тұзды судың және ультракүлгін сәулелердің әсерінен ол ұсақ бөлшектерге - микро және нанопластиктерге ыдырайды. Олар теңіз ауасы мен шөгінділер арқылы мыңдаған километрге тасымалданады, елдерді, континенттер мен мұхиттарды кесіп өтіп, ормандарда жиналып, тамақ пен суда кездеседі. Микропластиктер тіпті Мариан шұңғымасы мен Эверест шыңы сияқты планетаның шалғай түкпірлеріне де жетті.

Бұл баяндамада пластикалық ластанулардың қоршаған ортаға, адам денсаулығына және қоғамның өмірлік маңызды жүйелерінің тұрақтылығына әсерінің терең аналитикалық бағасы берілген. Баяндамада статикалық заряды бар және құрамында улы химиялық қосылыстар бар микро- және нанопластиктің экожүйеге әсері зерттеледі. Олардың мұхиттың қышқылдануындағы, қоректік тізбектердің тұрақсыздануындағы және биоәртүрлілікке қауіп төнуіндегі рөліне ерекше назар аударылады. Микро- және нанопластиктің су қасиеттерінің өзгеруіне әсері туралы гипотеза алға тартылды, нәтижесінде мұхиттың жылынуы жеделдейді және табиғи апаттар күшейеді.

Баяндамада қарастырылған ең өзекті және алаңдатарлық мәселелердің бірі микро- және нанопластиктің (МНП) адам денсаулығына әсері болып табылады. Кішігірім өлшемдерінің арқасында пластикалық бөлшектер биологиялық кедергілерді жеңе алады, тотығу стрессін, ДНҚ-ның зақымдалуын, қабыну реакцияларын және жасушалық функцияларды бұзуды тудырады. МНП әсері мен нейродегенеративті және нейropsychиатриялық аурулардың таралуының жоғарылауы арасындағы потенциалды корреляцияға ерекше назар аударылады. Баяндамада пренатальды және постнатальды кезеңде дамып келе жатқан ағзаға МНП әсер ету когнитивтік функциялардың және психикалық денсаулықтың бұзылуына әкелетінін көрсетеді, бұл адамзат болашағы үшін маңызды мәселе болып табылады.

Микро- және нанопластиктің әсерінен болатын аурулар санының артуы қазірдің өзінде халықтың өмір сүру сапасын айтарлықтай нашарлатуда, әсіресе пластикалық ластану деңгейі жоғары аймақтарда.

Баяндамада жоғары қауіпті аймақтарға жатқызылған аймақтар, сондай-ақ салыстырмалы түрде қауіпсіз болып қалатын аймақтар айтылады. Жағдайдың нашарлауы және осы әсерден қорғаудың тиімді әдістерінің жоқтығы адамдарды қауіпсіз өмір сүру жағдайларын іздеу үшін ластанған аумақтардан кетуге мәжбүр етуі мүмкін. Бұл бақыланбайтын жаппай көші-қонның алғышарттарын жасайды, бұл өз кезегінде әлеуметтік шиеленісті күшейтіп, қалалық инфрақұрылымға ауыртпалық түсіріп, экономиканы тұрақсыздандыруы мүмкін.

Осылайша, пластикалық ластанудың экологиялық проблемасы бірте-бірте макроэкономикалық және геосаяси проблемаға айналады.

Баяндамада микропластик мәселесін шешу қажеттілігіне баса назар аударылып, оның таралуына, әсері мен салдарына жаңа көзқарас ұсынылады. Жұмыстың бірегейлігі пластикалық ластанудың физикалық, химиялық және биологиялық аспектілері туралы деректерді біріктіретін пәнаралық көзқараста жатыр. Бұл баяндаманы адамзат пен планетаның қауіпсіз болашағы үшін тұрақты шешімдерді әзірлеуге мүдделі кең ауқымды пәндердің зерттеушілері мен ғалымдары үшін өзекті етеді.

## ПЛАСТИКАЛЫҚ ЛАСТАНУДЫҢ САЛДАРЫ: МИКРО- ЖӘНЕ НАНОПЛАСТИК (МНП) ПЛАНЕТАЛЫҚ ДАҒДАРЫСТЫҢ ЖАҢА ФАКТОРЫ РЕТІНДЕ

Пластик қазіргі өмірдің ажырамас бөлігіне айналды. Қаптама, ыдыс-аяқ, киім-кешек, аяқ киім, гигиеналық құралдар, медициналық бұйымдар, көлік және байланыс құралдары - адамды қоршап тұрған заттардың көпшілігі пластиктен жасалған. Дегенмен, ол тек үлкен объектілер түрінде ғана емес, сонымен қатар осы өнімдерден бөлінетін микроскопиялық бөлшектер - микро- және нанопластик түрінде де бар. Микропластиктер - бұл жай көзбен көруге болатын өлшемі 5 мм-ден аз пластикалық бөлшектер. Нанопластик, керісінше, 1 микроннан (метрдің миллионнан бір бөлігі) аз өлшемдерге ие, сондықтан бұл бөлшектердің көпшілігін стандартты микроскоппен де көруге болмайды.

Пластикалық материалдар көптеген түрлермен ұсынылған, бірақ олардың барлығы полимерлерге негізделген - бір-бірімен байланысқан үлкен молекулалардан тұратын табиғи немесе синтетикалық қосылыстар. Бірегей химиялық қасиеттерінің арқасында полимерлер өте берік және соққыға төзімді.

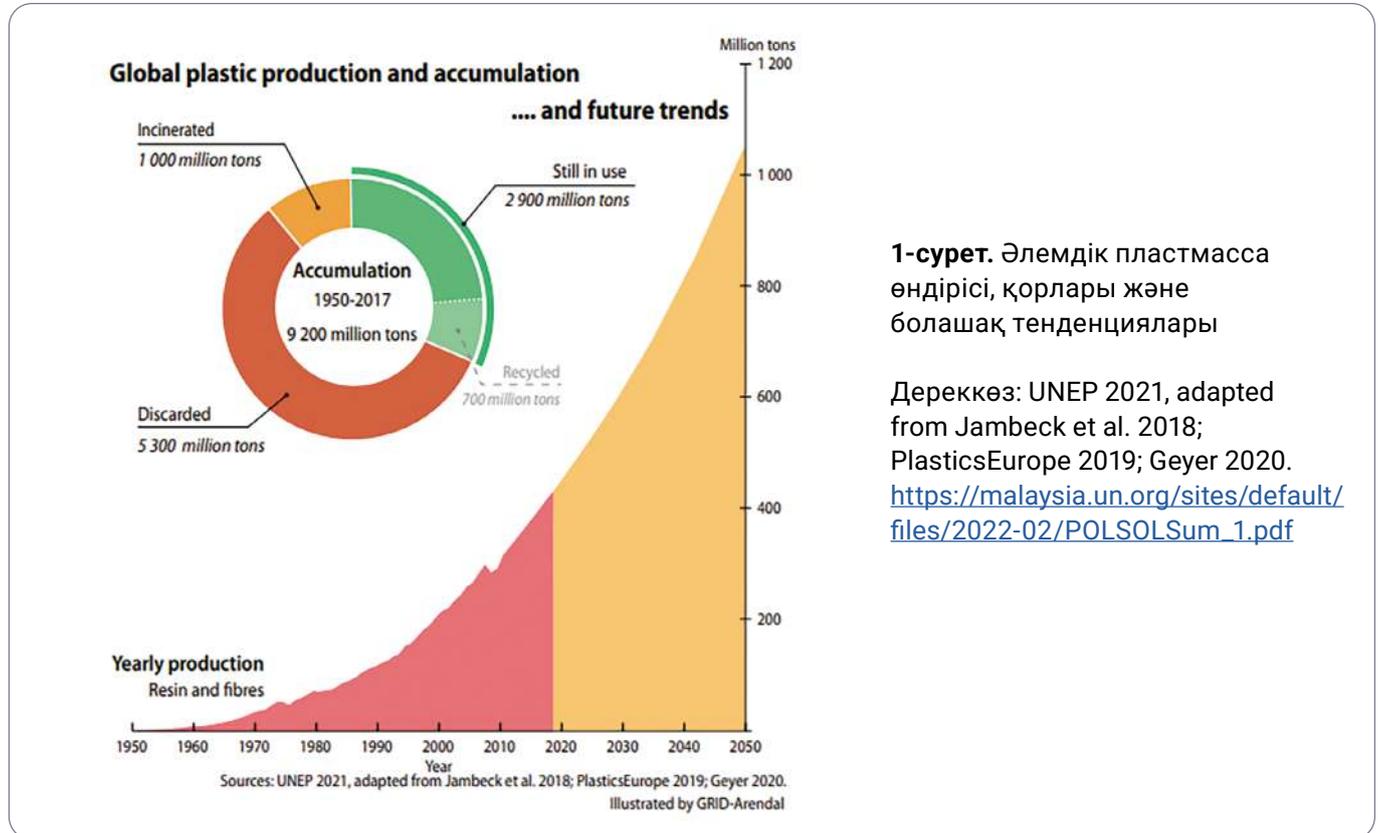
Осылайша, пластик өзінің беріктігіне, әмбебаптығына және төмен құнына байланысты бір рет қолданылатын заттарды қоса алғанда, жаппай өндірістің негізгі материалына айналды<sup>1</sup>. Бірақ пластикалық қалдықтарды нашар басқару пластикті әлемдегі ең маңызды қоршаған ортаны ластаушыға айналдырды.

### Пластикалық қалдықтардың жаһандық өндірісіндегі сандық бағалаулар мен тенденциялар

1950 жылдардан бері дүние жүзінде шамамен 9,2 миллиард тонна пластик өндірілді. Оның 2,9 миллиард тоннасы қазіргі уақытта пайдаланылуда, оның ішінде 2,7 миллиард тонна таза пластик және 0,2 миллиард тоннаға жуық қайта өңделген материал. Оның 5,3 миллиард тоннасы қоқысқа лақтырылып, 1 миллиард тоннасы өртелді. Сондай-ақ 1,75–2,5 миллиард тонна «дұрыс басқарылмады» деп есептелетіні белгілі, яғни олар қоршаған ортаға бақылаусыз шығарылуы мүмкін (1-сурет).

<sup>1</sup>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](https://www.kit.edu/kit/english/pi_2022_097_blind-spots-in-the-monitoring-of-plastic-waste.php)

Бүгінгі күні пластмассадан жасалған бұйымдарға 640 миллион тоннаға жуық қосымша химиялық заттар қосылды<sup>2</sup>. UNEP<sup>3</sup> мәліметтері бойынша жыл сайын дүниежүзінде 400 миллион тоннадан астам пластик қалдықтары шығарылады.



**1-сурет.** Әлемдік пластмасса өндірісі, қорлары және болашақ тенденциялары

Дереккөз: UNEP 2021, adapted from Jambeck et al. 2018; PlasticsEurope 2019; Geyer 2020.  
[https://malaysia.un.org/sites/default/files/2022-02/POLSOLSum\\_1.pdf](https://malaysia.un.org/sites/default/files/2022-02/POLSOLSum_1.pdf)

Пластикалық қалдықтардың бар болғаны 9 %-ы ғана қайта өңделеді, 19 %-ы өртеледі, ал қалғанының бәрі қоршаған ортада — қоқыс үйінділері мен мұхиттарда<sup>4</sup> қалып қояды(2-сурет).

Қайта өңдеу әдістерінің үлесі	әлем бойынша, 2023 ж.
Қайта өңдеу	9%
Өртеп жіберу	19%
Дұрыс емес өңдеу	22%
Көміп тастау	49%

**2-сурет.** Пластикалық қалдықтардың жылдық өңделу әдісі бойынша, 2000–2023 жж.  
Дереккөз: Our World in Data <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate>

Жыл сайын мұхиттарға шамамен 11 миллион тонна пластик<sup>5</sup> түседі. Бұл әр минут сайын мұхитқа тасталатын бір мусоровоз(қоқыс жинайтын машина) пластикке тең.

<sup>2</sup>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>

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

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

<sup>5</sup>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>

Қазіргі уақытта мұхиттарда 200 миллион тоннадан астам ірі пластик қалдықтары мен 35 540 тонна микропластик<sup>6</sup> бар. Жер бетіндегі көздерден қоршаған ортаға шығарылатын пластикалық қалдықтардың жылдық көлемі қолданылатын талдау әдістеріне байланысты әртүрлі бағаланады. Әдеттегі сценарий және қажетті шаралар қабылданбаған жағдайда, су экожүйелеріне түсетін пластикалық қалдықтардың саны шамамен үш есе артуы мүмкін: 2016 жылы жылына 9-14 миллион тоннадан 2040 жылға қарай жылына 23-37 миллион тоннаға дейін.

Басқа талдау әдісіне сәйкес, қалдықтардың мөлшері екі еседен астам, яғни 2016 жылы шамамен 19-23 миллион тоннадан 2030 жылға<sup>7</sup> қарай жылына 53 миллион тоннаға дейін артуы мүмкін.

Зерттеулерге сәйкес, қазіргі тенденцияларды сақтай отырып, 2050 жылға қарай мұхиттағы пластиктің көлемі шамамен 12 000 миллион тонна<sup>8</sup> болады, бұл салмағы бойынша мұхиттағы барлық балықтың массасымен (шамамен 10 000 миллион тонна<sup>9</sup>) тең болады.

Түріне байланысты пластик 100 жылдан 1000 жылға дейін ыдырайды (3-сурет). Мұхитта пластик әлдеқайда баяу ыдырайды, ал теңіз тереңдіктерінің қараңғы және суық жағдайларында оның ыдырау жылдамдығы тағы да азаяды<sup>10</sup>.



<sup>6</sup>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>

<sup>7</sup>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>

<sup>8</sup>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>

<sup>9</sup>Irigoien, 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>

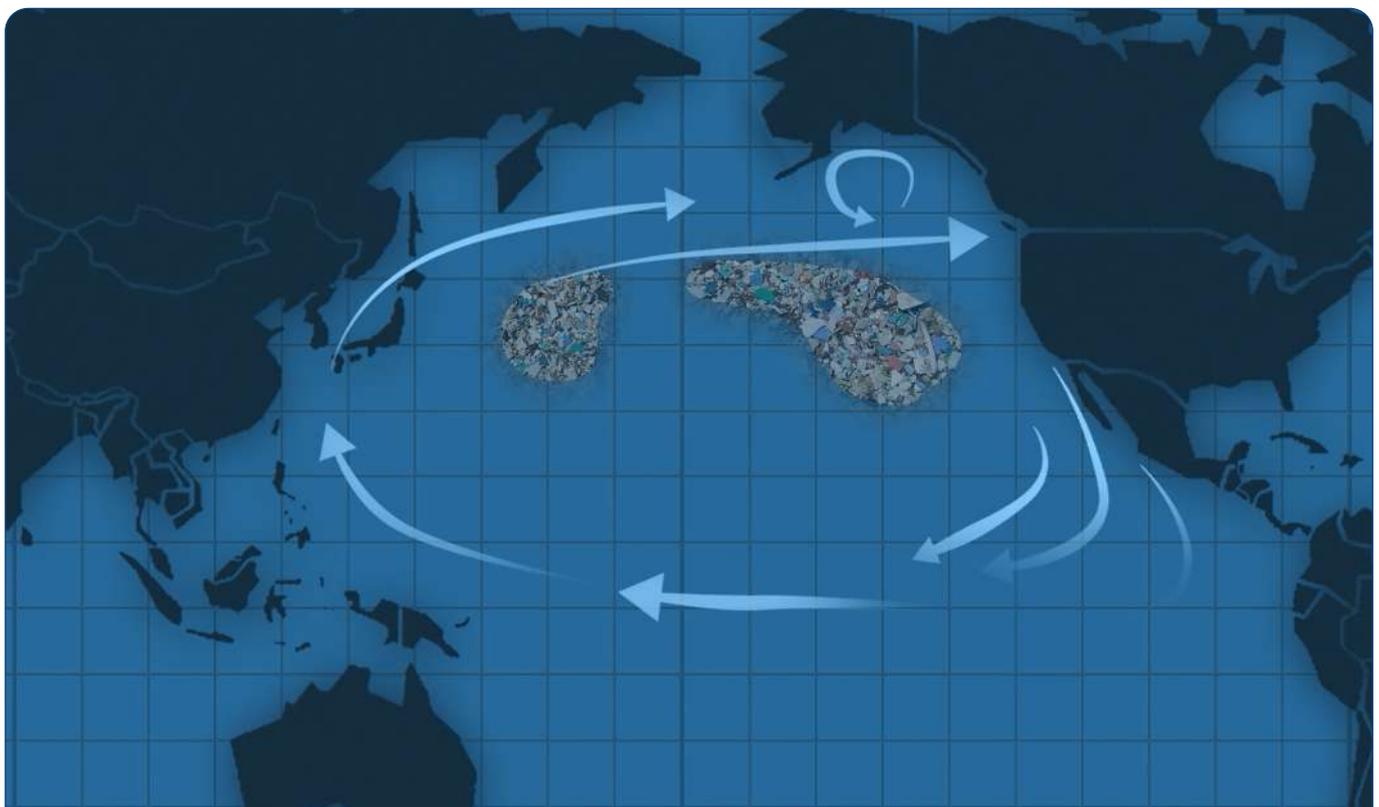
<sup>10</sup>Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C. & Barlaz, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. Phil. Trans. R. Soc. B 364, 1985–1998 (2009). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>

Өртенген материалдарды қоспағанда, қоршаған ортаға түскен барлық кәдімгі пластиктер тұтас немесе бөлшек түрінде ыдырамай қалады<sup>11</sup>. Бұл қалдықтар іс жүзінде ешқашан жоғалмайды, бірақ жинала береді. Бұл жағдайды үнемі қоқыспен толтыратын, бірақ ешқашан шығарылмайтын қоқыс контейнерімен салыстыруға болады. Бір айдан кейін мұндай контейнермен не болады деген сұрақ жаһандық пластикалық қалдықтардың жиналу мәселесінің ауқымын көрсетеді.

## Тынық мұхитының аса үлкен қоқыс континенті

Судың ішіндегі және бетіндегі пластик қоқыстарды мұхит ағындары басып алып, мұхиттың орталық аймақтарына тасымалданып және «аралдар» деп аталатын үлкен жинақтарды құрайды.

«Тынық мұхитының аса үлкен қоқыс континенті» - тұрақты түрде өсіп жатқан планетадағы пластикалық қалдықтардың ең үлкен шоғырлануы (4-сурет). Үлкен Тынық мұхитындағы қоқыс жиындысы Солтүстік Америка мен Жапония арасындағы кең аумақты қамтиды. 2018 жылы ол шамамен 1,6 миллион шаршы шақырымды<sup>12</sup> құрады, дегенмен бұл көрсеткіш өзгеріп тұруы мүмкін.



**4-сурет.** Тынық мұхитындағы қоқыс жиындысының пайда болуының схемалық процесі

<sup>11</sup>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>

<sup>12</sup>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>

Зерттеулер көрсеткендей, қоқыс жиындысының негізгі бөлігінің 80%<sup>13</sup>-ы пластикалық қалдықтар<sup>14</sup>. Қоқыс жиындысында кем дегенде 80 000 тонна қоқыс бар<sup>15</sup>. Дегенмен, бұл мәселенің көрінетін бөлігі ғана. Мұхитқа түсетін пластиктің 94%-ы теңіз түбіне түседі<sup>16</sup>. Бұл жерде қоқыстардың едәуір мөлшері жасырынып, жиналуы мүмкін.

Тынық мұхитындағы үлкен қоқыс жиындысының нақты мөлшері белгісіз болып қалады, өйткені Солтүстік Тынық мұхитының айналуы қазіргі технологиямен жан-жақты ғылыми зерттеу үшін тым үлкен.

## Мұхиттағы пластиктің жиналу динамикасы

Аспаптық өлшеулер Үлкен қоқыс жиынды көлемінің экспоненциалды өсуін көрсетеді. 2015-2022 жылдар аралығында бұл аймақтағы пластикалық қалдықтардың орташа массасы 5 есеге өсті<sup>17</sup>. Ерекше алаңдаушылық тудыратын жайт, сол кезеңде шағын пластикалық фрагменттердің саны 10 есе өсті, бұл үлкен пластикалық заттардың фрагменттелуінің қарқынды процесін көрсетеді.

Үлкен қоқыс жиыны шын мәнінде біздің планетамыздың жетінші «континентін» құрайды. Дегенмен, бұл құбылыстың бірегей емес екенін атап өткен жөн. Қазіргі уақытта ғылыми қоғамдастық Дүниежүзілік мұхиттағы қоқыстардың 5 ірі жиынтығын анықтады<sup>18</sup>: екеуі Атлант мұхитында, екеуі Тынық мұхитында және біреуі Үнді мұхитында<sup>19</sup> (5-сурет).

<sup>13</sup>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)

<sup>14</sup>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>

<sup>15</sup>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>

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

<sup>17</sup>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>

<sup>18</sup>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>

<sup>19</sup>Garbage Patches. Marine Debris Program. NOAA <https://marinedebris.noaa.gov/discover-marine-debris/garbage-patches>



**5-сурет.** Дүниежүзілік мұхиттағы қоқыстардың бес ірі жинақталуының схемалық көрінісі: екеуі Атлант мұхитында, екеуі Тынық мұхитында және біреуі Үнді мұхитында. Мұхиттарда антропогендік шығу тегі бар пластик пен басқа да қалдықтардың миллиондаған тоннасы айналымда жүр. Қоқыс жиынтығы апатты қарқынмен ұлғайып келеді

## Пластиктің микро- және нанобөлшектерінің түзілу процестері

Пластикалық қалдықтар биоыдырауға өте төзімді, бірақ толқындардың, тұзды судың және күн радиациясының әсерінен ол кішкентай бөлшектерге - микро және нанопластикке<sup>20</sup> ыдырайды, бұл жай көзге көрінбейтін болуы мүмкін. Бұл бөлшектер өздерінің полимер құрылымын сақтайды<sup>21</sup> және ыдырау процесі нано деңгейге дейін жалғасады (6-7-сурет). Нәтижесінде пластикалық қалдықтар планетаның экожүйесінің тұрақты құрамдас бөлігіне айналады.

Сонымен қатар, микро- және нанопластиктердің құрамында пластикалық өндіріс процесінде қосылатын қауіпті химиялық заттар бар.

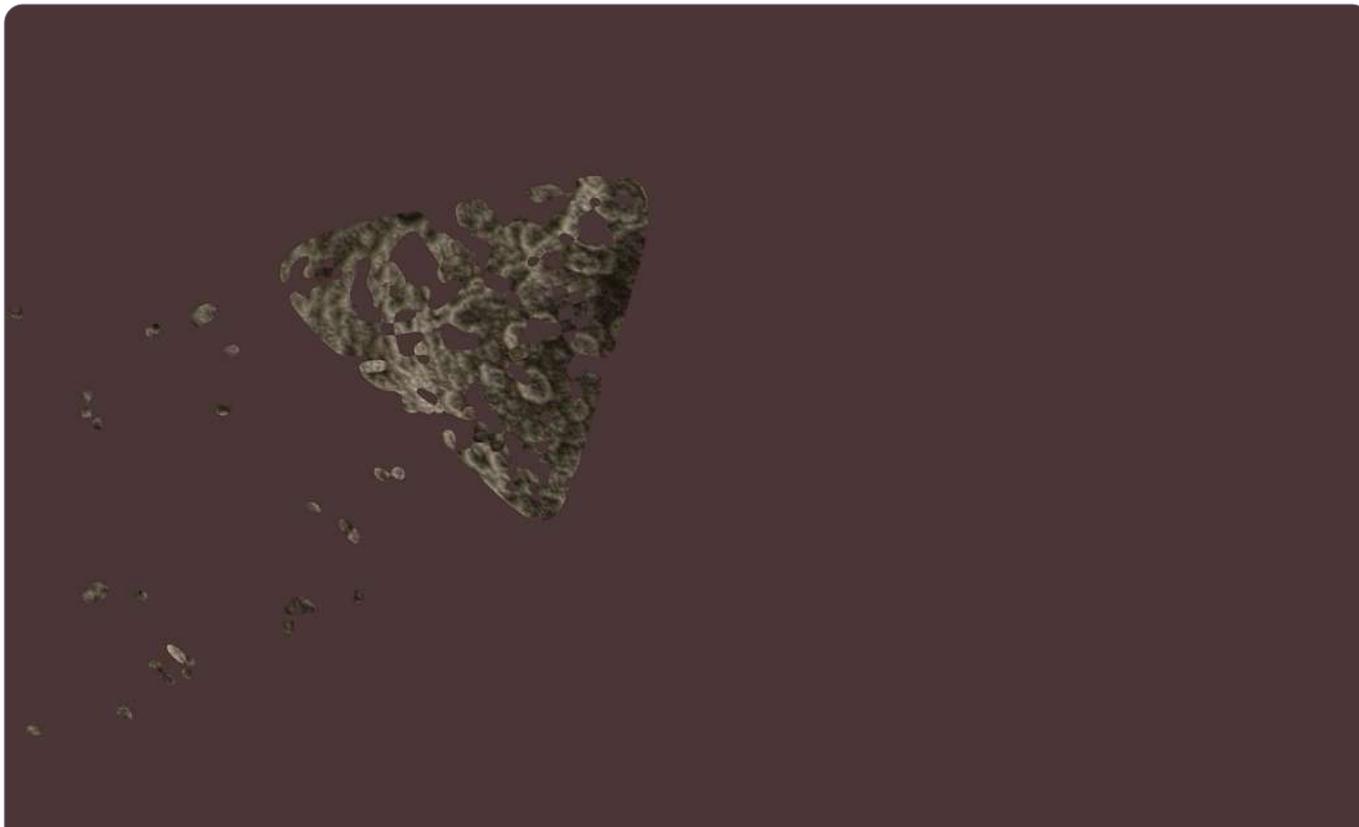


**«Пластиктің құрамында 16 000-ға жуық химиялық заттар бар. Олардың 4200-ден астамы қоршаған ортада тұрақты болатыны, тірі ағзаларда жиналатыны, ұзақ қашықтыққа тасымалданатыны немесе ықтимал қауіп төндіретіні белгілі»,** – дейді Гельмгольц қоршаған ортаны зерттеу орталығының эколог химигі, профессор Анника Янке<sup>22</sup>.

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

<sup>21</sup>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>

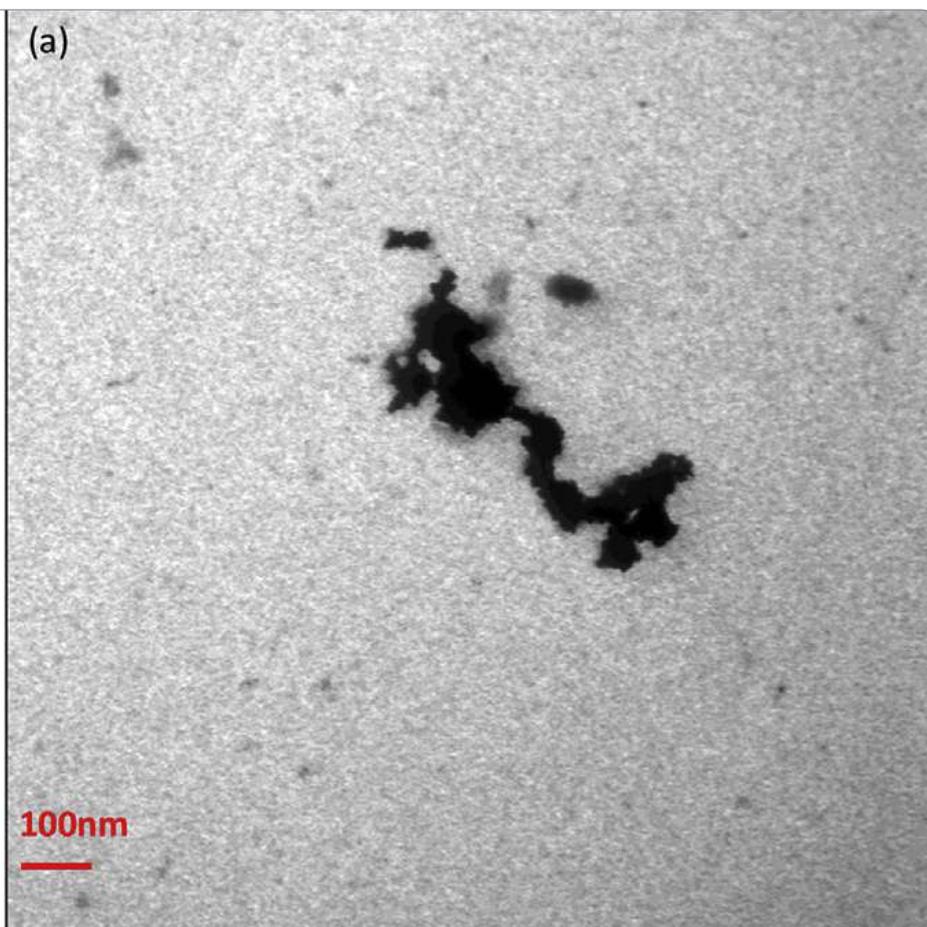
<sup>22</sup>Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ. Environmental Impacts of Plastics: Moving beyond the perspective on waste. [https://www.ufz.de/index.php?en=36336&webc\\_pm=44/2024](https://www.ufz.de/index.php?en=36336&webc_pm=44/2024)



**6-сурет.** Полимер құрылымын сақтай отырып, пластикалық бөлшектердің нано деңгейге дейін бөлшектену процесінің схемалық көрінісі

**7-сурет.** Атлант мұхитының солтүстік бөлігінде жиналған, ультракүлгін (УФ) сәулеленудің әсерінен тозған микропластик бөлшектерінің деградациясы нәтижесінде алынған полиэтилен нанопластиктерінің қоршаған ортада кездесетін үлгілерін өткізгіш электрондық микроскопия әдісімен зерттеу

Дереккөз: 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>



## Мұхиттағы МНП-тің таралуы

Пластиктің ең жоғары концентрациясы қоқыс жиындыларында кездеседі. Бұл мұхит үйінділері микро- және нанопластик үздіксіз жасалатын зауыттар ретінде әрекет етеді. Вирустың қан арқылы ағзаға таралатыны секілді, микропластиктерді мұхит ағындары бүкіл дүниежүзілік мұхиттарға апарды, бұл мәселенің жаһандық ауқымын көрсетеді.

Микропластикті анықтаудың техникалық күрделілігі оның мұхиттардағы нақты мөлшерін анықтауды қиындатқанына қарамастан, теориялық есептеулер бұл мәселенің ауқымын бағалауға мүмкіндік береді.

Микропластиктер мұхит суларының барлық дерлік үлгілерінде анықталды, ал кейбір аймақтарда олардың концентрациясы орташа деңгейден ондаған есе жоғары.

Мұхит айналмалары микропластиктердің жаһандық таралуына, соның ішінде Арктика сияқты шалғай аймақтарға да ықпал етеді. Мұз керндерін зерттеу нәтижелері Солтүстік Мұзды мұхиттағы микропластикпен ластану деңгейі Шотландияның солтүстігіндегі Атлант мұхиты суларымен немесе Солтүстік-Тынық мұхит субтропикалық айналымының<sup>23</sup> суларымен салыстырғанда 100 есе жоғары екенін көрсетті. Бұл мәселенің ауқымдылығын және оның шекараарлық сипатын көрсетеді.

Теңіздің пластикалық ластануы туралы жаһандық зерттеулердің көпшілігі мұхиттың беткі қабатына бағытталған. 2019 жылы мұхиттың беткі қабатында 82-ден 358 триллионға дейінгі пластикалық бөлшектер бар деп есептелді<sup>24</sup>.

Дегенмен, теңіз тереңінде және шөгінділерде микропластик бөлшектерінің саны есепсіз триллионға жететіні туралы дәлелдер бар<sup>25</sup>.

Жеңіл пластик су бетінде қалқып жүреді, ал тығызырақ немесе биотамен колонизацияланған пластик теңіз түбіне батады<sup>26</sup>. Есептер көрсеткендей, қала қалдықтарынан шыққан пластиктің шамамен 50% тығыздығы теңіз суынан жоғары, бұл оның тез батып кетуіне көмектеседі. Теңіз түбінде ол терең су ағындары арқылы таралып, шұңқырлар мен ойыстарда жиналады. Микропластиктер тіпті мұхиттың ең терең жері Мариан шұңғымасынан табылған<sup>27</sup> (8-9-сурет).

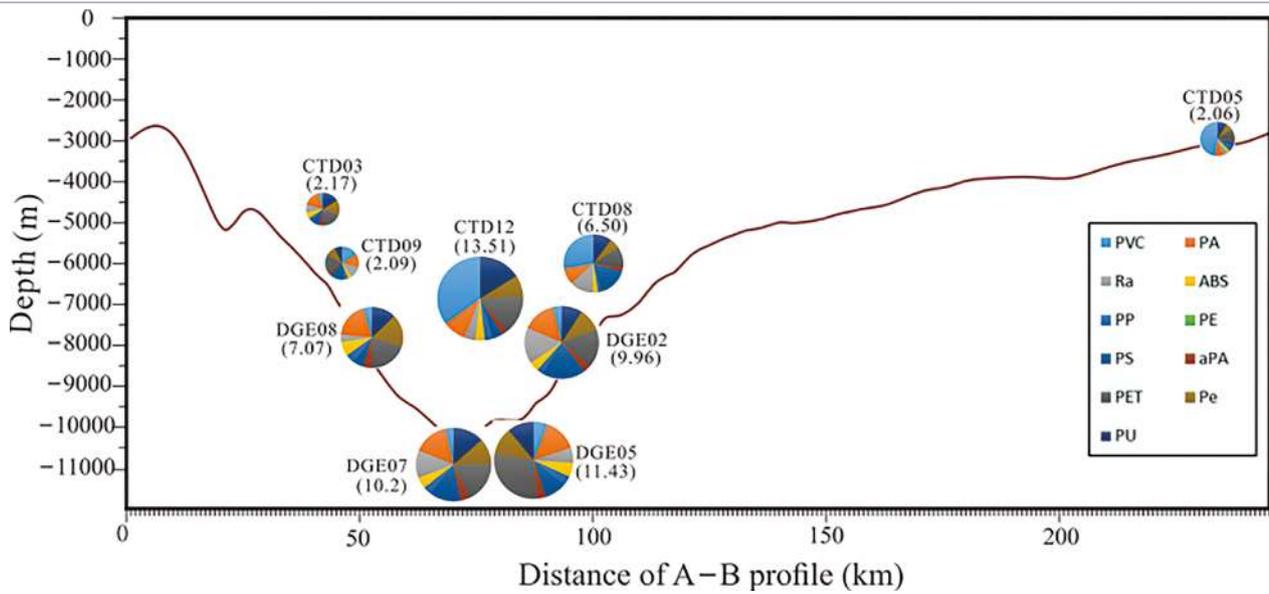
<sup>23</sup>Obbard, R. W. et al. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future* 2, 315–320 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014EF000240>

<sup>24</sup>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>

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

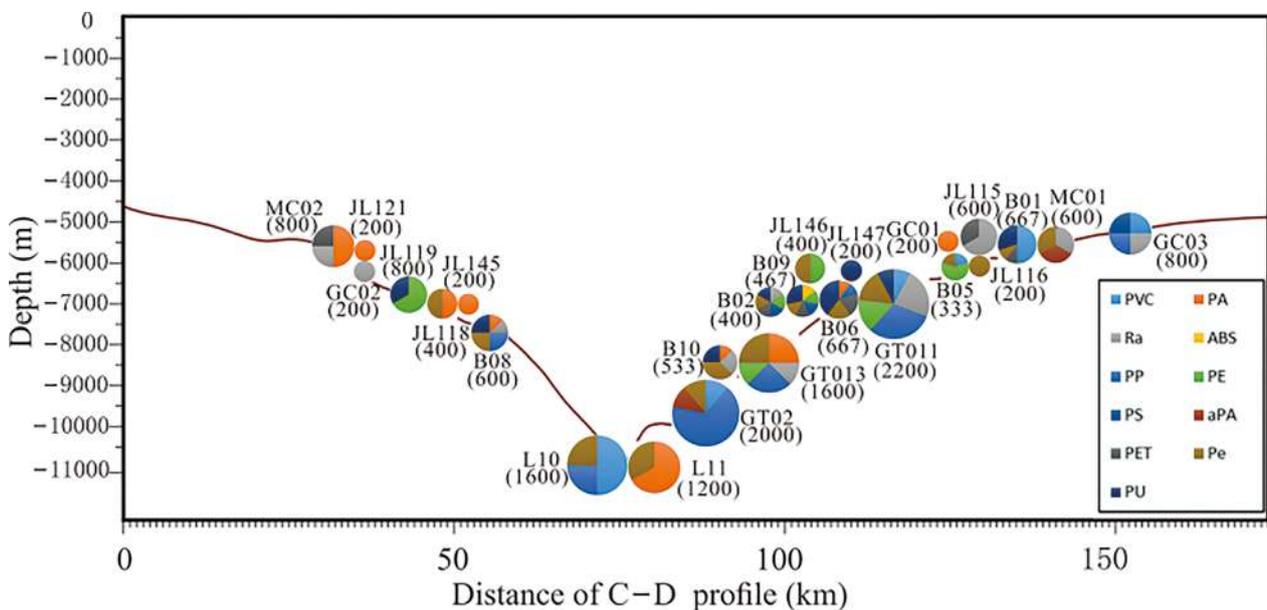
<sup>26</sup>Lusher, A. (2015). Microplastics in the Marine Environment: Distribution, Interactions and Effects. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (eds) *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_10)

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



**8-сурет.** Мариан шұңғымасынан алынған су үлгілеріндегі микропластиктің таралуы және құрам профилі. Дөңгелек диаграммалар микропластиктің құрамын көрсетеді, ал жақшадағы сандар – микропластиктің таралуын литрге шаққандағы бөлшектер саны бойынша білдіреді. ПВХ (поливинилхлорид), ПА (полиамид), Ра (вискоза), ABS (акрилонитрил бутадиен стирол), РР (полипропилен), ПЭ (полиэтилен), PS (полистирол), АРА (хош иісті полиамид), ПЭТ (полиэтилен-терефталат), ПЭ (полиуретан). Х осі А нүктесінен (12 N, 142,5 E) В нүктесіне (9,8 N, 141,43 E) дейінгі көлденең сызыққа сәйкес келеді.

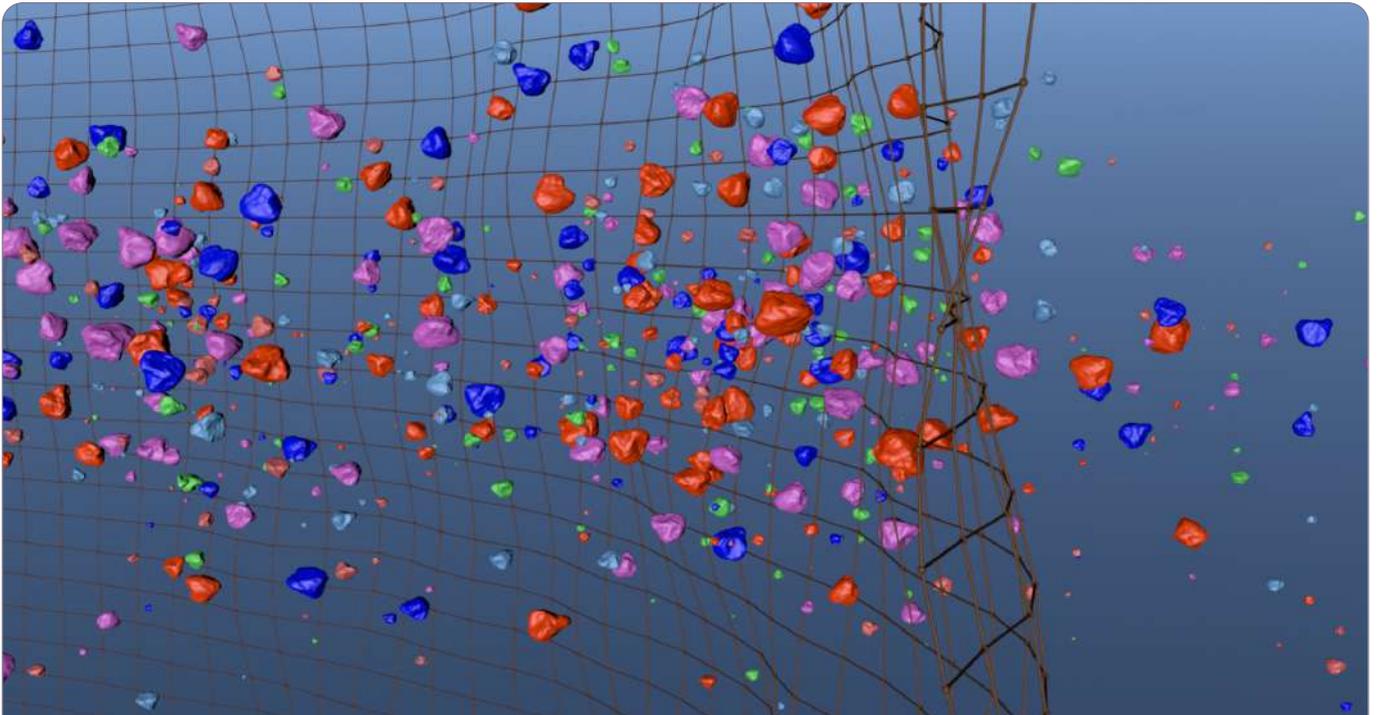
Дереккөз: Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>



**9-сурет.** Мариан шұңғымасынан алынған шөгінді үлгілеріндегі микропластиктің таралуы және құрам профилі. Дөңгелек диаграммалар микропластиктің құрамын көрсетеді, ал жақшадағы сандар – микропластиктің таралуын литрге шаққандағы бөлшектер саны бойынша білдіреді. ПВХ (поливинилхлорид), ПА (полиамид), Ра (вискоза), ABS (акрилонитрил бутадиен стирол), РР (полипропилен), ПЭ (полиэтилен), PS (полистирол), АРА (хош иісті полиамид), ПЭТ (полиэтилен-терефталат), ПЭ (полиуретан). Х осі С нүктесінен (12 N, 141,9 E) D нүктесіне (10,5 N, 141,3 E) көлденең сызыққа сәйкес келеді.

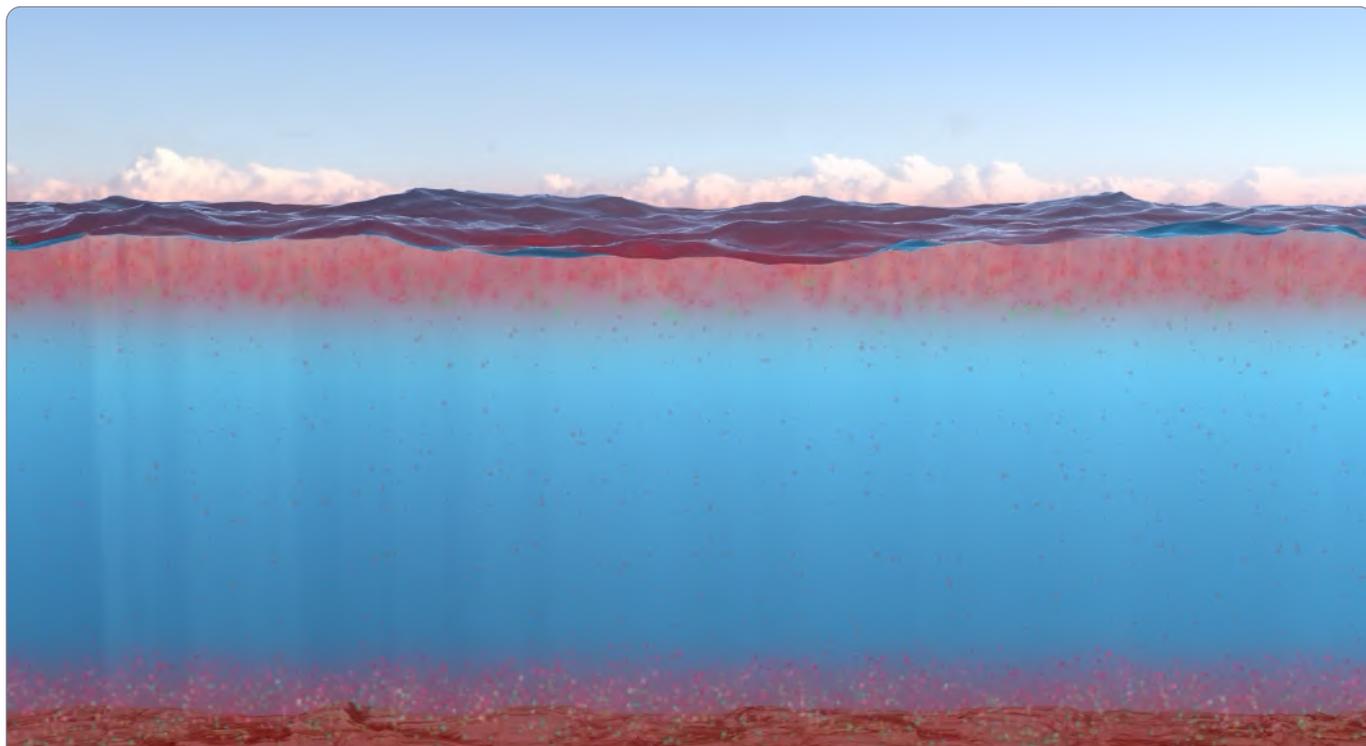
Дереккөз: Peng, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Persp. Let.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

Шын мәнінде, микропластиктердің негізгі жинақталатын жері мұхит беті емес, терең теңіз түбі болып табылады. Бірте-бірте бүкіл мұхит түбі пластикалық қабатпен жабылады. Дегенмен, мұхиттың микропластикпен ластануы туралы деректер төмендетілген болуы мүмкін және нақты жағдай әлдеқайда нашар болуы мүмкін. Альфред Вегенер атындағы полярлық және теңізді зерттеу институтының (Германия) биологы Мелани Бергманның айтуынша: «Күрделі және қымбат сынама алу жабдықтарына бәрінің қолы жете бермейді». Оның бағалауы бойынша, теңіздегі микропластик бөлшектердің 90%-ы стандартты сынама алу әдістерін қолдану арқылы анықталмай қалуы мүмкін, себебі олардың өлшемі анықтау үшін тым кішкентай<sup>28</sup> (10-сурет).

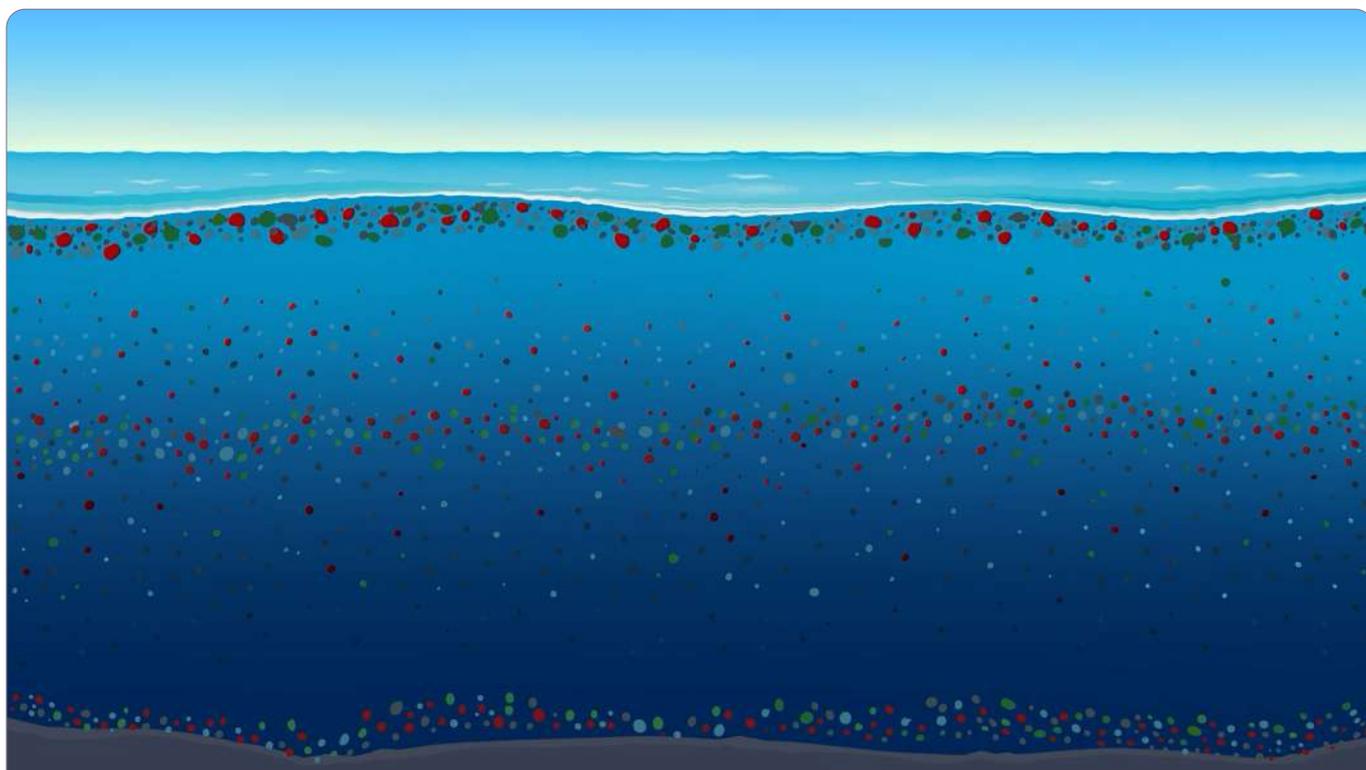


**10-сурет.** Микро- және нанопластиктерді алудың жетілмеген аналитикалық әдістерінің схемалық көрінісі

<sup>28</sup>Microplastics 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>



**11-сурет.** Микро- және нанопластикпен ластанудың беткі және төменгі қабаттарының схемалық көрінісі

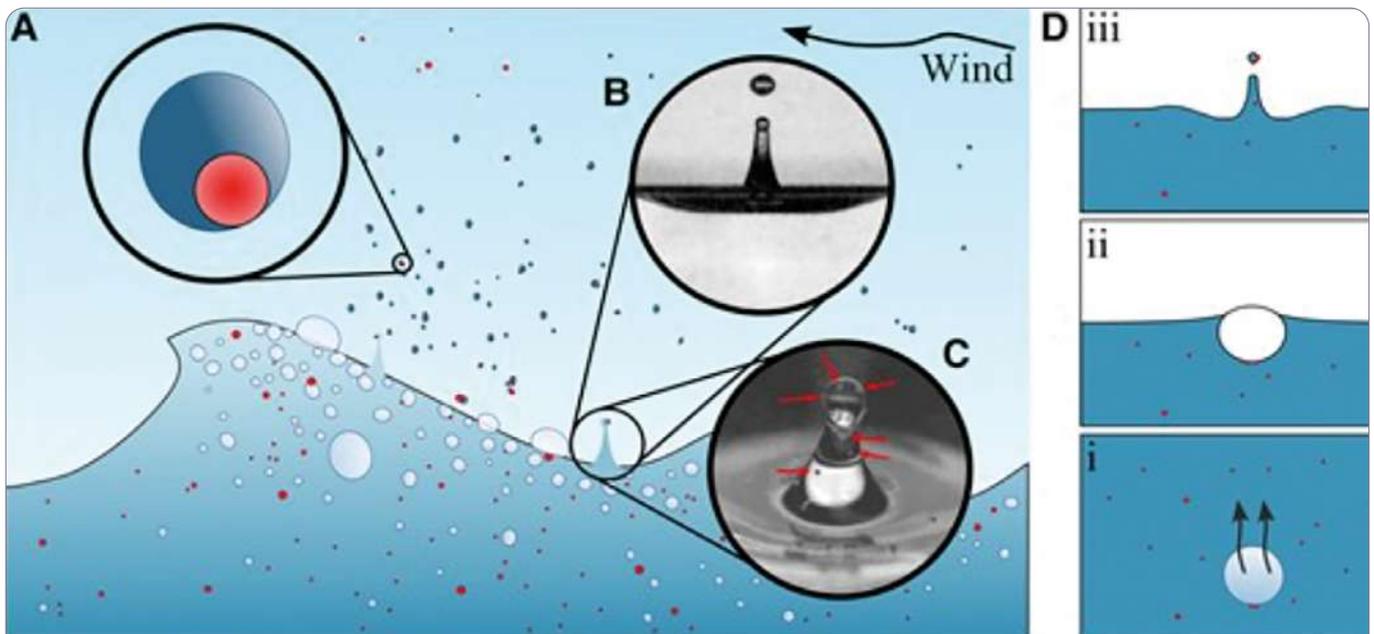


**12-сурет.** Микро- және нанопластиктердің жер бетіндегі, төменгі қабаттардағы және термоклиндік аймақтағы орналасуының схемалық көрінісі

Ластанудың беткі және төменгі қабаттарынан басқа (11-сурет) микро- және нанопластиктердің концентрациясы температураның күрт өзгеруі байқалатын су қабаты термоклинінде<sup>29</sup> (12-сурет) айтарлықтай артады. Бұл қабаттағы тығыздықтың жоғары градиенті микро- және нанопластик бөлшектерінің осы аймақтарда ұсталып қалып, ұзақ уақыт бойы сол жерде сақталуына ықпал етеді. Мұхитты әр қабаты өзіндік температурасы мен тығыздығына ие қатпарлы бәліш ретінде елестетуге болады, ал микропластик осы қабаттардың шекараларында жинақталады.

Сонымен қатар, микропластик мұхитта оны жұтып, қорытып, кейін қайта бөліп шығаратын тірі ағзалар арқылы да таралады<sup>30</sup>.

## МНП-тің қоршаған ортада таралуы



**13-сурет.** Мұхиттан микропластиктерді шығаруға қатысты тиісті процестердің суреті. А) Мұхиттағы микропластиктер (қызыл/қара) теңіз су тамшылары арқылы атмосфераға тасымалданады. В) Жарылған көпіршіктер ұсақ тамшылар немесе ағын тамшылары сияқты аэрозольдер жасайды. С) Сұйықтықта болатын микропластик түзілу кезінде пайда болатын ағынды тамшыларға тасымалдануы мүмкін. Көрсеткілер өлшемі 100 мкм болатын микропластик бөлшектерді көрсетеді. Қалыптасатын тамшылар желмен көтеріліп, микропластикалық материалды атмосфераға тасымалдай алады. Сұйықтық ақырында буланып, микропластикалық бөлшектерді қалдырады. D) Микропластиктің көпіршіктердің жарылуы кезінде шығуымен байланысты физикалық процестер көпіршіктің көтерілуі барысында бөлшектердің ұсталуынан басталады. Di). Бетінен шыққаннан кейін, Dii) көпіршік ақырында өзінің тепе-теңдік формасын қабылдайды, ол жарылғаннан кейін негізінде капилляр толқындарын шоғырландырып, Diii) микропластикалық материалды тасымалдайтын бүршік тәрізді тамшыларды құрайды.

Дереккөз: 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>

<sup>29</sup>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>

<sup>30</sup>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>

Су буланған кезде<sup>31</sup> микропластиктер мұхит бетінен атмосфераға көтеріледі<sup>32</sup>. Сондай-ақ теңіз шашырауы, жел және толқындардың үйлесуі су ішінде микропластик бар ауа көпіршіктерінің түзілуіне әкеледі. Көпіршіктер жарылған кезде бөлшектер атмосфераға таралады (13-сурет). Жыл сайын 136 000 тонна микропластик<sup>33</sup> тек теңіз желдері арқылы жағалауларға тасымалданады. Жыл сайын 25 миллион метрлік тоннаға дейінгі микро- және нанопластик теңіз ауасы, шашыранды тамшылар, қар мен тұман арқылы мыңдаған шақырымға тасымалданып, елдер, құрлықтар және мұхиттар арқылы өтеді.



**«Ауа – суға қарағанда әлдеқайда динамикалық орта. Соның нәтижесінде микро- және нанопластик біздің планетамыздың ең алыс әрі осы уақытқа дейін айтарлықтай бұзылмаған аймақтарына әлдеқайда тез жетуі мүмкін»** – дейді Германиядағы Альфред Вегенер институтының биологы доктор Мелани Бергманн. Ондай жерлерге түскен соң, бұл бөлшектер жер бетінің климатына және жергілікті экожүйелердің денсаулығына әсер етуі мүмкін<sup>34</sup>.

Микропластик әртүрлі орындардан табылды: теңіз беткейінен бастап терең теңіз түбіндегі шөгінділерге дейін, ауыл шаруашылығы алқаптарынан ең биік тауларымызға дейін, сондай-ақ теңіз мұзында, көлдер мен өзендерде. Ол су және құрлықта тіршілік ететін 1 300 түрден анықталған – қоректік тізбектің негізіндегі омыртқасыздардан бастап ең жоғарғы жыртқыштарға дейін. Биологиялық ұйымның барлық деңгейлерінде, жасушалық деңгейден экожүйелік деңгейге дейін әсер ететіні туралы дәлелдер бар. Микропластик біз тұтынатын тағамда, ішетін суда және тыныс алатын ауада кеңінен таралған (14-сурет). Ол адам ағзасының көптеген тіндері мен мүшелерінен анықталған және оның теріс әсері бар екендігін көрсететін дәлелдер пайда болуда<sup>35</sup>.



**14-сурет.** Тамақтағы, судағы және ауадағы микропластиктердің кең таралуы

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

<sup>31</sup>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>

<sup>32</sup>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>

<sup>33</sup>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>

<sup>34</sup>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>

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

Осылайша, алыс және тіпті полярлық аймақтарға таралуы атмосфералық және теңіздік тасымалдың үйлесуімен түсіндірілуі мүмкін. Сондықтан қандай бөлшектердің өлшемдері және қандай мөлшерде тасымалданатынын анықтау үшін атмосфера мен мұхиттың өзара әрекеттесуін түсіну маңызды.

Мысалы, жақында бір топ зерттеушілер Жапониядағы тау шыңдарында бұлттардың ішінен гидрофильді (суды тартатын) беті бар<sup>36</sup> пластик түйіршіктерді тапты. Содан кейін олар үлгілерді талдап, төменгі биіктіктегі және тығызырақ бұлттарда микропластиктердің көп мөлшері бар деген қорытындыға келді. Полимерлердің конденсация ядролары ретінде болуы бұлттардың жылдам пайда болуында шешуші рөл атқарады, бұл ақыр соңында жалпы климатқа әсер етуі мүмкін<sup>36</sup>.

Бұлттағы пластик бөлшектер суды көбірек ұстауға көмектеседі, бұл жауын-шашынды кешіктіреді. Жаңбыр жауған кезде ол күшейе түседі, өйткені бұлттарда су көбірек жиналады. Сонымен қатар, ультракүлгін сәулеге және бұлттардан сүзілген суға ұшыраған микропластиктің беті кедір-бұдырлырақ болады, бұл оның бетінде қорғасын, сынап және оттегі бар топтардың көбірек жиналуына ықпал етеді<sup>37</sup>.

Атмосфера негізінен микропластиктің ұсақ бөлшектерін тасымалдайды, бұл оны әртүрлі экожүйелерде айтарлықтай шөгінділердің түзілуіне әкелуі мүмкін анағұрлым жылдам тасымалдау жолына айналдырады. Зерттеу деректері ормандар желмен таралатын микропластик үшін тосқауыл ретінде қызмет ететінін көрсетеді. Жапырақтар, бұтақтар мен діңдер өз беттерінде шөгіп қалатын микропластикті ұстап қалады. Соның нәтижесінде желмен және жауын-шашынмен таралатын пластик микробөлшектері өсімдіктердің үстінде қалып қояды немесе жерге шөгеді.

Тығыз орман жамылғыларының астында шектеулі желдету бұл бөлшектердің орманды жерлерде тұрақты жиналуына ықпал етеді. Шатыр жапырақтары ауадағы микропластиктер<sup>38</sup> үшін ұзақ мерзімді қойма ретінде әрекет етеді. Зерттеулер көрсеткендей, 2017 жылдың күзінен 2019 жылдың жазына дейін АҚШ-тың батысындағы 11 ұлттық парктер мен қорықтарға жауын-шашын кезінде 1000 тоннадан астам пластик бөлшектері түскен. Бұл мөлшер 120 миллион пластик бөтелке шығаруға<sup>39</sup> жеткілікті. Мұндай жағдайлар әлемнің басқа аймақтарында да байқалады. Мысалы, Жапониядағы шамамен 32 500 км<sup>2</sup> аумақты алып жатқан тісті емен (*Quercus serrata*) ормандары жыл сайын шатырларында ауадағы 420 триллиондай микропластик бөлшектерін ұстайды<sup>40</sup>.

<sup>36</sup>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>

<sup>37</sup>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>

<sup>38</sup>Sunaga, 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>

<sup>39</sup>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>

<sup>40</sup>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>

Ормандардан айырмашылығы, қалаларда жақсы желдету және автокөліктердің шығарындылары мен өнеркәсіптік түтіннің ауыр бөлшектерінің болуына байланысты кейбір микро- және нанопластик шөгеді. Бүгінгі таңда ормандардағы ауа мегаполистерге қарағанда нанопластикпен қаныққан.

Әлем өзгерді! Енді адамдар мұхитта шомылып, жағажайда күнге қыздырылғанда, жағалау немесе саябақ бойымен жүргенде, не орманда серуендеп, денсаулығын жақсартуға тырысқанда, керісінше, ағзасын микропластиктің қосымша әсеріне ұшыратады. Африка мен Солтүстік Америкадан келген микропластиктер француз Пиренейлері сияқты шалғай және адам қолы тимеген болып көрінетін жерлерден табылған. Бұл ауа ағындары мен жауын-шашын арқылы тасымалданатын, үлкен қашықтықты қамтитын микро пластиктердің ғаламдық таралуын көрсетеді.

Микро- және нанопластик қалалық су жолдарына нәсер дренаждары, өнеркәсіптік шығарындылар және атмосферадан бөлшектерді алатын жаңбыр суы арқылы түседі. Мысалы, синтетикалық маталарды бір рет жуу ағынды суға 1,5 миллионға дейін микропластик бөлшектерін шығаруы мүмкін<sup>41</sup>. Бұл бөлшектер бір рет ағынды суларға түсіп, өзендер мен мұхиттарға түседі, олар балықтар мен басқа су ағзаларымен жұтылады. Өзендер мен оларды қоршаған ландшафттан табылған қалдықтарды талдай отырып, зерттеушілер мұхитқа өзендер арқылы түсетін пластиктің 88–95%-ын небәрі 10 өзен жүйесі тасымалдайтынын анықтады<sup>42</sup>.

Тағы бір зерттеуде ғалымдар пластик өзендерде қалай тасымалданатыны туралы әдеттегі болжамдарды қайта қарастырып, өзендердегі пластикалық қалдықтардың нақты мөлшері бұрын ойластырылғаннан 90% (пайызға) көп болуы мүмкін деген қорытындыға келді<sup>43</sup>.

Пластик дүниежүзіндегі ірі көлдердің көпшілігінде де бар. Көлдердегі пластикалық қалдықтардың тығыздығы мұхиттағы ең үлкен қоқыс алаңдарынан да жоғары болуы мүмкін, тіпті таза аймақтарда орналасқан көлдерде қоқыстардың айтарлықтай мөлшері бар. Бұл Миландық Бикокка университетінің Барбара Леони мен Вероника Нава жетекшілігімен жүргізілген ірі халықаралық зерттеу барысында расталды<sup>44</sup>. Біріккен Ұлттар Ұйымының Қоршаған орта жөніндегі бағдарламасының (UNEP) 2021 жылғы есебіне сәйкес микропластиктер барлық зерттелген тұщы су қоймаларында, соның ішінде өзендер, көлдер және су қоймаларында табылған<sup>45</sup>. Мысалы, зерттеушілер жыл сайын АҚШ пен Канададан Ұлы көлдерге шамамен 10 000 метрлік тоннаға, яғни 22 миллион фунтқа жуық пластик қалдықтар түсетінін анықтады<sup>46</sup>.

<sup>41</sup>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>

<sup>42</sup>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>

<sup>43</sup>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>

<sup>44</sup>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>

<sup>45</sup>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>

<sup>46</sup>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>

Сайып келгенде, микропластиктер адамдарға балық немесе теңіз өнімдері түрінде оралады.

Итальяндық ғалымдар жемістер мен көкөністерде де миллиондаған микропластик бөлшектерінің бар екенін анықтады. Бұл бөлшектердің жоғары концентрациясы алмада, алмұртта, сәбізде, картопта, латук салатында және брокколида анықталды. Сонымен қатар, жемістердегі бөлшектердің концентрациясы көкөністерге қарағанда 2-3 есе жоғары болды: салат жапырақтарында грамына 52 мыңнан және алмада 223 мыңға дейін<sup>47</sup>.

Зерттеу бүкіл әлем бойынша алынған 159 ағын су сынамасының 81% микропластиктерден тұратынын анықтады<sup>48</sup>. Басқа зерттеулер минералды суда микропластикалық бөлшектердің болуын атап өтіп, бұл тұжырымдарды растайды. Бір қызығы, шыны және полиэтилентерепталат (ПЭТ) бөтелкелеріндегі бөлшектердің саны шамамен бірдей болды, олардың саны литріне 6292 бөлшекке жетті<sup>49, 50, 51</sup>.

Ньюкасл университетінің (Австралия) ғалымдары орташа заманауи<sup>52</sup> адамның қанша пластик тұтынатынын анықтау үшін зерттеу жүргізді. Нәтижелер көрсеткендей, адам жылына 250 г пластик жейді, бұл 50 пластик пакетке тең<sup>53</sup>.

<sup>47</sup>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>

<sup>48</sup>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>

<sup>49</sup>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>

<sup>50</sup>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>

<sup>51</sup>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>

<sup>52</sup>University of Newcastle. Plastic ingestion by people could be equating to a credit card a week. <https://www.newcastle.edu.au/news/2019/06/plastic-ingestion-by-people-could-be-equating-to-a-credit-card-a-week>

<sup>53</sup>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>

## МИКРО- ЖӘНЕ НАНОПЛАСТИКПЕН ЛАСТАНУДЫҢ ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ЖӘНЕ КЛИМАТТЫҚ САЛДАРЫ

### МНП экожүйелерді молекулалық деңгейде қалай бұзады

Пластик қалдықтары барлық жерде кездеседі: мұхиттар мен өзендерден бастап, топырақта, ауада, тіпті мұздықтарда да бар<sup>54</sup>. Ұзақ мерзімді бақылаулар пластиктің өсімдік және жануарлар заттарынан айырмашылығы белсенді табиғи ыдырауға ұшырамайтынын растайды<sup>55</sup>. Ол биодеградацияның табиғи циклдеріне қатыспай қоршаған ортада сақталады. Ыдырау процестеріне қарсы тұру үшін жасалған пластик жаһандық экожүйенің тұрақты элементіне айналды. Бастапқыда технологиялық жетістік деп саналған бұл тұрақтылық қазір айтарлықтай экологиялық теңгерімсіздікке әкеледі.

Пластмасса өндірісінде 13 000-нан астам химиялық заттар қолданылады. Олардың 3200-ден астамы, соның ішінде мономерлер, қоспалар және қайта өңдеуге арналған қосалқы заттар улы қасиеттеріне байланысты ықтимал қауіпті<sup>56</sup>.

### МНП-тің топырақ қасиеттеріне және экожүйенің деградациясына әсері

Зерттеулер көрсеткендей, жер үсті экожүйелерінің, әсіресе ауылшаруашылық топырақтарының микропластикпен ластануы су ортасына қарағанда 4-23 есе жоғары<sup>57</sup> болуы мүмкін, бұл топырақта пластиктің айтарлықтай жинақталуын көрсетеді. Пластик топырақта әртүрлі жолдармен жиналады, оның ішінде тазалау қондырғылары, мульчалау(жабындау), атмосфералық шөгінділер және күнделікті қолданылатын өнімдер бар. Бір рет қолданылатын пластиктен жасалған бұйымдарды сансыз пайдалану топырақтың микро және нанопластикпен қатты ластануымен тығыз байланысты. Табиғи және антропогендік факторлар ұсақ микропластик бөлшектерінің топыраққа енуіне ықпал етеді<sup>58</sup>, бұл маңызды экологиялық процестерді өзгертеді<sup>59</sup>.

Бақылаулар микропластиктің экожүйелерге зиянды әсерін растайды, бұл әсер микроорганизмдерге, өсімдіктерге және топыраққа қатысты олардың құрылымы мен функцияларын қамтиды (15-сурет).

<sup>54</sup>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>

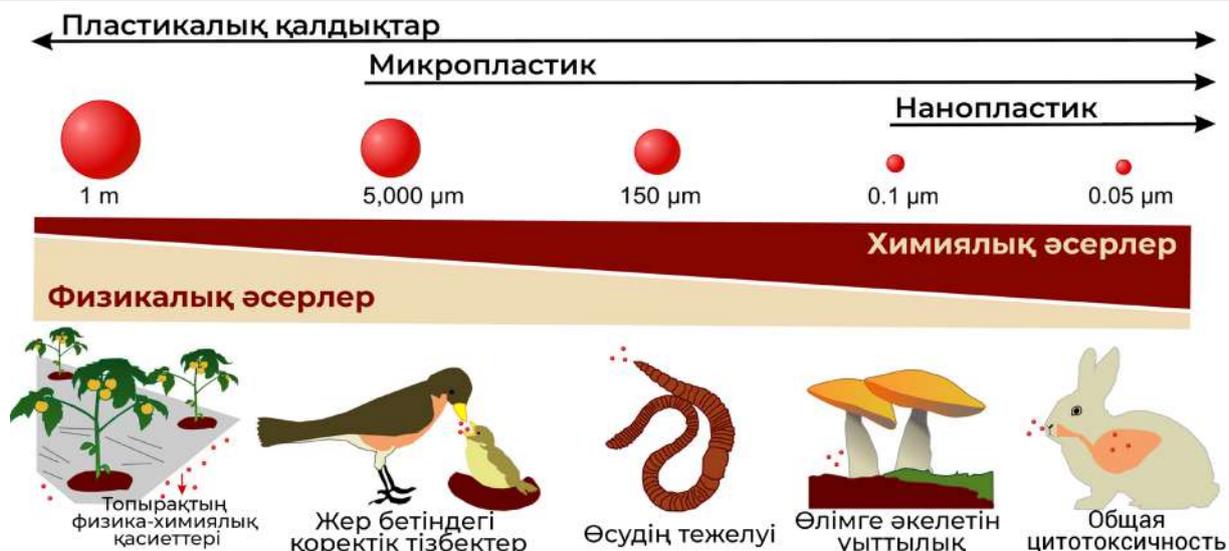
<sup>55</sup>Huang, S. et al. Plastic Waste Management Strategies and Their Environmental Aspects: A Scientometric Analysis and Comprehensive Review. *IJERPH* 19, 4556 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijerph19084556>

<sup>56</sup>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)

<sup>57</sup>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>

<sup>58</sup>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>

<sup>59</sup>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>

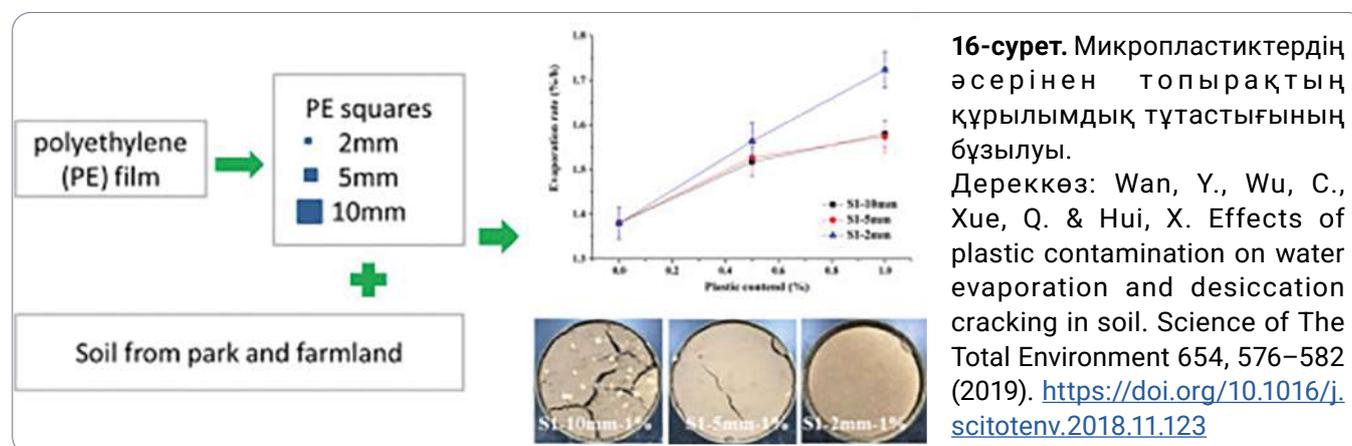


**15-сурет.** Микропластик біріктірілген физикалық немесе химиялық әсерлердің триггері (қоздырушысы) ретінде.

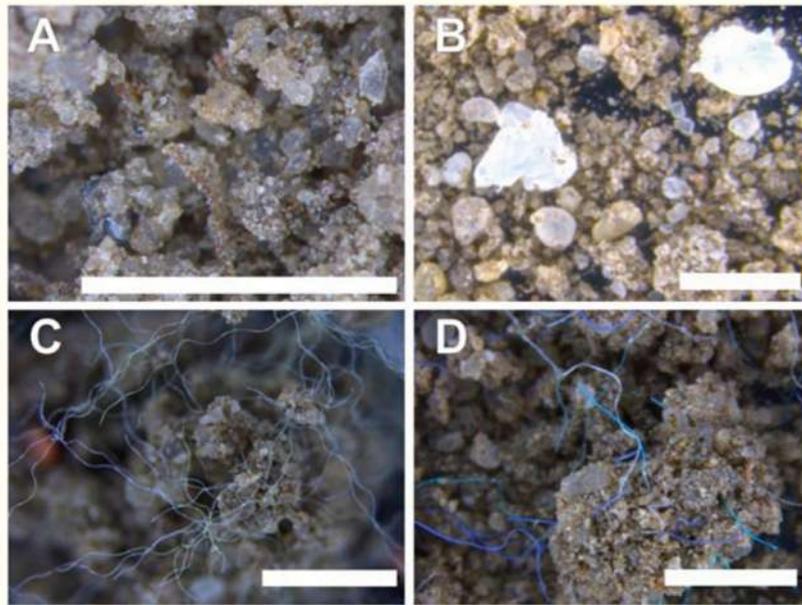
Топырақтың биогеохимиясы ауыл шаруашылығында мульчалау, жерүсті және құрлықтық құстардың оны тағам ретінде тұтынуы, жауынқұрттардың өсуінің төмендеуі, саңырауқұлақтар үшін өлімдік токсикалық әсері, сүтқоректілердің өкпе қабынуы және нанопластиктің кең таралған цитотоксикалық әсерімен байланысты.

Дереккөз: 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>

Қытай Ғылым академиясының зерттеу нәтижелері топырақта әртүрлі көлемдегі пластикалық пленкалардың болуы судың булану жылдамдығын айтарлықтай арттырғанын көрсетті. Әсіресе 2 миллиметрлік бөлшектер қосылған кезде әсері айқын байқалады. Ірі пластик фрагменттері (5–10 мм) топырақтың жарылуына алып келіп, оның құрылымдық тұтастығын бұзады. Бұл деректер пластикалық ластану топырақтағы су айналымын бұзатынын көрсетеді, бұл топырақ су тапшылығын нашарлатуы және ластаушы заттардың тік тасымалдануына әсер етуі мүмкін<sup>60</sup> (16-17-сурет).



<sup>60</sup>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>



**17-сурет.** Микропластик бөлшектерінің топырақтың биофизикалық ортасына интеграциясы.

Бақылау топырағының құрылымы (A) стереомикроскоп арқылы қарағанда полиамид шариктерімен ластанған топырақтан (SI S1D) визуалды түрде ерекшеленбеді. Полиэтилен фрагменттері (B) және полиэфирлі (C) немесе полиакрил талшықтары (D) топырақта визуалды түрде айқын көрінетін белгілер тудырды. Әр панельдегі ақ сызық 1 мм өлшемді көрсетеді.

Дереккөз: 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>

Зерттеулер пластиктің топырақ биотасына зиянды әсерін де растайды — бұл әртүрлі қауымдастық микроорганизмдерді (мысалы, бактериялар, саңырауқұлақтар) және фаунаны (микроскопиялық және макроскопиялық жануарларды) қамтиды. Бұл организмдер бір-бірімен, өсімдіктердің тамырларымен және қоршаған ортамен өзара әрекеттесіп, топырақтағы қоректік тізбектерді (18-сурет) құрайды, олар қоректік заттардың айналымы мен өсімдіктердің саулығы үшін қажет.

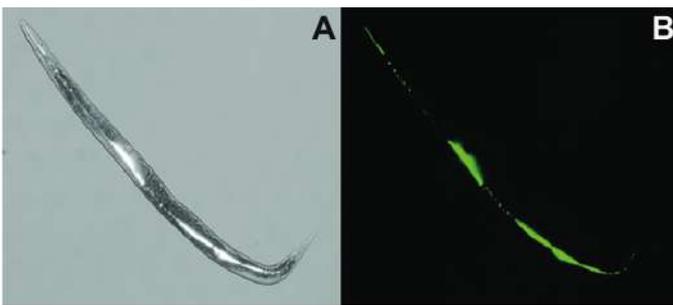


**18-сурет.** Топырақтың қоректік торларының түзілу процесінің схемалық көрінісі.

Дереккөз: 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>

Микропластикалық ластанудың биоиндикаторы ретінде жердегі биотаның әртүрлі түрлері қызмет етеді. Барлық үлгілерді талдау микропластикалық бөлшектердің және ықтимал улы элементтердің (Sb, As, Fe, Al, Se, Zn) әртүрлі концентрацияларда болуын<sup>61</sup> көрсетті, бұл микропластиктердің ықтимал улылығын көрсетеді<sup>62</sup>.

Зерттеулер көрсеткендей, полистирол моншақтары топырақ нематоды *Caenorhabditis elegans* арқылы жұтуы мүмкін (19-сурет); бұл сонымен қатар полистирол бөлшектерінің топырақтың қоректік тізбегінде жиналуы мүмкін екенін білдіреді<sup>63</sup>.



**19-сурет.** Жарық өрісіндегі (A) және флуоресценттік (B) кескіндер – 15 минут бойы 20 °C температурада 0,5 мкм өлшеміндегі сары-жасыл флуоресценциялы микросфераларды жинақтаған ересек *Caenorhabditis elegans* жұмырқұрты. Суреттер ×100 үлкейту кезінде түсірілген.

Дереккөз: 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>

Топырақ биотасы-бұл жай ғана «жердің биологиялық қозғалтқышы» емес, барлық жердегі экожүйелер тәуелді болатын көп функциялы жүйе. Оның планетадағы тіршілікті қамтамасыз етудегі рөлі мұхиттар мен атмосфераның функцияларымен салыстырылады, бұл топырақтанушылардың, экологтардың және климаттанушылардың зерттеулерімен расталады. Сондықтан уыттылықтан туындаған кез келген өзгеріс топырақтағы және қоректік тізбектегі көптеген маңызды процестерге әсер етіп, экологиялық теңгерімсіздікті тудыруы мүмкін<sup>64</sup>.

Мәліметтер шағын өлшемдері, үлкен меншікті ауданы, жоғары гидрофобтылығы және биодegradацияға<sup>65</sup> төзімділігі арқасында микропластиктердің топырақ беттеріне тез адсорбциялану қабілетін көрсетеді. Бұл оның ағзаларға оңай сіңуіне және оларда жиналуына ықпал етеді, бұл адам денсаулығына ықтимал қауіп төндіреді. Бұл процесс тек топырақ қабатымен шектелмейді, ол өзінің зиянды әсерін жалғастыратын өсімдіктерге таралады.

## Азық-түліктегі МНП

Антропогендік ластаушы заттар, әсіресе олар өсімдіктерге түскенде, экожүйеге айтарлықтай әсер етуі мүмкін. МНП өсімдіктерге сіңіп, олардың әртүрлі мүшелеріне таралатыны дәлелденген.

<sup>61</sup>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>

<sup>62</sup>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>

<sup>63</sup>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>

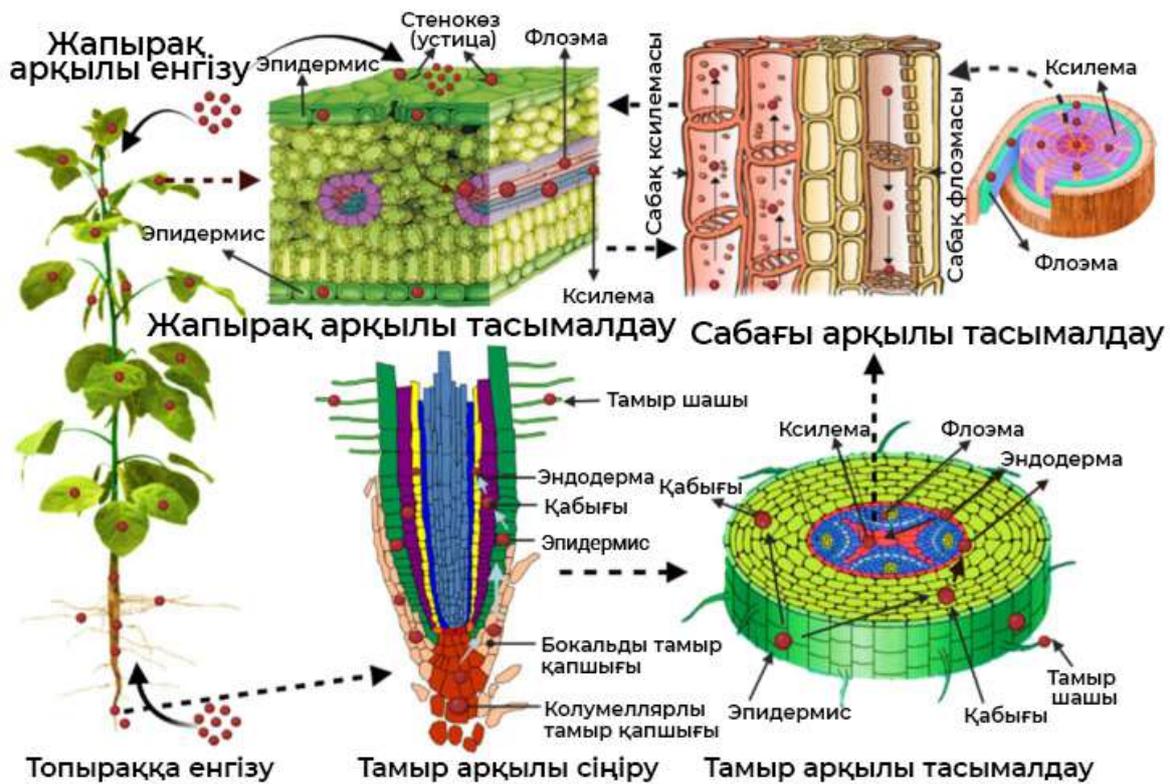
<sup>64</sup>Al Malki, J. S., Hussien, N. A., Tantawy, E. M., Khattab, Y. & Mohammadein, A. Terrestrial Biota as Bioindicators for Microplastics and Potentially Toxic Elements. *Coatings* 11, 1152 (2021). <https://doi.org/10.3390/coatings11101152>

<sup>65</sup>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>

Зерттеу деректері микропластиктің өсімдік жүйелерінде әртүрлі жолдармен жинақталып, өсімдіктерге, ауылшаруашылық дақылдарына және азық-түлік өнімдеріне жағымсыз әсер ететінін көрсетеді.

Нанопластик шағын өлшемдеріне байланысты өсімдік тініне тікелей еніп кете алады<sup>66</sup>. Өсімдіктер қоректік ортадан нанопластиктерді алады, содан кейін олар су мен қоректік заттарды тамырдан сабақтар мен жапырақтарға тасымалдайтын өткізгіш тамырлар жүйесі ксилема арқылы жер үсті бөліктеріне тасымалданады.

Жапырақтарға жиналған микропластиктер саңылауларға (устыца) еніп, тамырлы шоғырлар арқылы тамырларға тасымалдана алады. Микро- және нанопластик ауылшаруашылық өсімдіктерінің физиологиялық процестеріне және ферментативті белсенділігіне уытты әсер етеді<sup>67</sup> (20-сурет).



**20-сурет.** Өсімдіктердің микро- және нанопластиктерді сіңіру механизмдері.

Пластиктің топыраққа түскеннен кейін өсімдіктермен сіңірілу механизмі: тамыр арқылы сіңірілу, тамырдан сабаққа тасымал жолдары және сабақтан жапырақ пен жеміске тасымалы. Тамырдан тыс енгізу пластиктің жапырақ устыцаларына (саңылау) түсуін және кейін өсімдіктің басқа бөліктеріне тасымалдануын көрсетеді. Қатты көрсеткі (стрелка) пластиктің өсімдік үшін қолжетімділігін, ал нүктелі көрсеткі (стрелка) өсімдік ішіндегі тасымалды көрсетеді.

Дереккөз: 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>

<sup>66</sup>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>

<sup>67</sup>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>

Өсімдіктердің су тасымалдау жүйесі нанопластиктерді сабақтарға, жапырақтарға және мүмкін жемістерге жылдам тасымалдай алады. Темекі өсімдіктерін (*Nicotiana tabacum*) зерттеуде алынған мәліметтерге сәйкес, өлшемі 100 нм болатын нанопластик өсімдік жасушаларына енбейді, ал 20-дан 40 нм-ге дейінгі бөлшектер сәтті сіңіріледі<sup>68</sup>.

Сонымен қатар, кейбір пластикалық бөлшектердің қоректік заттардың иммобилизациясына немесе фотосинтез<sup>69</sup> процестеріне әсер ететін электростатикалық тартылыс салдарынан өсімдік тамырларына адсорбциясын күшейтетін өзіндік заряды бар. Теріс зарядталған микропластиктердің тамыр қабығына ену ықтималдығы жоғары<sup>70</sup>.

Пластикалық бөлшектермен ластануы жоғары агроэко- жүйелерде өсімдіктердің өсуі мен дамуының баяулауы байқалады<sup>71</sup>, сонымен қатар өну жылдамдығына және тамырдың дамуына қысқа мерзімді және өтпелі әсер етеді<sup>72</sup>.

Зерттеулер өнеркәсіптік және жергілікті түрде өндірілген коммерциялық қол жетімді балда микропластиктердің болуын растайды. Кейінгі талдаулар әртүрлі өсімдік түрлерінің гүлшоғырларында микропластиктердің кең таралғанын анықтады<sup>73, 74</sup>.

Соңғы жылдары бүкіл әлемде ара популяциясының жағдайы күрт нашарлады. Зерттеулер мұның бағаланбаған себептерінің бірі қоршаған ортаны микропластиктермен (МП) және нанопластиктермен (НП) ластау болуы мүмкін деп болжайды. Зерттеулер көрсеткендей, аралар ауадан, судан, өсімдіктер мен топырақтан микропластиктерді «жинап», содан кейін оларды ұяға қайтарады. Аралар өсімдіктерден шырындар мен тозаңдарды, сондай-ақ табиғи көздерден суды жинайды - олардың барлығында микропластиктер бар. Аралардың денелеріндегі түктер бөлшектер үшін «тұзақ» қызметін атқарады. Пластик бөлшектері аяқтарында да жиналады, әсіресе буындарында және сегменттер арасындағы бөліктерде — олар өсімдіктердің, топырақтың, судың бетімен және тіпті ара ұясының өзімен байланысады.



**«Бал арасы қоршаған ортаның ластануын анықтауға арналған өте жақсы биологиялық индикатор, себебі ол барлық жерде кездеседі, денесін жауып тұратын түктер арқылы ауадағы қоспалар мен бөлшектерді ұстай алады, ластаушы заттарға өте сезімтал, жоғары қозғалыс белсенділігіне ие және ұшу радиусы кең, тағы басқа қасиеттерімен ерекшеленеді.»<sup>75</sup>**

<sup>68</sup>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>

<sup>69</sup>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>

<sup>70</sup>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>

<sup>71</sup>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>

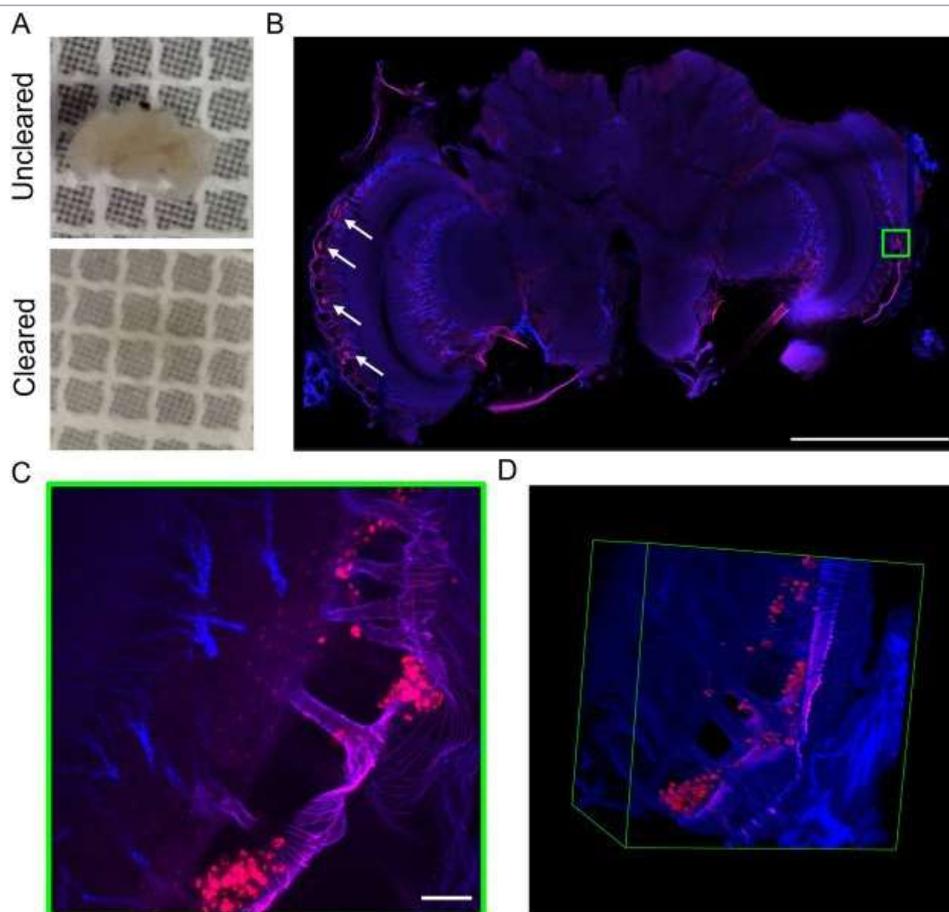
<sup>72</sup>Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P. & Vijver, M. G. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*. *Chemosphere* 226, 774–781 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.163>

<sup>73</sup>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>

<sup>74</sup>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>

<sup>75</sup>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>

Микро және нанопластик кутикула (дененің сыртқы қабығы) арқылы араның денесіне енеді. Араның денесіне енгеннен кейін пластикалық бөлшектер миға 3 күн ішінде жетіп, тамақ табу және навигация үшін өте маңызды есте сақтау, бағдарлау және когнитивті бұзылуларды тудырады<sup>76</sup>. Микропластиктердің миға әсері де есте сақтау қабілетін қалпына келтіру қабілетінің төмендеуіне әкеледі. Бұл өте маңызды, себебі аралар кеңістікте таныс бағдарлар арқылы бағыт алады. Аралардың миындағы нанопластик аралардың балшырын көздерінің қай жерде екенін есте сақтау қабілетін жоғалтуына, гүл иістеріне нашар әрекет етуіне және ұяға қайта оралуына жол бермейді. Мұндай когнитивті бұзылулар тозаңданудың тиімділігін тікелей төмендетеді және бүкіл колонияны тұрақсыздандыруы мүмкін<sup>76</sup>.



**21-сурет.** Бал арасының миында микропластиктің едәуір мөлшерін анықтау.

A) iDISCO әдісімен жарықтандырудан бұрын және кейінгі мидың диссекцияланған фотосуреттері.  
 B) Мидың толық 3D реконструкциясынан алынған бір оптикалық кескін (~200 мкм тереңдік), екіфотонды флуоресценттік микроскопия арқылы 10× объективпен алынған; ажыратымдылық – 0,51 × 0,51 × 2 мкм<sup>3</sup>. Көк түс – тіннің автофлуоресценциясы, қызыл – қызыл флуоресценциялы микропластик (ақ көрсеткіштермен көрсетілген). Масштаб: 1000 мкм.  
 C) B суретінде жасылмен бөлінген аймақтан жоғары ажыратымдылықтағы кірістіру, 63× объективпен алынған. Сурет 150 мкм тереңдіктегі стек сериясының максималды интенсивтілікті проекциясын көрсетеді, ажыратымдылық – 0,17 × 0,17 × 1 мкм<sup>3</sup>. Масштаб: 20 мкм.  
 D) C суретінде көрсетілген стек сериясының 3D визуализациясы. Өлшемдері: 170 × 170 × 150 мкм<sup>3</sup>.  
 Дереккөз: 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>

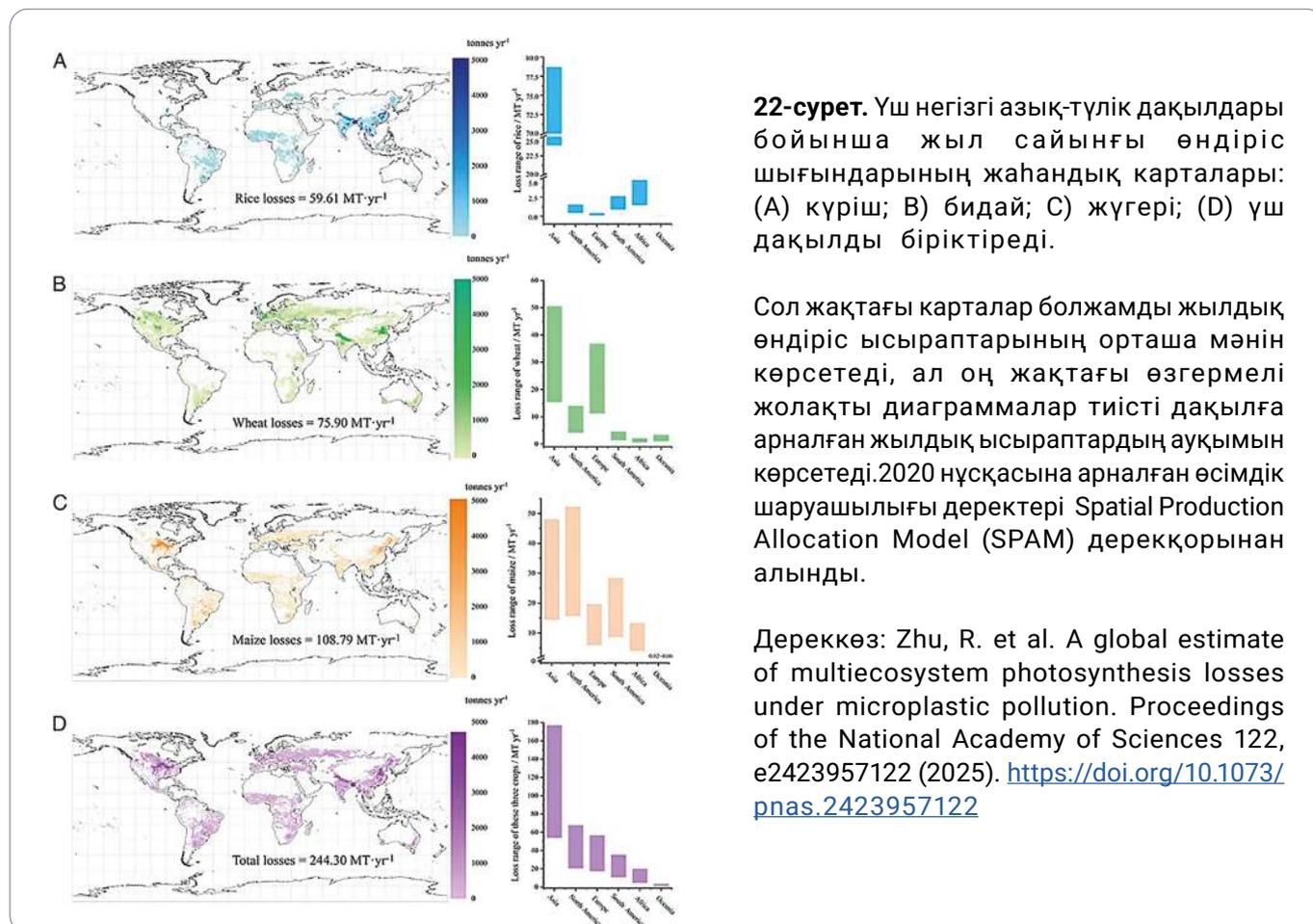
<sup>76</sup>Pasquini, E. et al. Microplastics reach the brain and interfere with honey bee cognition. *Science of The Total Environment* 912, 169362 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169362>

Ара ағзасына енген кезде нанопластик ішектің зақымдалуын, иммундық жүйенің әлсіреуін тудырады және вирустарға сезімталдықты арттырады, бұл пластиктің өткір уыттылығы болмаса да, аралардың өліміне әкелуі мүмкін<sup>75,77</sup>. Сонымен қатар, пластик фрагменттері араларда ғана емес, балда, балауызда және личинкаларда (дернәсіл) жиналады, бұл ұяның ішінде пластикалық ластанудың жабық циклін жасайды<sup>75</sup>.

**Бұл аралар үшін ғана емес, сонымен қатар азық-түлік қауіпсіздігі үшін де ауыр зардаптарға әкелуі мүмкін. Аралар – негізгі тозаңдандырғыштар, олардың әлсіреуі тікелей ауыл шаруашылығы дақылдарының өнімділігіне әсер етеді.**

Мидың зақымдануы, дене салмағының төмендеуі және иммунитеттің әлсіреуі тозаңдану белсенділігінің төмендеуіне әкеледі, бұл ғалымдардың ескертуінше, жаһандық азық-түлік өндірісінің дағдарысын ушықтыруы мүмкін<sup>77</sup>. Аралар ластанудың белсенді биоиндикаторлары ретінде әрекет етеді және қазірдің өзінде микропластиктер өндіріс еліне қарамастан балда айтарлықтай мөлшерде кездеседі<sup>78</sup>.

Сондай-ақ, МП әсері хлорофиллдің жалпы мөлшерін 5,63-17,42 % - ға төмендетеді, бұл әлемдік күріш, бидай және жүгері өндірісінің жоғалуына әкеледі. Мұндай шығын осы дақылдардың жалпы жылдық әлемдік өндірісінің 4,11-13,52 % құрайды, бұл азық-түлік қауіпсіздігіне айтарлықтай әсер етеді<sup>79</sup> (22-сурет).



<sup>77</sup>Sheng, 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).

<sup>78</sup>Al 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)

<sup>79</sup>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>

## Ормандар МНП жинақтаушылары ретінде

Талдау нанопластиктің тамырларда, сабақтарда, жапырақтарда және қылқан жапырақтарда барлық зерттелген концентрациялар мен уақыт аралықтарында бар екенін көрсетті. Тамырлардағы нанопластик концентрациясы жерүсті бөліктерге қарағанда кемінде 10 есе жоғары болды.

Пластикалық ластану мәңгі жасыл қылқан жапырақты және жапырақты ағаш түрлерінің жұмысына теріс әсер етеді, тотығу стрессін тудырады және фотосинтездің тиімділігін төмендетеді, бұл өсімдіктің баяу өсуіне және тіпті өліміне әкелуі мүмкін. Зерттеулер көрсеткендей, фотосинтез сатыларындағы бұзылулар артық жарық энергиясының жинақталуына әкеліп соғады, ол химиялық энергияға айналмай, фото тотығу стрессін тудырады және өсімдік ұлпаларына зақым келтіреді. Өсімдікті қорғау үшін фотоқорғаныс механизмдері іске қосылады, онда каротиноидтер артық энергияны жылу түрінде шашыратады<sup>80</sup>.

Фотосинтезді бұзу, тотығу стрессін тудыру және өсімдіктердің физиологиялық белсенділігін төмендету арқылы пластикалық ластану экожүйелердің климаттың өзгеруіне осалдығын арттырады. Бұл тұжырымдар өсімдіктер қауымдастығына пластикалық ластану әсерінің ауқымын көрсетеді, бұл өз кезегінде оның осы экожүйелерге тәуелді жердегі жануарларға әсері туралы сұрақтарды тудырады.

## Нанопластик фаунаны қалай бұзады

Көптеген зерттеулер қоршаған ортада, оның ішінде өсімдіктерде микро- және нанопластиктердің жинақталуы мал шаруашылығының дамуына әсер етіп<sup>81</sup>, азық-түлік тізбегі мен жануарлардың денсаулығына әсер ететінін көрсетті. Италиядағы сүт фермасында жүргізілген бақылаулар барлық райграсс шөп(бидай шөбі) үлгілерінде микропластиктің бар екенін көрсетті<sup>82</sup>. Үндістанда жүргізілген зерттеу сүт сиырларының рационндағы барлық үлгілерде 100 % полиэтиленерефталат микропластикінің ластанғанын анықтады, концентрациясы 89–326 г/кг аралығында болды<sup>83</sup>.

<sup>80</sup>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>

<sup>81</sup>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>

<sup>82</sup>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>

<sup>83</sup>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>

Талдау сиыр фолликулярлық сұйықтығында<sup>84</sup>, сүт<sup>85</sup>, қой нәжісі<sup>86</sup>, сиыр еті және қанда<sup>87</sup>, микропластиктердің болуын растады, бұл күйіс қайыратын жануарларға айтарлықтай әсер етеді. Мәліметтер бойынша, сойылған малдан, оның ішінде ешкі мен қой сияқты ұсақ малдардан алынған бөгде заттардың 50–60 пайызы пластикалық материалдар болып табылады<sup>88</sup>. Сонымен қатар, микропластиктер қалалық иттер мен мысықтардың<sup>89</sup> ішкі ұлпаларынан, үй үйректерінің<sup>90</sup> ішектерінен, шошқалардың өкпе тіндерінен табылған<sup>91</sup>.

Зерттеу деректері микропластиктің жануарларға зиянды әсері тек оның өзінен ғана емес, сонымен қатар оны өндіру кезінде қолданылатын қоспалар мен қоршаған ортадан сіңірілетін ластаушы заттар арқылы да болатынын көрсетеді. Бұл әртүрлі деңгейдегі зақымдануларға әкелуі мүмкін<sup>92</sup>. Бақылау нәтижелері микропластиктің жануарларда уытты әсерлерді тудыратынын көрсетеді. Оларға тотығу стрессі, ішек зақымдануы, иммундық жүйеге уытты әсері, сондай-ақ репродуктивтік және нейроуыттылық жатады<sup>93</sup> (23-сурет). Бұған қоса, микропластик ауыр металдар, антибиотиктер, тұрақты органикалық қосылыстар мен пестицидтер сияқты ластаушы заттардың тасымалдаушысы ретінде әрекет етеді, бұл экожүйелерге, жануарлар мен адам денсаулығына төнетін ықтимал қауіп-қатерді күшейтеді<sup>94</sup>.

<sup>84</sup>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>

<sup>85</sup>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>

<sup>86</sup>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>

<sup>87</sup>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>

<sup>88</sup>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>

<sup>89</sup>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>

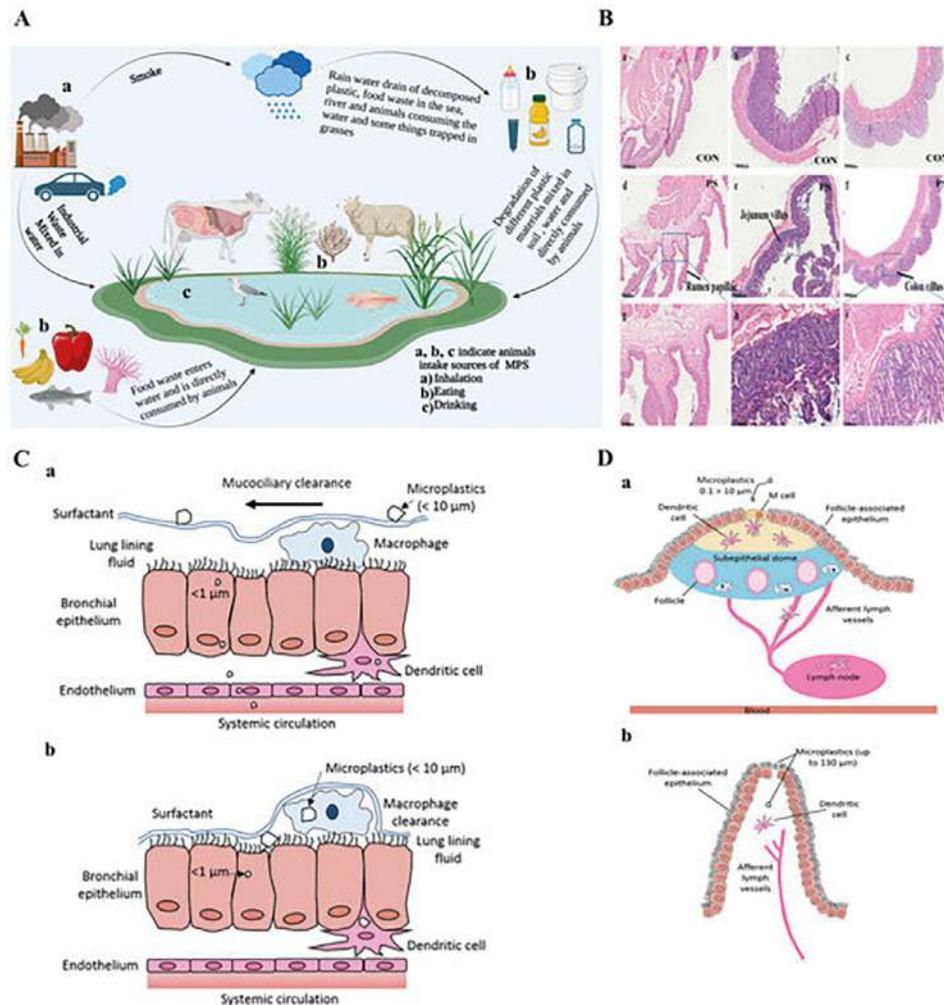
<sup>90</sup>Susanti, R., Yuniastuti, A. & Fibriana, F. The Evidence of Microplastic Contamination in Central Javanese Local Ducks from Intensive Animal Husbandry. *Water Air Soil Pollut* 232, 178 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05142-y>

<sup>91</sup>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>

<sup>92</sup>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>

<sup>93</sup>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>

<sup>94</sup>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>



**23-сурет. Микропластиктің жануарлар ағзасына түсу жолдары және оның асқазан-ішек жолына әсерін көрсететін схемалық көрінісі.**

(А) Микропластиктің (МП) жануарлар ағзасына түсу жолдары.

(В) Полистирол бөлшектерінің (ПС) әсері кезіндегі асқазан-ішек жолының жағдайы (экспозицияға дейін және кейін): Гематоксилін-эозинмен (Н&Е) боялған кескіндер: бақылау тобындағы (БТ) қарын (а), аш ішек (b) және тоқ ішек (c).

(d) Ұсақ өлшемді полистирол бөлшектері бар топтың қарынының Н&Е-кескіні (Ұсақ ПС).

(e) Ірі өлшемді полистирол бөлшектері бар топтың аш ішегінің Н&Е-кескіні (Ірі ПС).

(f) Ірі өлшемді полистирол бөлшектері бар топтың тоқ ішегінің Н&Е-кескіні (Ірі ПС).

(g–i) Тиісінше (d–f) суреттеріне сәйкес келетін жергілікті үлкейтілген кескіндер.

(С) Өкпеде микропластиктің (өлшемі 0,1–10 мкм) сіңірілуі мен шығарылуының ықтимал механизмдері:

(a) Жоғарғы тыныс жолдарында (өкпенің орталық бөлігінде), өкпе мембранасы қалың болғандықтан, өкпе сұйықтықтары (сурфактант пен шырыш) микропластиктің жылжуын азайтады. Өлшемі 1 мкм-ден үлкен бөлшектер кірпікшелі шырышты қабық арқылы шығарылып тасталады. 1 мкм-ден кіші бөлшектер эпителий арқылы сіңірілуі мүмкін.

(b) Егер микропластиктің аэродинамикалық диаметрі оның өкпенің терең бөліктеріне шөгуіне мүмкіндік берсе, ол өкпе сұйықтығының жұқа қабатынан өтіп, эпителиймен байланыса алады және диффузия немесе белсенді жасушалық жұтылу арқылы таралуы мүмкін.

(D) Асқазан-ішек жолынан (АІЖ) микропластиктің сіңірілуінің болжамды жолдары:

(a) Өлшемі 0,1–10 мкм микропластик АІЖ қуысынынан Пейер түйіндерінің жинақтаушы лимфа түйіндеріндегі М-жасушалар арқылы эндоцитоз жолымен сіңіріледі. М-жасушалар ішек қуығынан бөлшектерді іріктеп алып, шырышты қабықтың лимфоидты тініне тасымалдайды.

(b) Микропластик АІЖ қуығынан параклеткалық абсорбция арқылы сіңіріледі. Микропластик сияқты ыдырамайтын бөлшектер бірқабатты эпителийдегі әлсіз байланыстар арқылы астындағы тіндерге механикалық түрде енуі мүмкін. Дендритті жасушалар бұл бөлшектерді ұстап алып, оларды төменде орналасқан лимфа тамырлары мен веналарға тасымалдай алады. Бөлшектер бауыр, бұлшықет және ми сияқты екінші реттік тіндерге таралуы мүмкін.

Дереккөз: 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>

Бақылау деректері бойынша, жабайы жануарлар пластик қалдықтарын қателесіп азық деп қабылдайды. Бұл олардың ішегінде пластиктің жиналуына алып келеді. Зимбабве<sup>95</sup> мен Шри-Ланкада<sup>96</sup> ашық қоқыс үйінділерінен қоректенген пілдер қорытылмайтын пластиктен қаза тапқан. Жапониядағы Нара ұлттық паркінде жабайы бұғылар туристер қалдырған пластик қалдықтарын жұтып қойғаннан кейін пайда болған асқынулардан өлген<sup>97</sup>. Біріккен Араб Әмірліктерінде Дубай маңындағы 30 000-нан астам түйеге жүргізілген зерттеу нәтижесінде, жануарлардың шамамен 1 %-ы асқорыту жүйесінде жиналған пластик салдарынан қаза болғаны анықталды<sup>98</sup>. Ғалымдар «полибезоар» терминін енгізді — бұл пластик, жіп, қоқыс және тұзды шөгінділер сияқты қорытылмайтын заттардан құралған тығыз масса, ол күйіс қайыратын жануарлардың асқазаны немесе ішегінде тас тәрізді түзіліс (конкремент) түрінде пайда болады. Термин екі бөліктен тұрады: «поли» — (синтетикалық зат), «безоар» — (тасты түзіліс). Бақылау нәтижелері полибезоарлардың асқорыту жолының бітелуіне, бактериялардың көбеюінен туындайтын сепсиске, сусыздануға және азықтың жетіспеушілігіне әкелетінін дәлелдейді(24-сурет).



**24-сурет.** Дубай маңындағы шөлде өлі түйелердің ішінен табылған полибензоарлар. Жаңа зерттеу үшін талданған ең үлкенінің салмағы 64 кг (141 фунт) болды.

Дереккөз: 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>

<sup>95</sup>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>

<sup>96</sup>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>

<sup>97</sup>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>

<sup>98</sup>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>

## Планктоннан адамға дейінгі қоректік тізбектер арқылы микро- және нанопластиктердің (МНП) берілуі

Мұхиттағы пластиктің жиналуы теңіз экожүйелеріне айтарлықтай теріс әсер етеді. Соңғы қырық жыл ішіндегі ғылыми бақылаулар микропластиктің әлемнің барлық дерлік теңіз мекендеу орталарында кездесетінін анықтады<sup>99</sup>. Зерттеулердің нәтижесі бойынша, пластик қоқысы теңіздегі биоалуантүрлілікке қауіп төндіріп, оның ішінде киттәрізділер, ескекаяқтылар(ластоногие), теңіз құстары, тасбақалар, балықтар мен шаянтәрізділерді қоса алғанда, кемінде 690 түрге әсер ететіні расталған<sup>100</sup>. Пластикті жұту жануарларды қосымша уытты заттардың әсеріне ұшыратады. Пластик құрамындағы химиялық заттар тұтынылғаннан кейін ағзаға сіңіп, олжа организмдерінен жыртқыштарға дейін қоректік тізбектер арқылы беріледі. Оралып қалу немесе жұтып қою салдары өлімге әкелетін және өлімге жатпайтын жағдайларға байланысты өзгеріп отырады: қоректену бұзылыстары, ас қорыту мәселелері, азық жетіспеушілігі, аурулар, көбею қабілетінің төмендеуі, өсу қарқынының баяулауы және өмір сүру ұзақтығының қысқаруы сияқты әсерлер туындайды<sup>101</sup>. Микропластиктің ұсақтығының арқасында оны планктон сіңіреді, ал планктон – теңіздегі қоректік тізбектің негізгі буыны. Планктонды көптеген теңіз жануарлары тұтынады, ал оны тікелей жемейтіндер, планктонмен қоректенген ағзаларды жейді. Осылайша, микропластик қоректік тізбектерге енеді (интегралданады) (25–26-суреттер).

1999 жылы Тынық мұхитының солтүстік бөлігіндегі орталық айналым аймағында алынған беткі су үлгілерін талдау нәтижесінде, пластиктің массасы экожүйенің негізгі қорек көзі болып табылатын зоопланктонның массасынан алты есе көп екені анықталды<sup>102</sup>, бұл мұхиттағы тірі организмдерге қарағанда пластиктің басымдығын көрсетеді.

Бақылау деректеріне негізделген есептеулер микропластик концентрациясы балықтың өлшемі артқан сайын көбейетінін көрсетеді. Деректер ең ірі жануар – киттің тәулігіне 43,6 кг-ға дейін пластик жұтатынын айғақтайды, оның 98,5 %-ы тікелей судан емес, азық арқылы түседі, өйткені микропластик олжаның құрамында болады<sup>103</sup>.

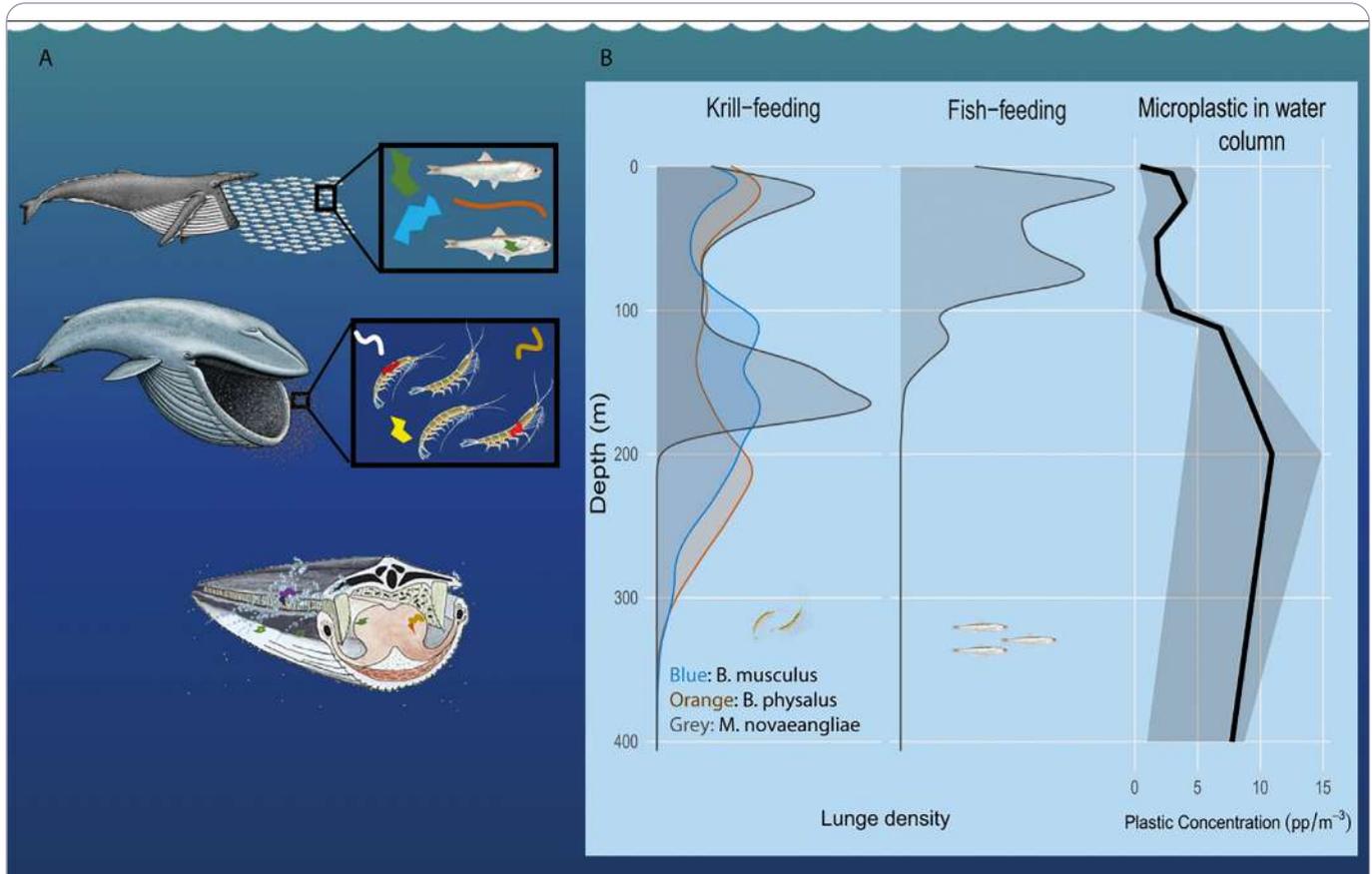
<sup>99</sup>Ivar Do Sul, J. A. & Costa, M. F. The present and future of microplastic pollution in the marine environment. *Environmental Pollution* 185, 352–364 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.036>

<sup>100</sup>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>

<sup>101</sup>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>

<sup>102</sup>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)

<sup>103</sup>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>



**25-сурет.** Судың қалың қабатындағы микропластиктің концентрациясына байланысты жолақты киттердің қоректену тереңдігі.

a – Киттер күн сайын жұтқан пластикті модельдеу келесідей жасалды: (i) бір күнде судан сүзгіленген пластик және (ii) бір күнде олжа арқылы тұтынылған пластиктің қосындысы ретінде. Пластик жұтудың ықтимал әсер ету қаупі төмен, орташа және жоғары деңгейлерде көрсетілген, өйткені кейбір айнаымалылар бойынша толық деректер жоқ;

b – Монтерей шығанағында орналасқан зерттеу нүктелерінің тереңдігі, Монтерей шығанағындағы пластик концентрациясының тереңдік профиліне сәйкес. Киттер мен олжа нысандары Алекс Боерсмой тарапынан көрсетілсе, ал қимадағы сүзу диаграммасын Жағалаулық зерттеулер орталығының өкілі Скотт Лэндри көрсеткен.

Дереккөз: 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>

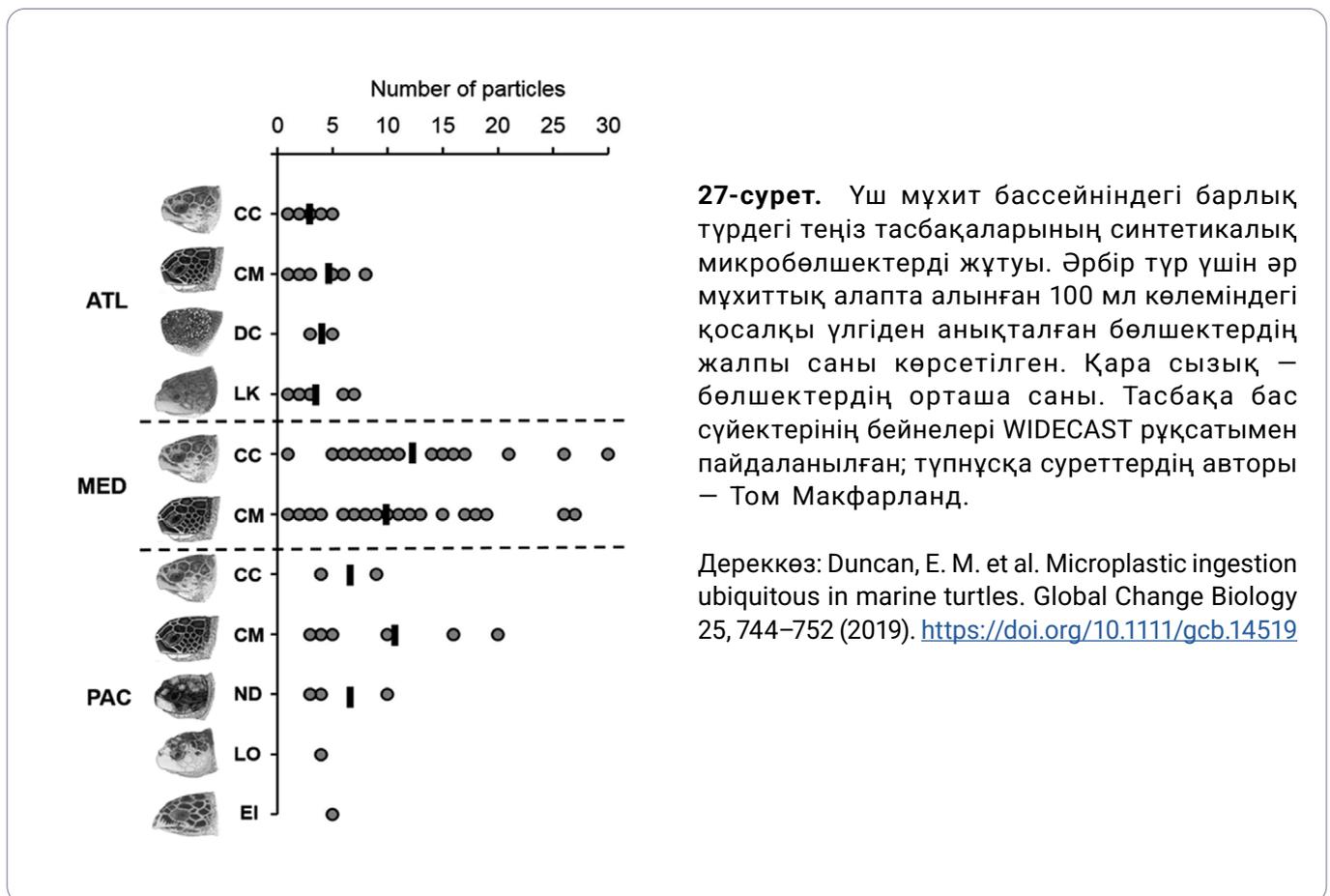


**26-сурет.** Пластиктің қоректік тізбектерге енуінің сызбалық бейнесі

## Пластик теңіз ағзаларын өлтіреді

Жыл сайын теңіз ортасының ластануы салдарынан шамамен 1 миллион теңіз құсы және 100 000 теңіз сүтқоректісі қырылады<sup>104</sup>. Бақылау деректері жұтылған қоқыс пен теңіз құстарының өлімі арасындағы байланысты растайды. 51 түрге жататын 1 733 құс дарасын зерттеу нәтижесінде 557 құстың (32,1 %) ішінен теңіз қалдықтары табылды — 1-ден 40-қа дейін зат, ең көп салмағы 3 340 мг және көлемі 3 621 мм<sup>3</sup> болды<sup>105</sup>.

Жеке деректер кейбір пластиктердің диметилсульфид деп аталатын химиялық затты шығаратынын көрсетеді — бұл зат теңіз құстары азықты тану үшін қолданатын иіс сигналын имитациялайды<sup>106</sup>. Жаңа зерттеулер көрсеткендей, пластикті жұту балапандарда бүйрек, бауыр мен асқазанның зақымдануына, сондай-ақ Альцгеймер ауруына ұқсас мидың бұзылыстарына алып келеді. Бұл факт пластикпен ластанудың теңіз фаунасына тигізетін жойқын әсерін айқын көрсетеді<sup>107</sup>. Үш мұхиттық алапта таралған барлық жеті түрге жататын тасбақалардың әр дарасынан синтетикалық бөлшектер табылған<sup>108</sup> (27-сурет).



**27-сурет.** Үш мұхит бассейніндегі барлық түрдегі теңіз тасбақаларының синтетикалық микробөлшектерді жұтуы. Әрбір түр үшін әр мұхиттық алапта алынған 100 мл көлеміндегі қосалқы үлгіден анықталған бөлшектердің жалпы саны көрсетілген. Қара сызық — бөлшектердің орташа саны. Тасбақа бас сүйектерінің бейнелері WIDECASrT рұқсатымен пайдаланылған; түпнұсқа суреттердің авторы — Том Макфарланд.

Дереккөз: 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>

<sup>104</sup>WWF-Australia. How many birds die from plastic pollution? <https://wwwf.org.au/blogs/how-many-birds-die-from-plastic-pollution>.

<sup>105</sup>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>

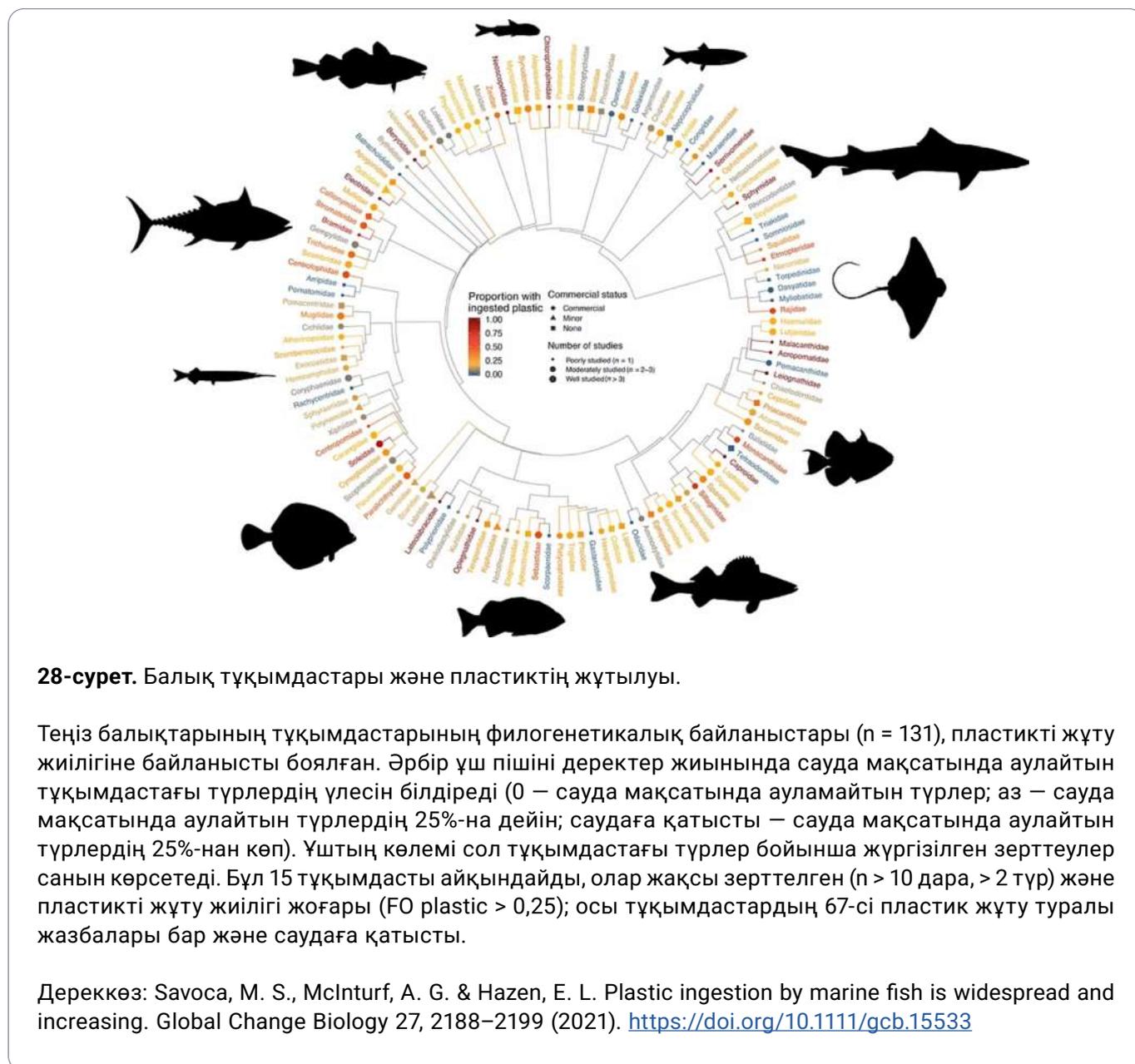
<sup>106</sup>Savoca, M. S., Wohlfeil, M. E., Ebeler, S. E. & Nevitt, G. A. Marine plastic debris emits a keystone infochemical for olfactory foraging seabirds. *Sci. Adv.* 2, e1600395 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600395>

<sup>107</sup>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>

<sup>108</sup>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>

Теңіз балықтарының 555 түріне жататын 171 774 балық дарасына жүргізілген зерттеулер нәтижесінде, 386 түрдің, оның ішінде 210 коммерциялық маңызы бар түрдің, пластик қоқысты жұтатыны анықталған<sup>109</sup>. Зерттеу деректеріне сәйкес, балықтар арасында микропластикті жұту жиілігі 26 % құрады, бұл көрсеткіш соңғы он жылда екі есеге артқан (28-сурет). Талдау нәтижесінде беткі сулардағы пластиктің мөлшері (29-сурет) мен оны теңіз организмдері тарапынан тұтыну деңгейі (30-сурет) арасында оң корреляция бар екені анықталған.

Зертханалық зерттеулер көрсеткендей, пластиктен бөлінетін қосылыстар балықтардың тіндеріне өтіп, олардың белсенділігін төмендетеді, бауыр қызметін бұзады, миға зақым келтіреді, сондай-ақ өсу қарқынын баяулатып, көбею қабілетін нашарлатады<sup>109, 110, 111</sup>.



<sup>109</sup>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>

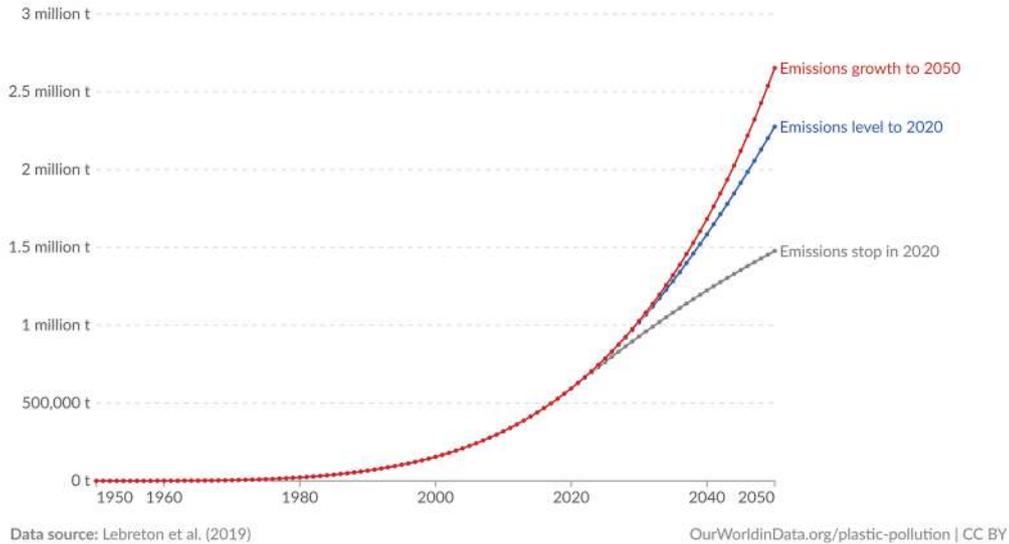
<sup>110</sup>Nanthini devi, K., Raju, P., Santhanam, P. & Perumal, P. Impacts of microplastics on marine organisms: Present perspectives and the way forward. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 48, 205–209 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2022.03.001>

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

## Microplastics in the surface ocean, 1950 to 2050

Our World  
in Data

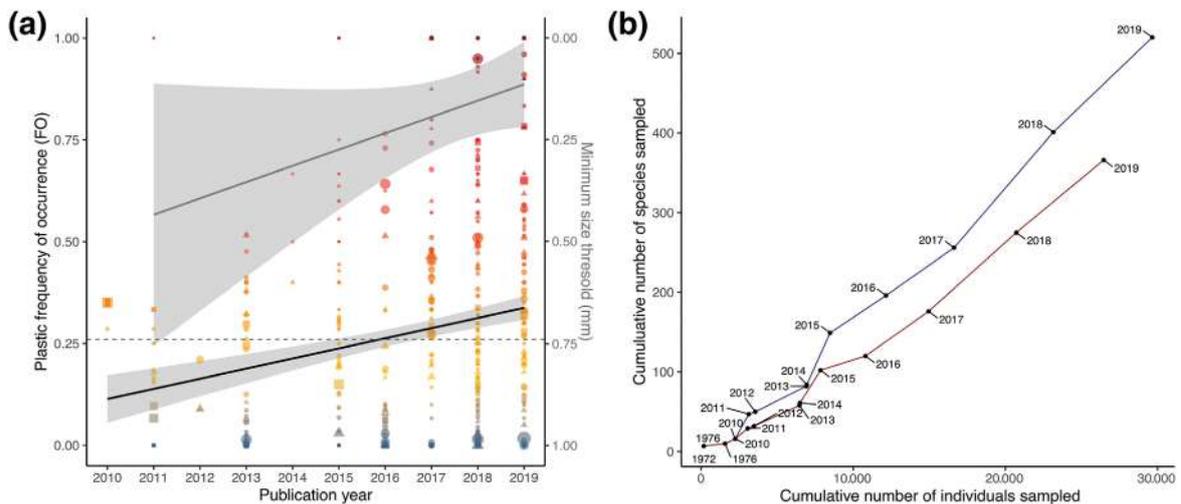
Microplastics are buoyant plastic materials smaller than 0.5 centimeters in diameter. Future global accumulation in the surface ocean is shown under three plastic emissions scenarios: (1) emissions to the oceans stop in 2020; (2) stagnate at 2020 rates; or (3) continue to grow until 2050 in line with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



**29-сурет.** Мұхит бетіндегі микропластик санының өсу графигі және 2050 жылға дейінгі болжамы

Дереккөз: <https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean> (қолданылған күні: 01.05.2025)

Деректер көзі: 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>



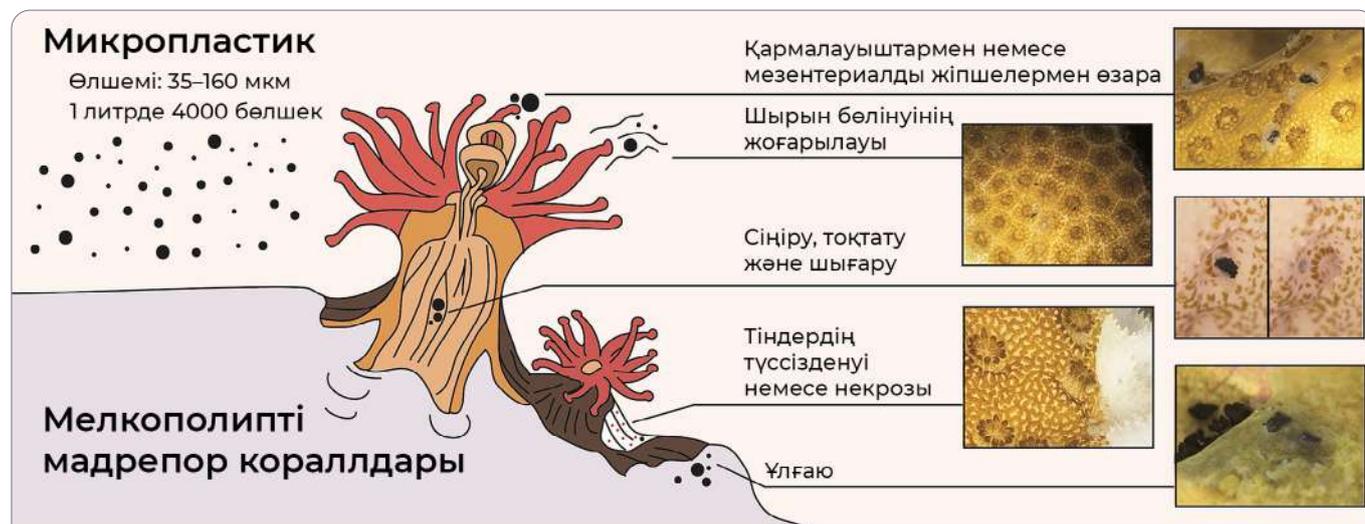
**30-сурет.** Балықтар тарапынан пластикті тұтынудың уақыт бойынша өзгеру үрдістері. (a) Жоғарғы сұр сызық 2011 жылдан бастап пластик бөлшектерінің ұсақталып бара жатқан үрдісін көрсетеді. Төменгі қара сызық 2010 жылдан 2019 жылға дейін барлық балық түрлері арасында пластиктің кездесу жиілігінің (FO) артқанын көрсетеді. Осы кезең ішінде пластикті тұтыну жиілігі жылына 2,4 % жылдамдықпен айтарлықтай өсті. Көлденең пунктирлі сызық FO 0,26 мәнін – әлем бойынша балықтарда пластикті тұтынудың орташа жиілігін – білдіреді. (b) Түрлердің жинақталу қисығы: көк сызық – уақыт өте келе зерттелген түрлердің жиынтық санын көрсетеді (пластик жұтқан да, жұтпаған да түрлерді қоса алғанда), ал қызыл сызық – тек пластик жұтқан түрлерді бейнелейді. Қызыл сызықтың асимптотаға жетпеуі алдағы жылдары пластикті жұтатын жаңа түрлердің әлі де анықталу ықтималдығы жоғары екенін көрсетеді.

Дереккөз: 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>

## Кораллдар қауіп астында: жаһандық масштабтағы микроқауіп

Пластикалық ластану кораллдар үшін күшейіп келе жатқан қауіпке айналуға: ол олардың қоректік тізбектеріне еніп, аурулардың таралуын үдетіп, риф қауымдастықтарының құрылымын бұзады. Жүргізілген талдау нәтижесінде зерттелген 84 рифтің 77-сінен антропогендік қалдықтар анықталды, олардың қатарында Тынық мұхитының орталық бөлігіндегі оқшауланған атоллдар да бар<sup>112</sup>. Алты түрдің бесеуінде денсаулыққа кері әсерлер тіркелген<sup>113</sup>, мысалы, тіндердің түссізденуі мен некрозы<sup>114</sup> (31-сурет).

Үлкенірек пластик фрагменттері аурулардың таралуына және физикалық зақымдарға ықпал етіп, кораллдардың патогендерге деген осалдығын күшейтеді<sup>115</sup>. Бұл әсерлер коралл колонияларының денсаулығын сақтауда маңызды рөл атқаратын қаңқалық микробиомға теріс ықпал етеді<sup>116</sup> (32-сурет). Зерттеулер сондай-ақ микропластиктің бетінде түзілетін «пластисфера» деп аталатын биоқабықшалар<sup>110</sup> коралл микробиомының дисбиозын тудыруы мүмкін екенін көрсетеді<sup>117</sup>. Пластикпен жанасқанда коралл ауруларының қауіпі 4 %-дан 89 %-ға дейін артады (33-сурет). Коралл рифтерінің жойылуы биоалуантүрліліктің айтарлықтай азаюына қатты әсер етеді, өйткені олар теңіз түрлерінің төрттен біріне тіршілік ету ортасын қамтамасыз етеді<sup>115</sup>.



### 31-сурет. Пластиктің коралл рифтерінің жағдайына әсері.

Кораллдар пластик бөлшектеріне әртүрлі тазарту механизмдері арқылы жауап бере алады (мысалы, кірпікшелердің қозғалысы, шырыш бөлу немесе тіндердің кеңеюі), бөлшектерді тіндердің өсуі арқылы ұстап қалуымен немесе қате жұтылған бөлшектерді шығаруымен.

Дереккөз: 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>

<sup>112</sup>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>

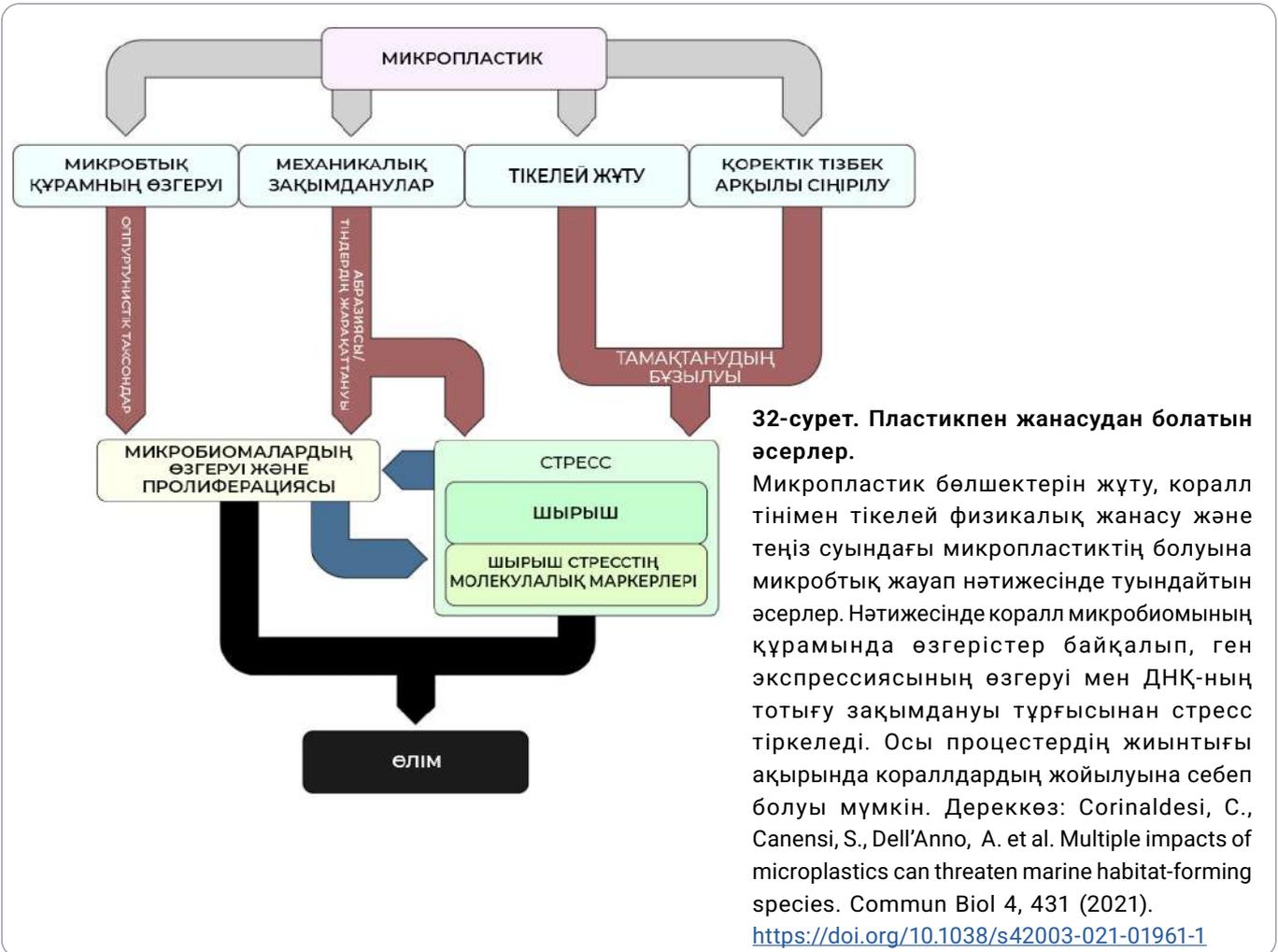
<sup>113</sup>Reichert, J., Schellenberg, J., Schubert, P. & Wilke, T. Responses of reef building corals to microplastic exposure. *Environmental Pollution* 237, 955–960 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.006>

<sup>114</sup>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>

<sup>115</sup>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>

<sup>116</sup>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>

<sup>117</sup>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>



## МНП-тің экожүйелердің оттегі балансына әсері

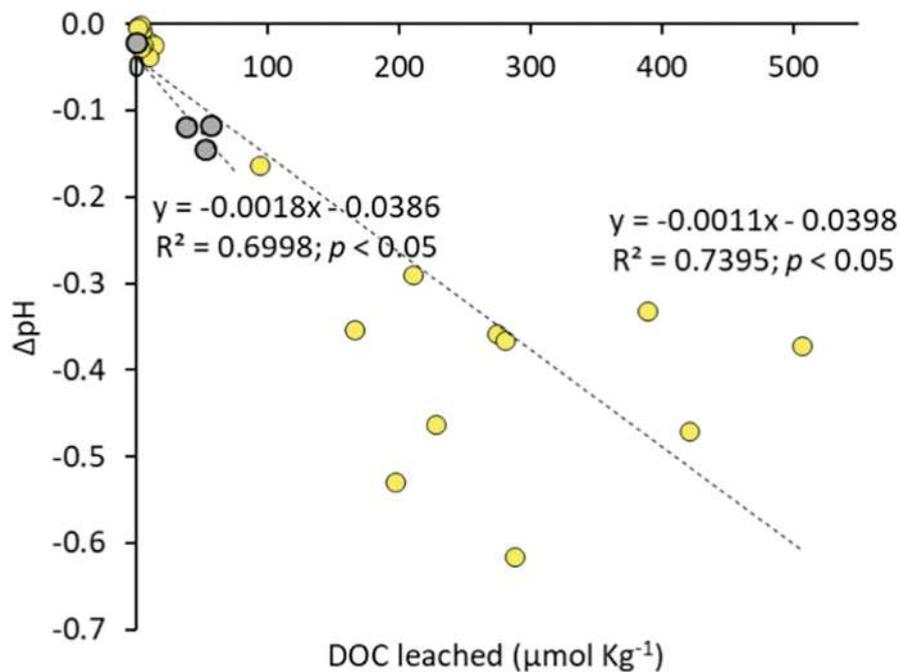
Бақылаулар қоршаған ортадағы пластик ең алдымен күн радиациясының әсерінен бұзылатынын көрсетеді. Бұл процесс оның химиялық құрамы мен құрылымын өзгертеді. Зерттеулер күн сәулесінің әсерінен туындайтын реакциялар еріген органикалық қосылыстардың шайылуын күшейтетінін, бұл теңіз суының биогеохимиясына әсер етіп, гетеротрофты бактериялардың өсуін ынталандыратынын растайды<sup>118</sup> (34-сурет).



Ұзақ мерзімді зерттеулер ыдыраған кезде пластиктен теңіз суына бөлінетін химиялық заттар материалдың өзінен немесе полимерге түс немесе тұрақтылық беру үшін қолданылатын қоспалардан келетінін көрсетеді. Бұл қосылыстардың кейбірі органикалық қышқылдар болып табылады, бұл олардың рН төмендетудегі рөлін түсіндіреді. Осылайша, пластик мұхиттың қышқылдануын арттырады (35-сурет), бұл өз кезегінде Жердің табиғи жүйелерінің жұмысын айтарлықтай бұзуы мүмкін<sup>119</sup>.

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

<sup>119</sup>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>

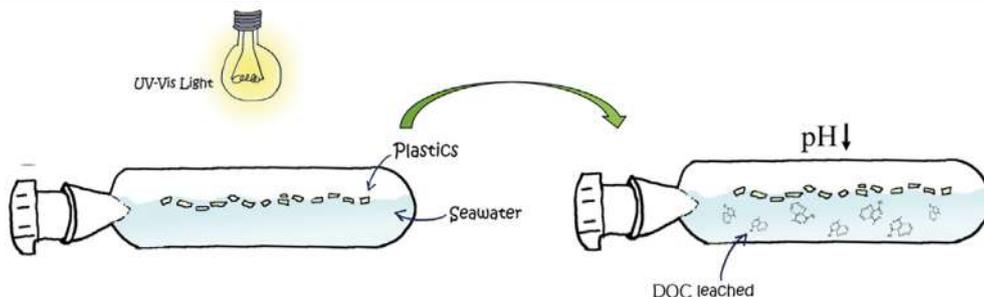


**35-сурет.** Пластиктен шайылып шыққан DOC пен pH өзгерістері арасындағы байланыстар барлық тәжірибелердегі әрбір жеке қайталама үлгі үшін графикте көрсетілген. Сондай-ақ әрбір тәжірибе үшін пластиксіз бақылау үлгілері де енгізілген. Сары нүктелер сәулелендірілген өңдеулерге, ал сұр нүктелер қараңғы жағдайдағы өңдеулерге сәйкес келеді.

Дереккөз: 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>



**«Осы зерттеудің арқасында біз мұхит бетінің пластикпен қатты ластанған аймақтарында пластиктің деградациясы pH деңгейінің 0,5 бірлікке дейін төмендеуіне әкелетінін дәлелдей алдық. Бұл XXI ғасырдың соңына қарай антропогендік шығарындылардың ең нашар сценарийлерінде болжанатын pH төмендеуімен салыстырмалы»,** — деп атап өтті Теңіз ғылымдары институтының (ICM-CSIC) ғылыми қызметкері Кристина Ромера-Кастильо (36-сурет)<sup>120</sup>.



**36-сурет.** Пластиктің шайылуы теңіз суының pH деңгейін 0,5 бірлікке дейін төмендетуі мүмкін.

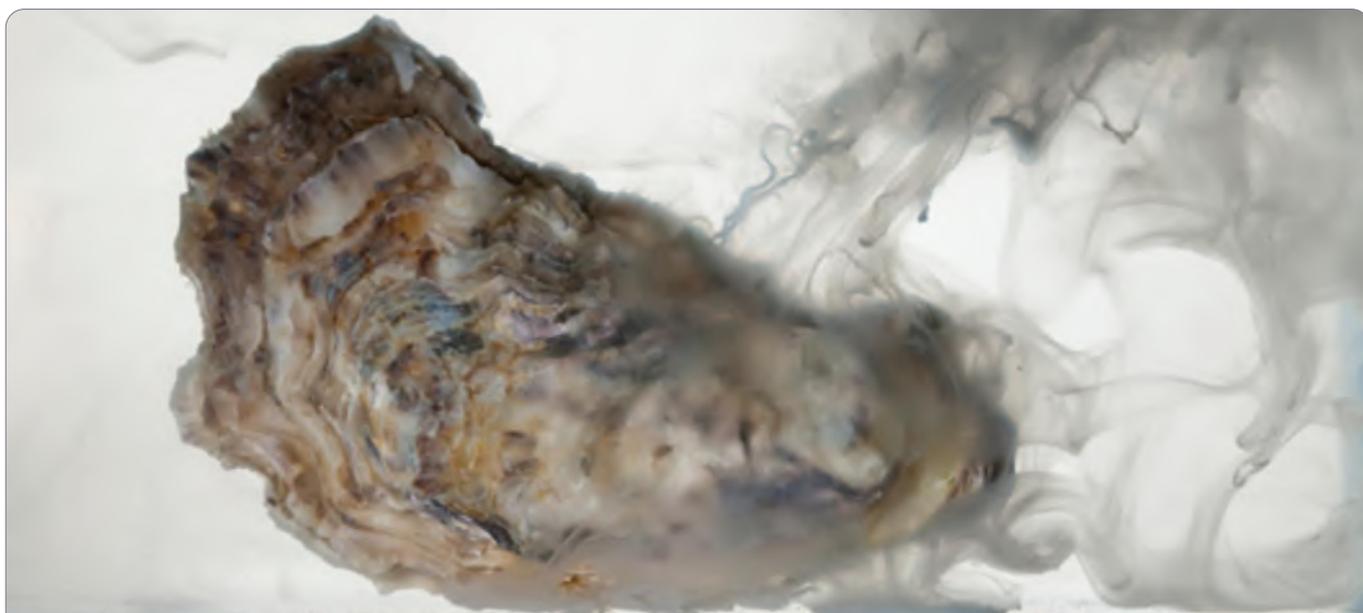
Дереккөз: Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

<sup>120</sup>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)

Мұхиттың қышқылдануы - теңіз ортасының бұзылуы, тұрақты және жоғарылайтын экологиялық қысым<sup>121</sup>. Экожүйелерге әсері ондаған жылдарға, ғасырларға және одан да ұзаққа созылады. Бақылаулар рН<sup>122, 123</sup> төмендеуіне байланысты жағалау жүйелеріндегі биоәртүрліліктің қысқаруын растайды. Бұл экожүйелердің тұрақтылығын төмендетеді, олардың тіршілік ету ортасын, қоректік заттардың айналымын және көміртекті сақтауды қоса алғанда, олардың функцияларына қауіп төндіреді<sup>123</sup>.

Зерттеулер көрсеткендей, мидиялар (*Mytilus edulis*) мұхиттың қышқылдануы кезінде баяу өседі және нашар өмір сүреді (37-сурет). Бұл олардың санын азайтады, бұл олардың суды сүзу және жағалаудағы қоршаған ортаның сапасын сақтау қабілетін төмендетеді<sup>124</sup>.

Ағымдағы мұхит бетіндегі рН мәндері кем дегенде соңғы 26 000 жыл<sup>125</sup> ішінде бұрын-соңды болмаған. Бұл процесс бірегей түрлерге тәуелді маржан рифтеріне, терең теңіз және биік ендік экожүйелеріне айтарлықтай әсер етеді. Бұл түрлер алмастырылмайтын рөл атқарады және олардың жоғалуы экожүйенің негізгі функцияларын бұзады, өйткені алмастырғыштар жоқ<sup>126</sup>.



**37-сурет.** Тынық мұхиттық устрица Орегон штатындағы Whiskey Creek устрица питомнигінде лайланған шәует(сперма) бөледі. Кейбір жағалаулық суларда қышқылдану деңгейі қазірдің өзінде айтарлықтай жоғарылап кеткен; бұл жерде ол устрица дернәсілдерінің өсуін баяулатып, өндірісті екі есе қысқартты.

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

<sup>121</sup>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>

<sup>122</sup>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>

<sup>123</sup>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=8yjNFxkALjIC&pg=PA192>

<sup>124</sup>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>

<sup>125</sup>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).

<sup>126</sup>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=8yjNFxkALjIC&pg=PA192>

Устрица мен мидия саны карбонатпен қанығу деңгейінің төмендеу градиенттері бойында айтарлықтай азаяды. Мұхиттың қышқылдануы устрицалар санының қысқаруына және олардың табиғи ортада көрсететін экожүйелік қызметтерінің төмендеуіне әкелуі мүмкін; сондай-ақ бұл олардың теңіз өнімдері ретіндегі сапасына да кері әсер етуі ықтимал.

Зерттеулер микропластиктердің микробалдырлардың биологиялық параметрлеріне, соның ішінде өсуіне<sup>127</sup>, хлорофилл құрамына, фотосинтетикалық белсенділігіне және реактивті оттегі түрлерінің деңгейіне айтарлықтай теріс әсерін растайды<sup>128, 129</sup>.

Зерттеуге сәйкес, МП экспозициясы теңіз және тұщы су балдырларында фотосинтездің жаһандық 7,05 – 12,12% төмендеуіне әкеледі<sup>130</sup>. Фотосинтез атмосфераға шығарылатын молекулалық оттегін (O<sub>2</sub>) түзетін Жердегі негізгі процесс екені белгілі.

Сонымен қатар, теңіз шөгінділеріндегі микропластиктер микробтық қауымдастықтарды өзгертеді және азот циклін бұзады, бұл улы балдырлардың гүлденуі сияқты адам тудыратын мәселелерді ушықтыруы мүмкін. Мұхит бетіндегі планктон қауымдастықтарындағы өзгерістер деоксигенацияны (судағы оттегінің төмендеуі) күшейтіп, теңіз организмдерін оттегінен айыруы мүмкін<sup>131</sup>.

Деректер 1960 және 2010 жылдар аралығында мұхит су температурасының көтерілуіне және ластаушы заттардың, соның ішінде өнеркәсіптік, тұрмыстық және ауылшаруашылық ағындарының жиналуына байланысты еріген оттегінің 2% жоғалтқанын көрсетеді<sup>132</sup>. Оттегінің азаюы өлі аймақтардың – теңіз флорасы мен фаунасы дерлік жойылған мұхит аймақтарының пайда болуына әкеледі. Бақылаулар көрсеткендей, 1960 жылдары дүниежүзілік мұхиттарда 45 өлі аймақ болса, 2011 жылға қарай олардың саны шамамен 700-ге дейін өсті<sup>133</sup>. UNDP сайтында жарияланған мәліметтерге сәйкес, өлі аймақтардың саны 1960 жылдардан бері әр онжылдықта екі есе өскен. Осы үрдіске сүйене отырып, олардың саны 2025 жылға қарай 1500-ге жетуі ықтимал<sup>134</sup>.

Пластикпен ластану Жер жүйесіндегі көптеген процестерге әсер етеді. Зерттеуге сәйкес, ол биоәртүрліліктің жоғалуы және климаттың өзгеруі сияқты өзекті экологиялық мәселелерді ушықтыруы мүмкін<sup>135</sup>.

<sup>127</sup>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>

<sup>128</sup>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>

<sup>129</sup>Sarkar, P., Xavier, K. A. M., Shukla, S. P. & Rathi Bhuvanewari, 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>

<sup>130</sup>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>

<sup>131</sup>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 May 1, 2025)

<sup>132</sup>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>

<sup>133</sup>The International Union for Conservation of Nature (IUCN). Ocean deoxygenation. <https://iucn.org/resources/issues-brief/ocean-deoxygenation> (Accessed May 1, 2025)

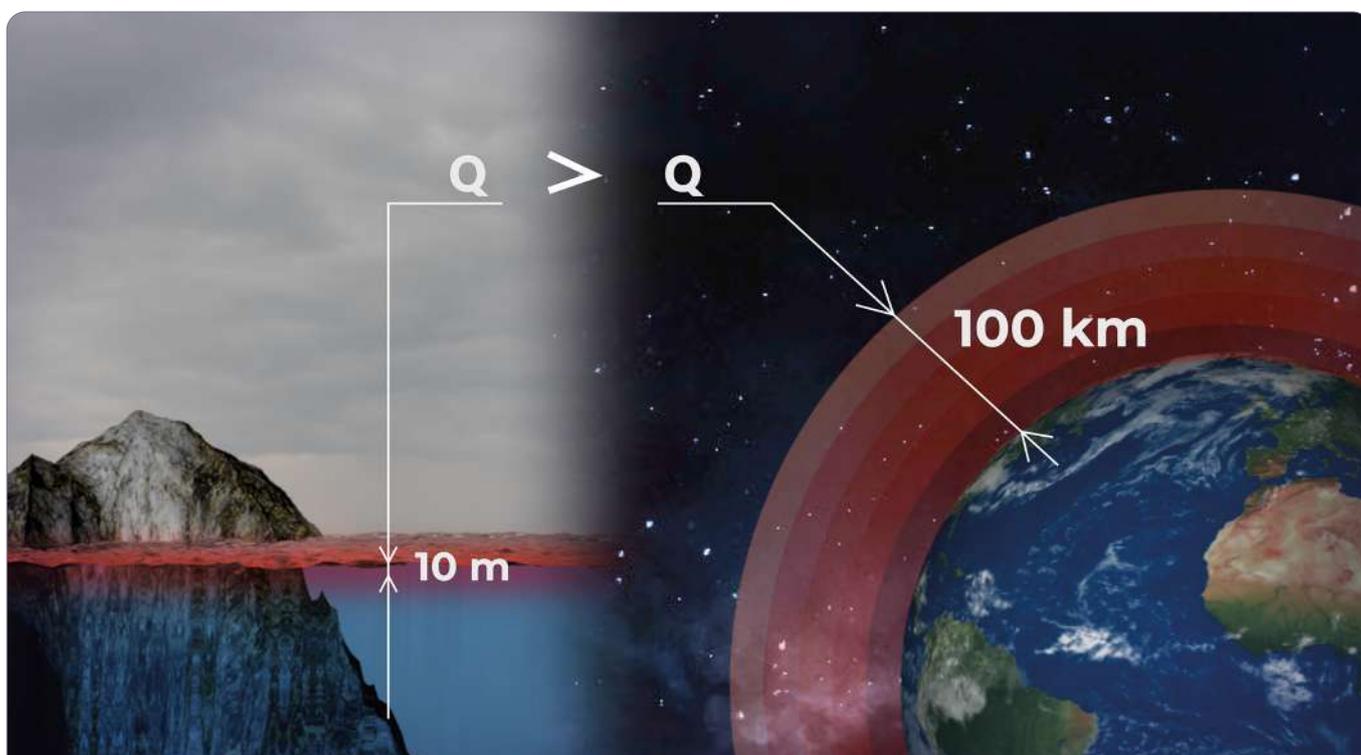
<sup>134</sup>United Nations Development Programme. Ocean hypoxia: Dead zones. <https://www.undp.org/publications/issue-brief-ocean-hypoxia-dead-zones> (Accessed May 1, 2025)

<sup>135</sup>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>

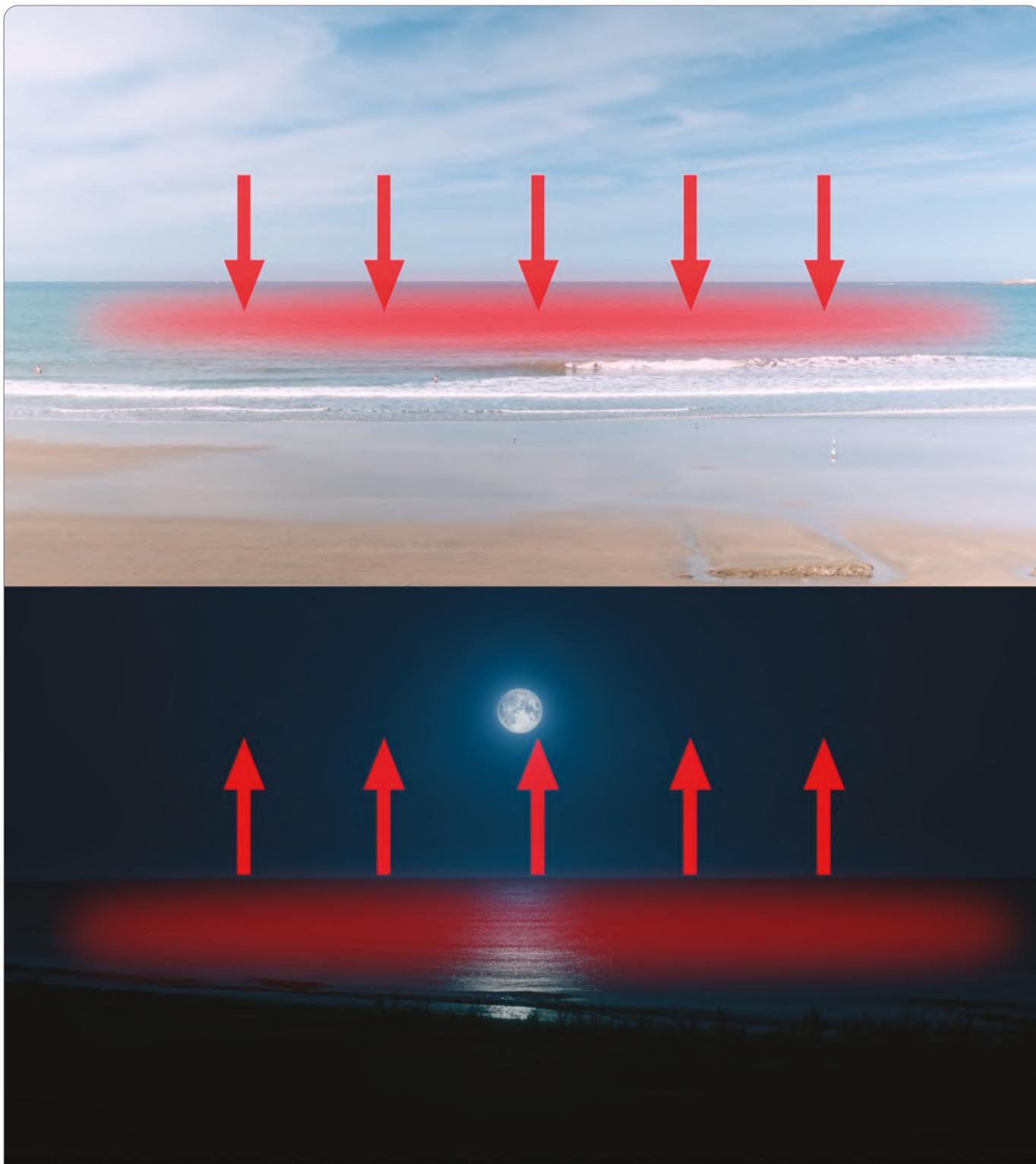
## МНП-ТІҢ КЛИМАТҚА ӘСЕРІ

### Мұхиттың функциялары

Мұхит табиғи «кондиционер» қызметін атқара отырып, планетаның климаттық тепе-теңдігін сақтауда шешуші рөл атқарады. Оның жылуды жинақтау және бірте-бірте шығару қабілеті планетадағы температура ауытқуларын қалыпты ұстауға көмектеседі. Мұхит суының он метрлік қабаты ғана Жердің бүкіл атмосферасынан көбірек жылуды сіңіре алады (38-сурет). Бұл күндізгі және түнгі уақыттағы (39-сурет), сондай-ақ жаз бен қыс сияқты маусымдық температура ауытқуларын азайтады.



**38-сурет.** Мұхит пен атмосфераның салыстырмалы жылу сыйымдылығын көрсететін сызбалық бейне: ауа массасы аз болса да, мұхит он есе артық жылуды жинақтап ұстай алады және Жер климатының реттелуінде негізгі рөл атқарады

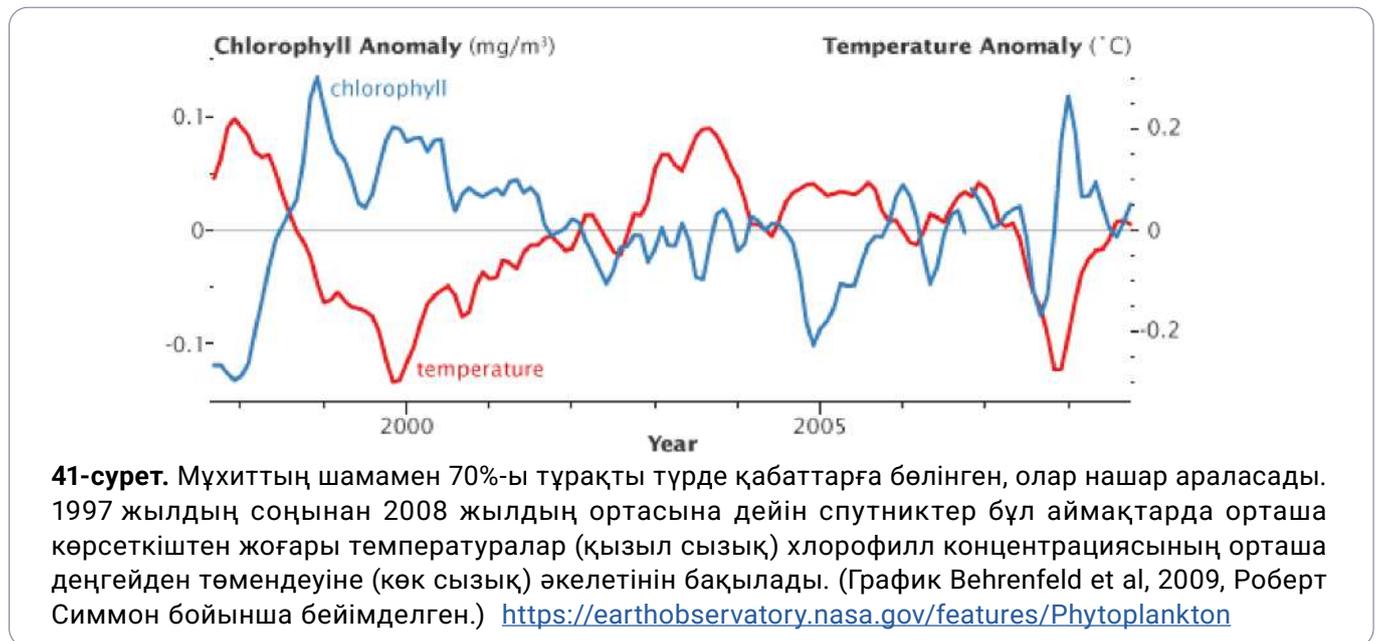


**39-сурет.** Күнделікті жылу алмасуды көрсететін сызба: мұхит күндіз жылуды сіңіріп, түнде қайтарады, ауа температурасының ауытқуларын теңестіреді

Мұхит ағындары жылы суды тропиктерден солтүстік ендіктер сияқты суық аймақтарға тасымалдайды. Бұл жағалаудағы аймақтардағы климатты қалыпты ұстауға көмектеседі. Суық ағындар, керісінше, салқындаған суды қайтадан экваторға қайтарады. Осылайша, мұхит планетадағы климатты реттейді.

Мұхит атмосфералық процестерге айтарлықтай әсер етеді, бұлттардың пайда болуында және жауын-шашында негізгі рөл атқарады. Күн сайын оның бетінен көп мөлшерде су буланып, кейін бұлттарға айналады және жаңбыр немесе қар болып Жерге оралады. Бұл процестің өзендердің, көлдердің және топырақтың су қорын тұщы сумен толықтыру үшін маңызы зор.

Мұхиттағы микроскопиялық балдырлар, мысалы, фитопланктон (40-сурет) оттегінің 50%-дан астамын шығарады<sup>136</sup>. Мұхит химиясы мен биологиясының көптеген үлгілері атмосфералық парниктік газдардың көбеюіне жауап ретінде мұхит беті жылынған сайын фитопланктондардың өнімділігі төмендейді деп болжайды<sup>137, 138</sup> (41-сурет).



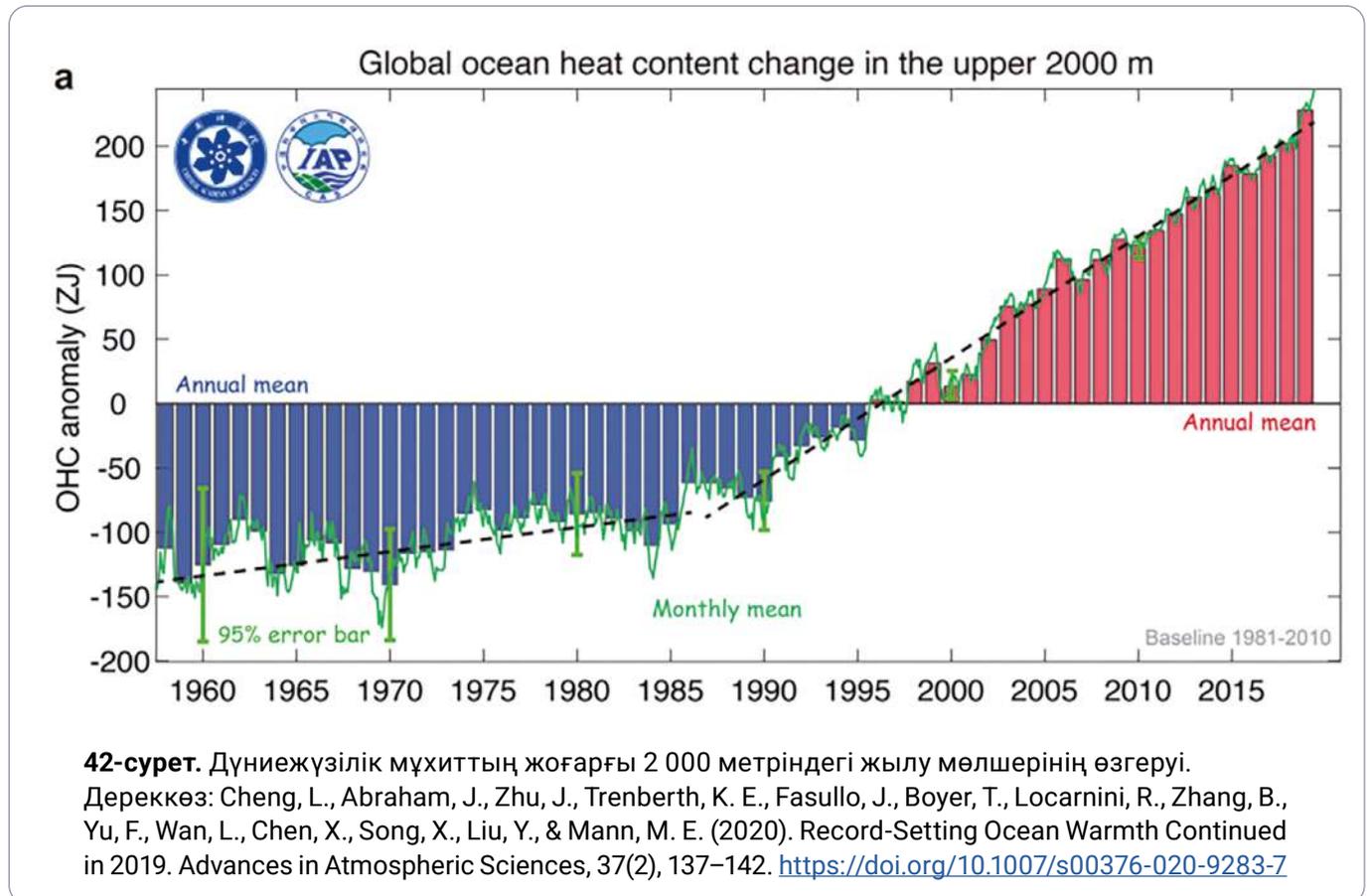
<sup>136</sup>NOAA. How much oxygen comes from the ocean? <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-oxygen.html> (Accessed May 1, 2025)

<sup>137</sup>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>

<sup>138</sup>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>

## Мұхит температурасының өзгеруі

2024 жылғы Дүниежүзілік мұхиттың жағдайы туралы баяндама алаңдататын жағдайды көрсетеді — мұхиттың бұрын-соңды болмаған жылынуы. Зерттеулер 1960 жылдан 1986 жылға дейін мұхит температурасының тұрақты түрде өскенін көрсеткен. Алайда соңғы бірнеше онжылдықта бұл процесс екі есе жылдамдады<sup>139</sup> (42-сурет).



2023 жыл бақылау тарихындағы ең жылы жыл болды, 2016 жылы орнатылған алдыңғы рекордты бұзып өтті. Сондай-ақ мұхит бетінің температурасы бойынша абсолюттік рекорд тіркелді<sup>140</sup>. Бұл үрдіс жалғасты — 2024 жыл 2023 жылғы рекордтарды жаңартып (43-сурет) бақылау тарихындағы ең жылы жылға айналды<sup>141</sup>. Осы кезеңде теңіз бетінің температурасы 15 ай қатарынан рекордтық деңгейде сақталды, бұл байқалған жылынуудың тұрақтылығын көрсетеді.

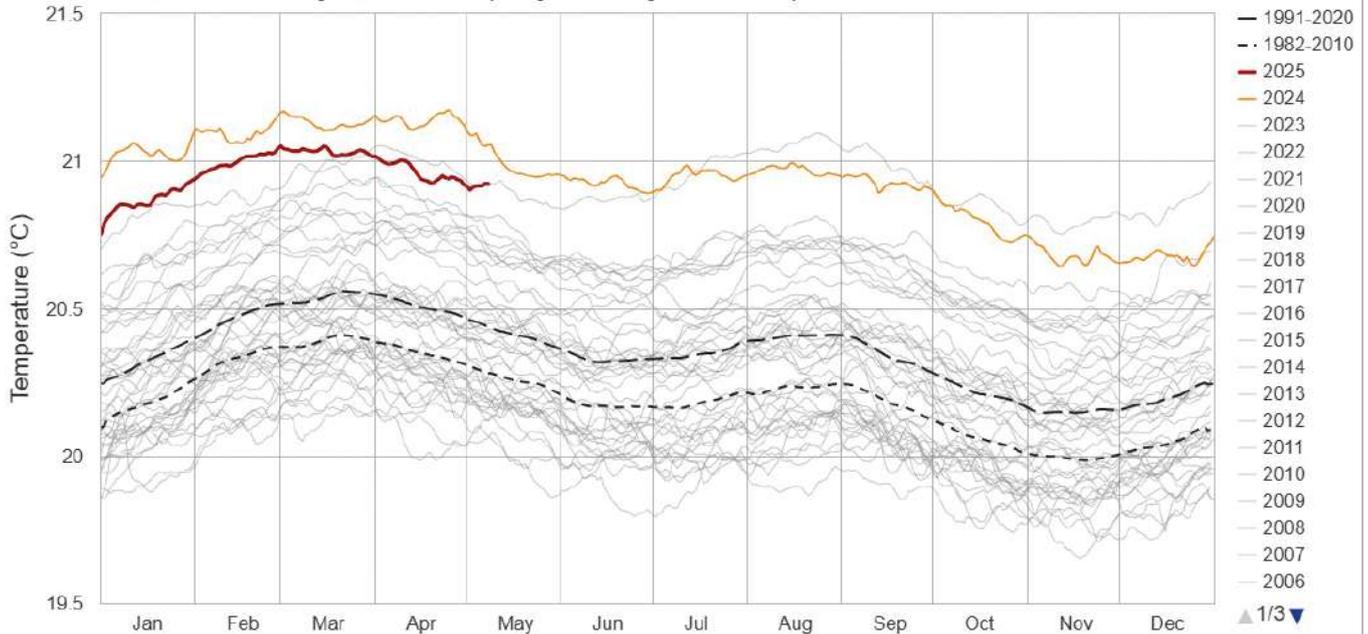
<sup>139</sup>Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J. et al. Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Adv. Atmos. Sci.* 37, 137–142 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

<sup>140</sup>NOAA. 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)

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

### Daily Sea Surface Temperature, World (60°S–60°N, 0–360°E)

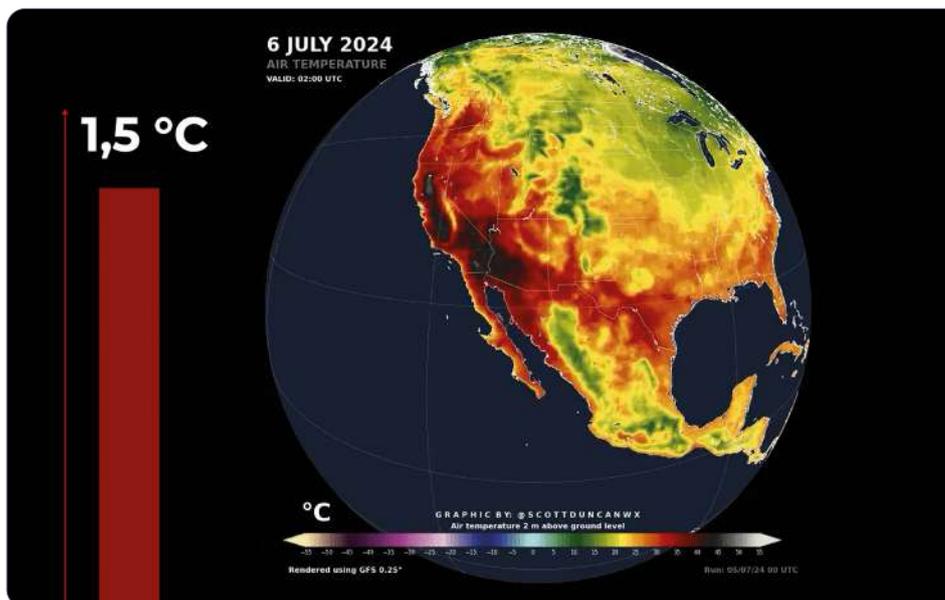
Dataset: NOAA OISST V2.1 | Image Credit: ClimateReanalyzer.org, Climate Change Institute, University of Maine



**43-сурет.** Теңіз бетінің тәуліктік температурасы: Жылдардағы маусымдық өзгерістерді көрсететін мұхиттың жоғарғы температурасының өзгеруінің графикалық көрінісі

Дереккөз: NOAA OISST V2.11 Image Credit: [ClimateReanalyzer.org](https://climate.reanalyzer.org), Climate Change Institute, University of Maine [https://climate.reanalyzer.org/clim/sst\\_daily/?dm\\_id=world2](https://climate.reanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2)

Тарихта алғаш рет жылдық орташа температура индустрияға дейінгі кезең деңгейінен 1,5 °C жоғары болды<sup>142</sup> (44-сурет). Сарапшылардың пікірінше, бұл көрсеткіш адамзат үшін масштабты климаттық құбылыстардың күтілетін сыни шекарасы болып табылады<sup>143</sup>.



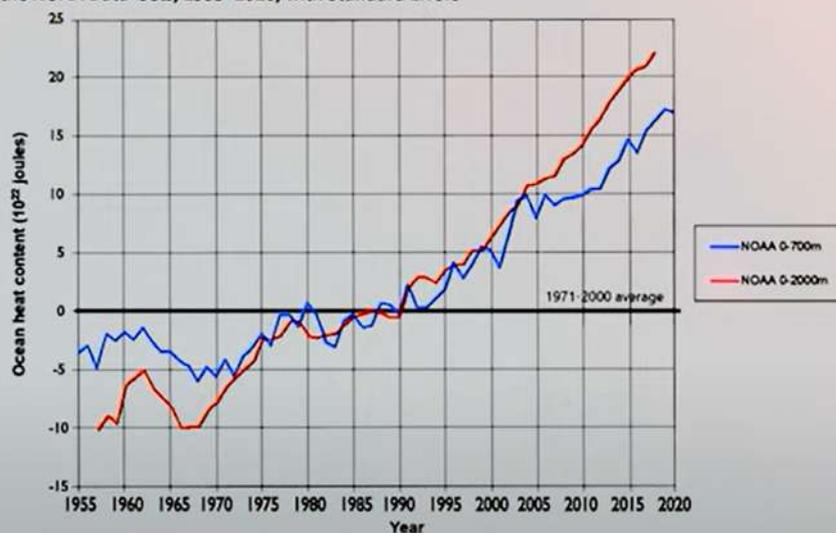
**44-сурет.** Климаттық шекараны көрсететін сызбалық бейне: 2024 жылы жылдық орташа ғаламдық температура индустрияға дейінгі деңгейден алғаш рет 1,5 °C шегінен асты

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

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

Температураның бұл көтерілуі 21 ғасырдың ортасына қарай күтілуде<sup>144</sup>, бірақ бұл шек әлдеқашан асып кетті. Біріккен Ұлттар Ұйымының бағалауы бойынша, егер қазіргі тенденциялар сақталатын болса, осы ғасырда жаһандық температура шамамен 3°C-қа көтерілуі мүмкін<sup>144</sup>.

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



Data source: NOAA data portal: [www.nodc.noaa.gov/OC5/3M\\_HEAT\\_CONTENT](http://www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT).

**45-сурет.** 700 метрден жоғары және 2000 метрден жоғары мұхиттағы жылу мөлшері. NOAA деректер жиыны, 1955-2020 жылдар, стандарт

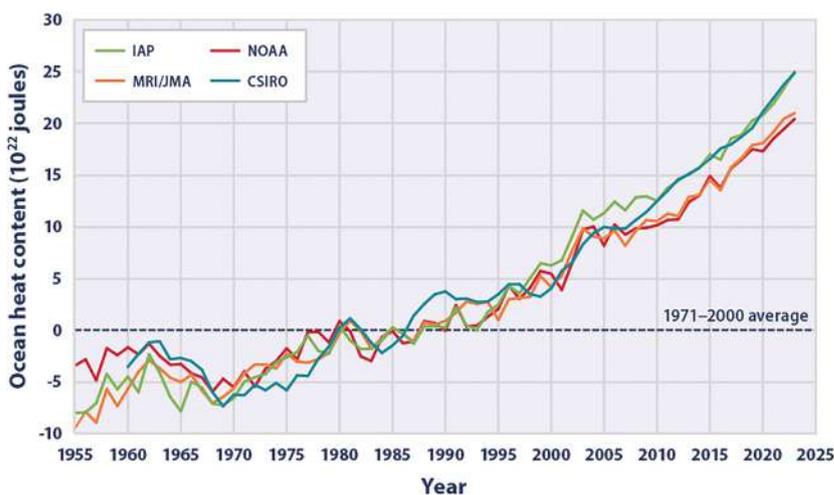
Дереккөз: NOAA деректер порталы [www.nodc.noaa.gov/OC5/3M\\_HEAT\\_CONTENT](http://www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT)

**46-сурет.**

Бұл диаграмма 1955 жылдан 2023 жылға дейінгі жаһандық мұхиттың жоғарғы 700 метріндегі жылу мөлшерінің өзгерістерін көрсетеді. Мұхиттағы жылу мөлшері энергия бірлігі джоульмен өлшенеді және анықтама үшін нөлге орнатылған 1971–2000 жылғы орташа көрсеткішпен салыстырылады. Басқа негізгі кезеңді таңдау уақыт өте келе деректердің пішінін өзгертпейді. Сызықтар төрт елдің мемлекеттік органдары әртүрлі әдістерді қолдана отырып дербес есептеді: АҚШ Ұлттық мұхиттық және атмосфералық әкімшілігі

(NOAA), Австралияның жалпы ғылыми және өнеркәсіптік зерттеу ұйымы (CSIRO), Қытайдың атмосфералық физика институты (IAP) және Жапонияның метеорологиялық агенттігінің (MRI/JMA) Метеорологиялық зерттеу институты.

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

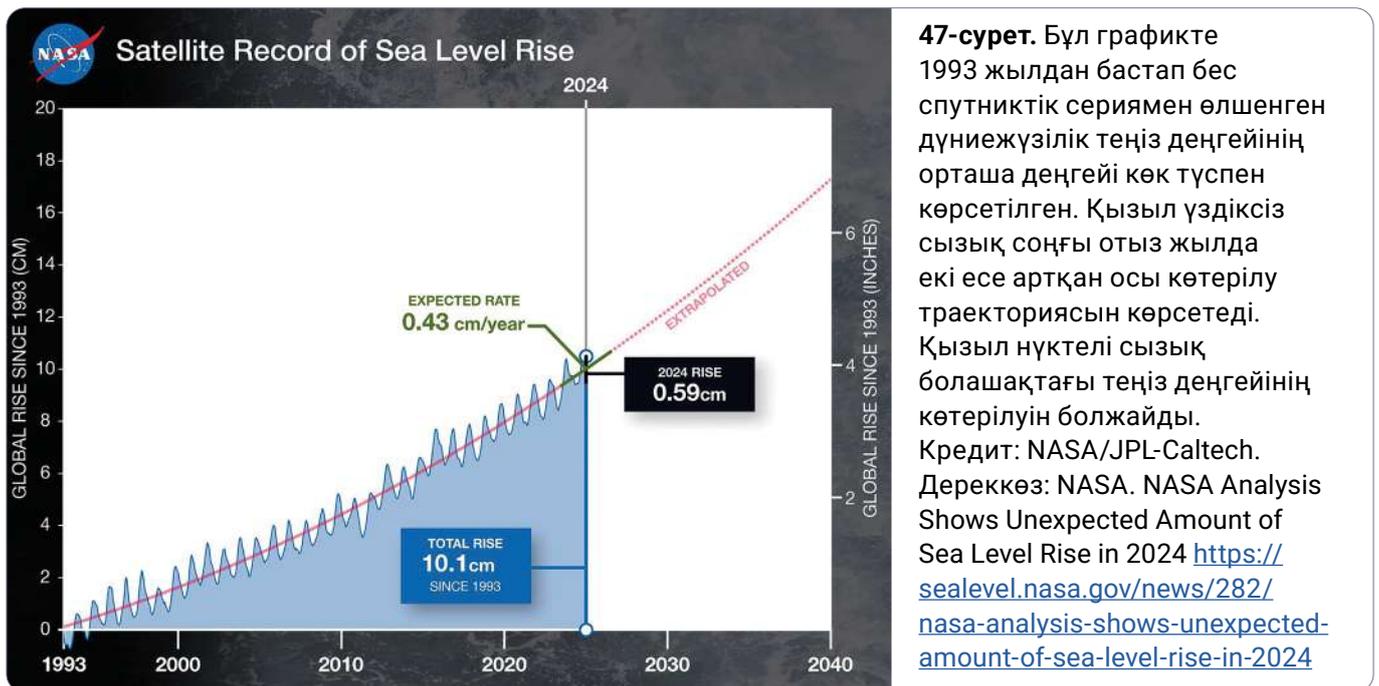


<sup>144</sup>The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Соңғы 60 жылда орта тереңдіктегі мұхиттар алдыңғы 10 000 жылмен салыстырғанда 15 есе жылдам қызды<sup>145</sup> (45–46-сурет). Бұл жаһандық жылыну процестерінің судың жоғарғы қабаттарына ғана емес, мұхиттың күн сәулесі түспейтін терең бөліктеріне де әсер ететінін көрсетеді. Мұндай тереңдікте суды жылыту үлкен энергияны қажет етеді, бұл мәселенің ауқымын көрсетеді. Ғалымдардың пікірінше, мұхит қазіргі қарқынмен жылынуы үшін бір жыл ішінде секунд сайын 7 атом бомбасын жарып жіберетін энергия эквиваленті бөлінуі керек<sup>146</sup> – бұл энергия қайдан келеді деген сұрақ тудыратын орасан зор көрсеткіш?

Су температурасының көтерілуі сөзсіз теңіз деңгейінің көтерілуіне алып келеді, бұл бүкіл жағалауды жауып қалу қаупін төндіреді. Соңғы екі ғасырда теңіз деңгейі 21 см-ге, ал соңғы 30 жылда 10,1 см-ге көтерілді<sup>147</sup>. Қазіргі өсу қарқыны бұрынғыдан 2,5 есе жоғары және бұл үрдіс жалғаса береді. Жағдай осылай жалғаса берсе, миллиондаған адам босқынға айналып, үйлерін тастап, жағалаудан алыс жерлерден пана іздеуге мәжбүр болады.

**«2024 жылы біз көрген өсу біз күткеннен де жоғары болды»,** – деді Джош Уиллис, NASA-ның Оңтүстік Калифорниядағы реактивті қозғалыс зертханасының теңіз деңгейін зерттеушісі. **«Жыл сайын аздап ерекшеленеді, бірақ мұхит көтерілуін жалғастырып жатқаны және көтерілу қарқыны барған сайын тезірек болып жатқаны анық»<sup>148</sup>** (47-сурет).



Мұхиттың жылынуы сондай-ақ су тасқындары, тайфундар және аномалды жауын-шашын сияқты экстремалды ауа райы құбылыстарының жиірек және қарқынды болуына ықпал етеді. Бұл өзгерістер планетаның экожүйелеріне және миллиардтаған адамның өміріне қауіп төндіреді, әрі әр жыл сайын олардың әсері айқын көрініс табуда.

<sup>145</sup>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)

<sup>146</sup>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>

<sup>147</sup>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)

<sup>148</sup>NASA. NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024.

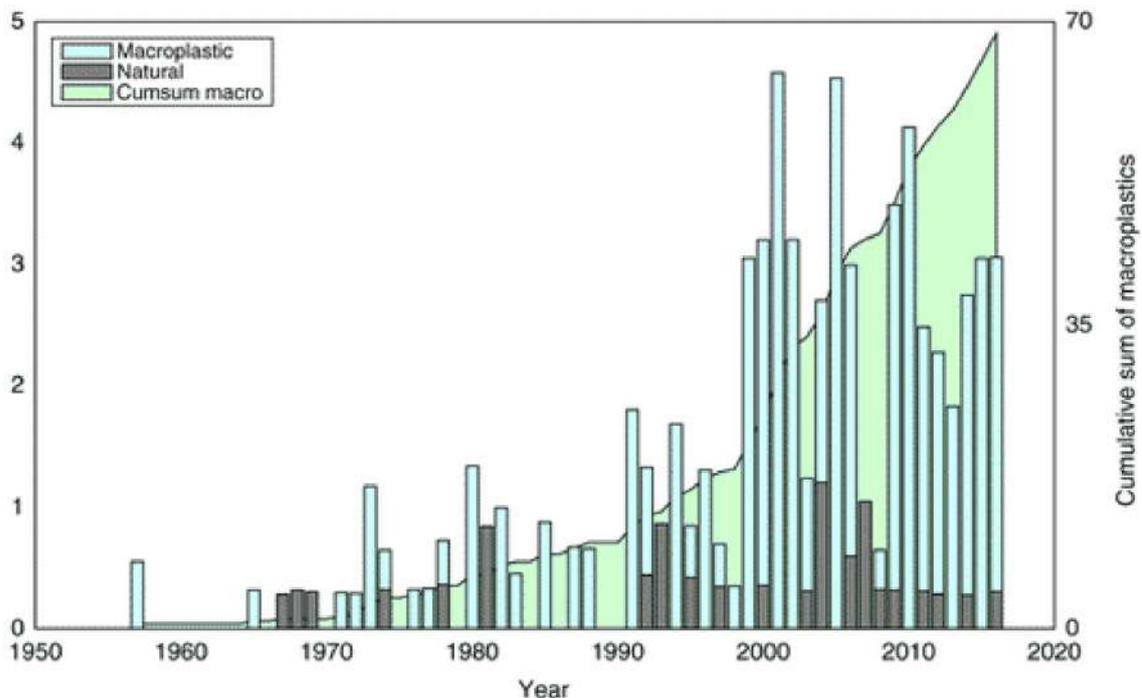
<https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024> (Accessed May 1, 2025)

## Неліктен мұхит жылынып жатыр? Гипотеза

Мұхиттарды жылытуға әсер ететін жалпы танылған негізгі факторлар атмосферадағы жылуды ұстап тұратын және мұхит суларының жоғарғы қабаттарының температурасын арттыратын CO<sub>2</sub> сияқты парниктік газдар болып табылады. Дегенмен, бұл процеске айтарлықтай әсер ететін басқа факторлар да бар. Мұхиттарды жылытудың қосымша факторы «X фактор. Табиғи апат циклінің динамикасына микро- және нанопластиктің әсері» тарауында талқыланады.

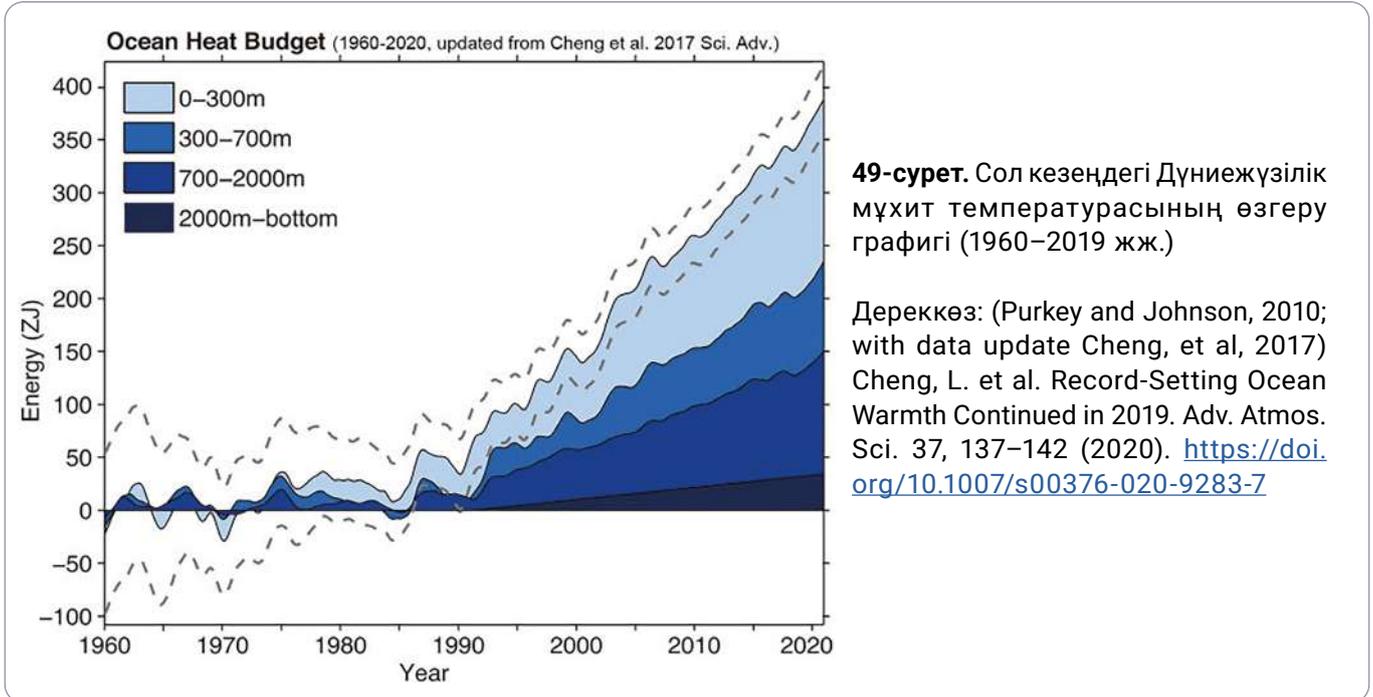
20 ғасырдың екінші жартысынан бастап мұхиттардағы пластик мөлшерінің күрт өсуі байқалды, бұл жеделдетілген өнеркәсіптік даму және пластик бұйымдарының жаппай өндірісі кезеңіне сәйкес келеді (48-сурет). 1960 жылдан 2019 жылға дейін мұхит температурасының өзгеруі де байқалады. Графикте (49-сурет) мұхиттардың орташа беткі температурасының параллельді өсуі көрсетілген, ол да XX ғасырдың ортасынан бастап байқалады.

Екі графикті салыстырған кезде (48–49-суреттер) мұхиттардағы пластик концентрациясының артуы мен су температурасының жоғарылауы арасындағы корреляцияны көруге болады. Бұл мұхиттардың пластикпен ластануы мұхит суының жылынуына әсер ететін маңызды, бірақ әлі толық зерттелмеген факторлардың бірі болуы мүмкін деген болжам жасауға мүмкіндік береді.



**48-сурет.** Соңғы бірнеше онжылдықта мұхиттардағы пластик концентрациясының өсу графигі. Мұхиттағы макропластиктің жалпы мөлшері және жылдық көрсеткіштер

Дереккөз: 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>



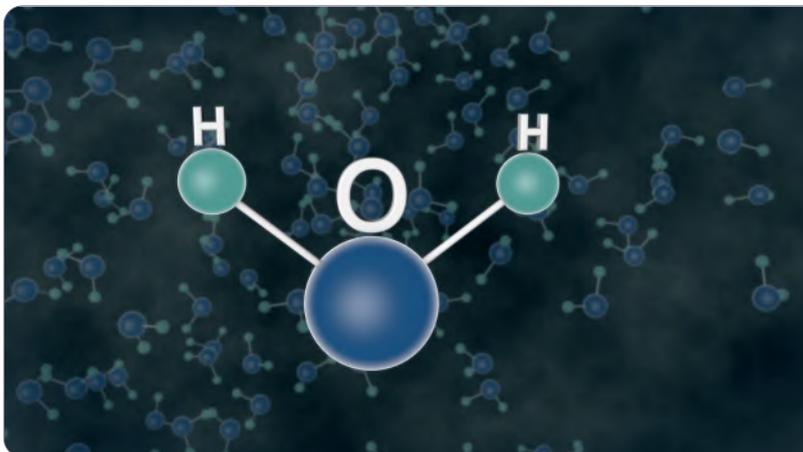
**49-сурет.** Сол кезеңдегі Дүниежүзілік мұхит температурасының өзгеру графигі (1960–2019 жж.)

Дереккөз: (Purkey and Johnson, 2010; with data update Cheng, et al, 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>

Бұл мәселені одан әрі зерттеу үшін пластиктің мұхит суының жылу өткізгіштік және жылу сыйымдылығы сияқты физикалық қасиеттеріне әсер ете алатынын түсіну маңызды. Сондай-ақ, осы өзгерістер мұхит температурасының көтерілуіне ықпал ете ала ма? Осы процестерді жақсырақ түсіну үшін судың негізгі сипаттамалары мен оның лаптаушылармен өзара әрекеттесуін қарастырайық.

## Судың негізгі қасиеттері

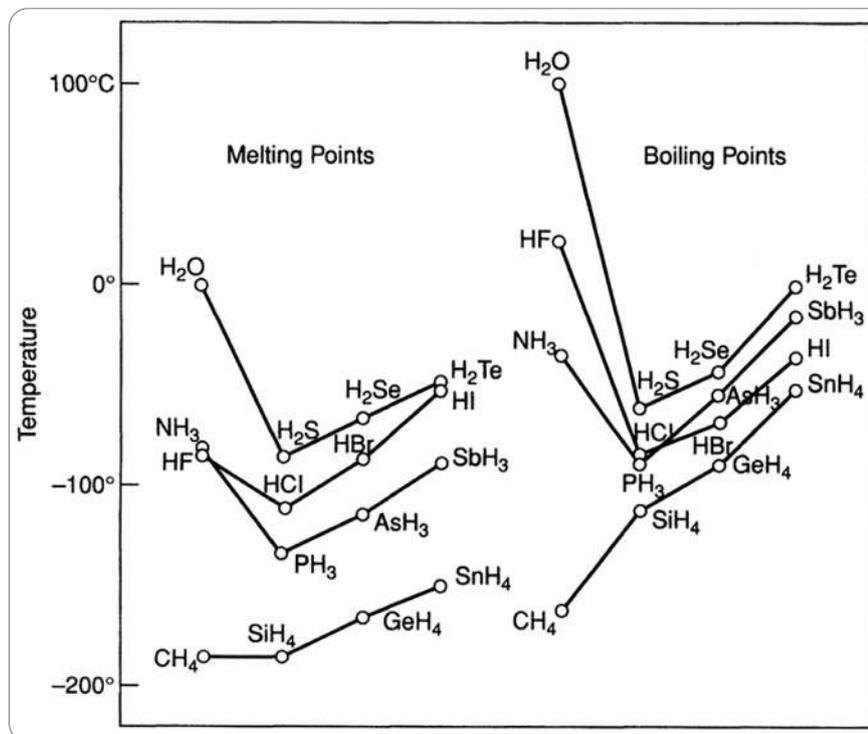
Судың молекуласы симметриялы V-тәрізді пішінге ие, онда екі сутегі атомы үлкенірек оттегі атомының бір жағында орналасқан (50-сурет).



**50-сурет.**

Судың молекуласының сызбалық бейнесі: екі сутегі атомы (H) бір оттегі атомына (O) шамамен  $104,5^\circ$  бұрышпен қосылып, оң және теріс зарядтары бар диполь түзеді

Бұл құрылым барлық атомдар тізбекте орналасқан  $\text{CO}_2$  сияқты сызықты молекулалардан ерекшеленеді. Су молекуласының бұл пішіні оны Жердегі көптеген процестер үшін ерекше және маңызды етеді. Су молекулаларының қасиеттері судың қалыпты жағдайда басқа үш атомды молекулалардың газдануына әкелетін температурада сұйық күйінде қалуына мүмкіндік береді (51-сурет).



**51-сурет.** Гидрид молекулаларының изоэлектронды тізбектерінің балқу (сол жақта) және қайнау (оң) температуралары. Судың температурасы ұқсас қосылыстардың температураларын экстраполяциялау арқылы алынған температурадан айтарлықтай жоғары.

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

Бұл судың молекулаларын біріктіріп, берік әрі тәртіпті құрылым түзетін сутектік байланыстардың<sup>149</sup> арқасында болады.

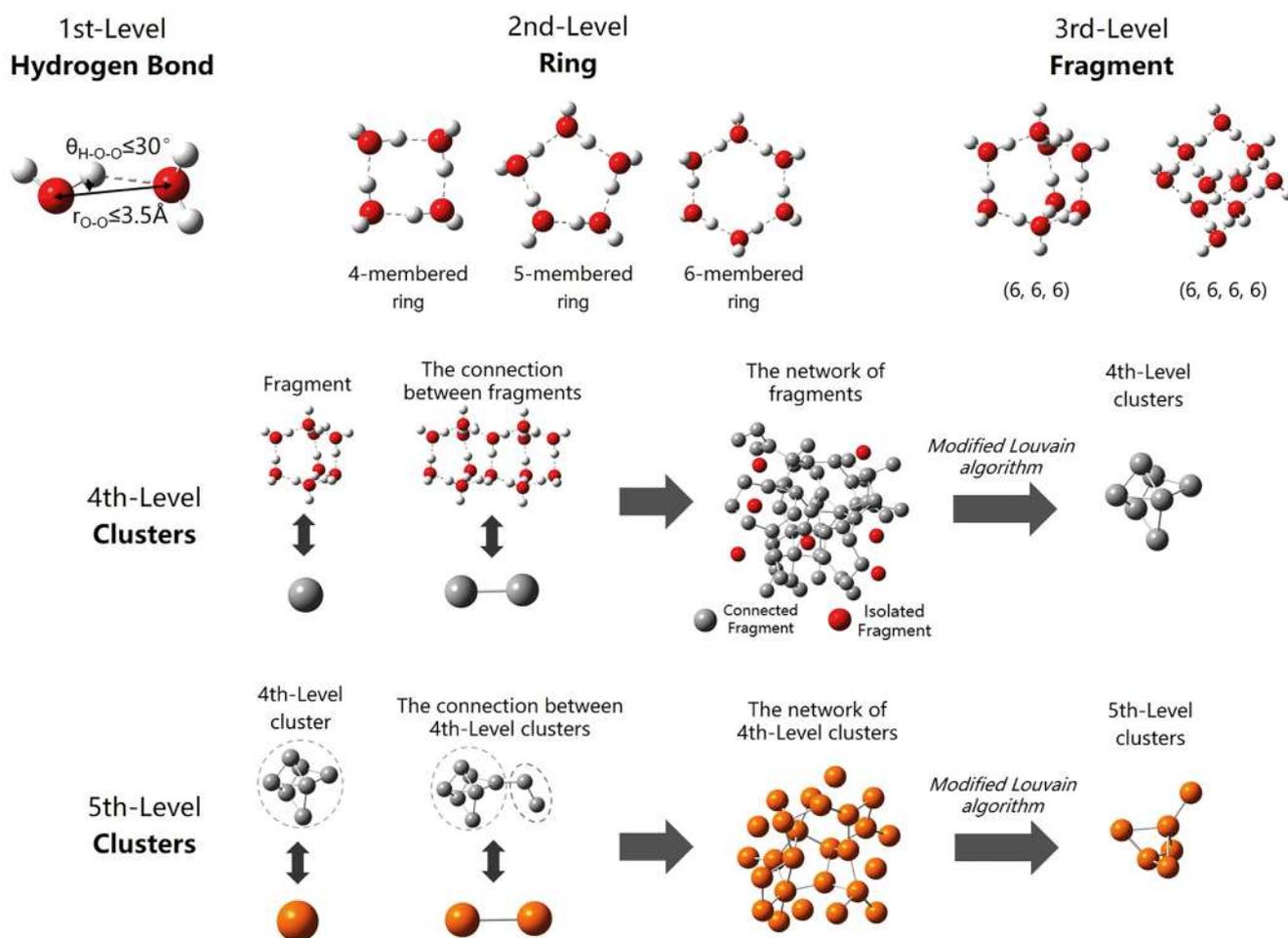
Көптеген сутектік байланыстар әлсіз тартылыс болып табылады, олардың беріктігі кәдімгі коваленттік байланыстың шамамен оннан біріне тең. Дегенмен, олар өте маңызды. Егер олар болмағанда, барлық ағаш конструкциялар құлар еді, цемент ұнтаққа айналар еді, мұхиттар буланар еді, ал барлық тірі организмдер бейорганикалық заттарға бөлінер еді<sup>150</sup>.

Сондықтан су кластерлер түзетін қабілетке ие, бұл оның аномалды қасиеттерін түсіндіреді (52–53-сурет). Су кластерлері сутектік байланыстар желісінің 95%-дан астамын қамтуы мүмкін, олардың кейбіреулері мыңдаған молекуланы қамтып, 3,0 нм шегінен асып кетеді<sup>151</sup>.

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

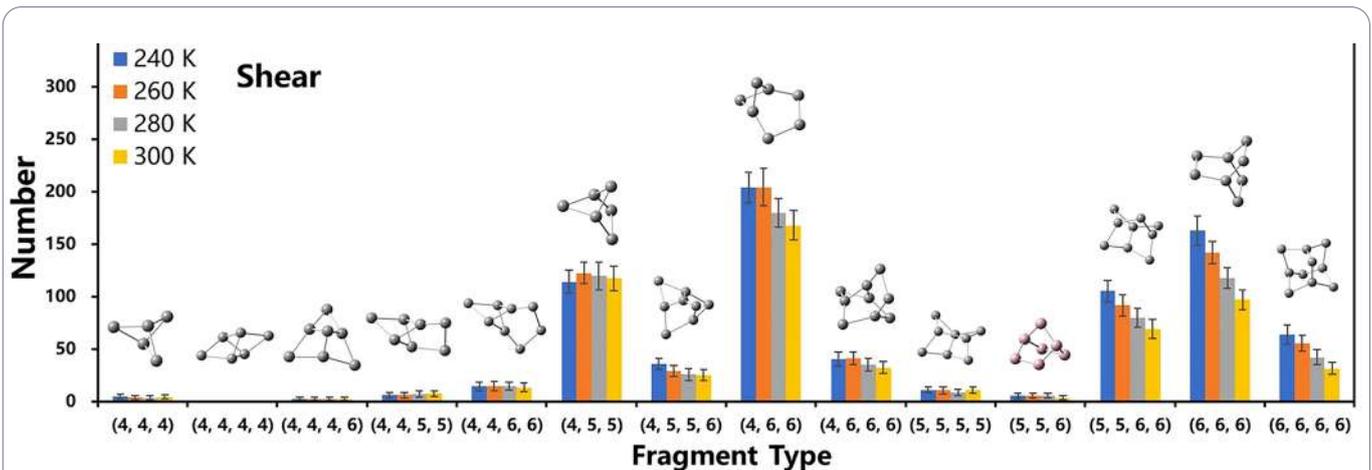
<sup>150</sup> Jeffrey, G. A. An Introduction to Hydrogen Bonding (Oxford University Press, New York, 1997). <https://books.google.com/books?vid=ISBN0195095499>

<sup>151</sup> 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>



**52-сурет.** Иерархиялық кластерлеу әдісінің схемасы. Су тектік байланыстар, сақиналар және фрагменттер 1-ші, 2-ші және 3-ші деңгейлі құрылымдар ретінде қарастырылады, олар химиялық тұрғыдан шар тәрізді модельдер болып табылады, ал қызыл және ақ шарлар сәйкесінше оттегі мен сутегі атомдарын білдіреді. Қатты және нүктелі таяқшалар сәйкесінше O–H коваленттік және сутегі байланыстарын білдіреді. 4-ші және 5-ші деңгейлі кластерлер топологиялық тұрғыдан суреттелген. Шарлар соңғы деңгейлердің құрылымын білдіреді. Суреттегі құрылымдар кластерлеу алгоритмі қарастырған нұсқалардың тек бір бөлігі ғана болып табылады.

Дереккөз: 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>



**53-сурет.** Әртүрлі жағдайларда желідегі 1, 2 және 3 деңгейлерде иерархиялық құрылымдардың таралуы. (a) Әртүрлі температурадағы сутегі байланыстарының (1-деңгейдегі құрылымдар) таралуы. (b) Әртүрлі температурадағы сақиналардың (2-деңгейдегі құрылымдар) таралуы. (c) Әртүрлі температурадағы фрагменттердің (3-деңгейдегі құрылымдар) таралуы. (4, 4, 4) 4 мүшелі үш сақинаны қамтитын үзіндінің таңбасын білдіретінін ескеріңіз.

Дереккөз: 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>

## Судың жылу сыйымдылығы, жылу өткізгіштігі және тығыздығы және олардың функционалдық маңызы

### 1. Судың жоғары жылу сыйымдылығы

Стандартты жағдайларда су кез келген сұйық немесе қатты заттың ең жоғары меншікті жылу сыйымдылығына ие, сутегі сияқты кейбір газдардан кейін екінші орында<sup>152</sup>. Бұл оның өз температурасының салыстырмалы түрде аз өзгеруімен үлкен көлемдегі жылу энергиясын жұтып, ұстап тұру және тасымалдау мүмкіндігін білдіреді.

Судың жылу сыйымдылығы 1 г судың температурасын 1 °C-қа көтеру үшін қажет жылу мөлшері ретінде анықталады және стандартты жағдайларда шамамен 4,18 Дж/(г·°C) құрайды. Бұл қасиет климатты реттеудегі негізгі факторлардың бірі болып табылады: мұхиттағы су күндіз жылуды жинайды, ал түнде оны баяу шығарады. Жазда мұхит артық жылуды сіңіреді, ал қыста ол бірте-бірте босатылып, алып термостат ретінде әрекет етеді және планетадағы температура айырмашылығын азайтады.

### 2. Судың жылу өткізгіштігі

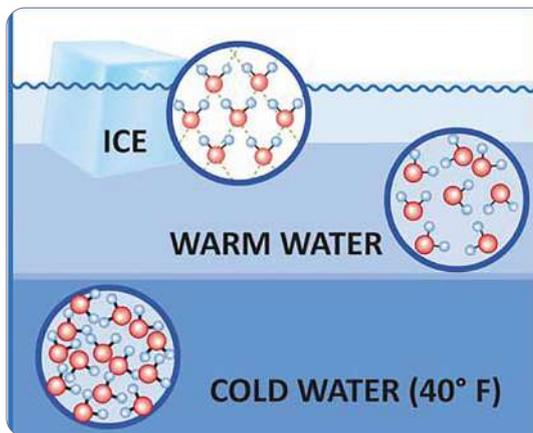
Су металдармен салыстырғанда салыстырмалы түрде төмен жылу өткізгіштікке ие, бірақ ол көптеген басқа сұйықтықтарға қарағанда жоғары. Жылуөткізгіштік - заттың өзін қозғалтпай, бір бөліктен екінші бөлікке жылу беру қабілетінің өлшемі. Судың жылу өткізгіштігі стандартты жағдайларда (25 °C) шамамен 0,6 Вт/(м·K) құрайды, бұл оны мұхиттар мен басқа да су айдындарында жылуды бөлу сияқты табиғи процестерде жылуды тиімді өткізгіш етеді.

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

Бақылаулар көрсеткендей, судың жылу өткізгіштігі температураның белгілі бір шегіне дейін артады<sup>152</sup>. Сонымен қатар, бұл мән қоспалардың немесе еріген заттардың болуымен өзгертілуі мүмкін<sup>153, 154</sup>. Бұл сипаттамалар судағы жылудың таралуына әсер етеді, бұл мұхит пен атмосфераның өзара әрекеттесуін түсіну үшін өте маңызды.

### 3. Судың тығыздығының аномалды мінез-құлқы

Көптеген заттардан айырмашылығы, судың тығыздығы температура өзгерген кезде әдеттен тыс әрекет етеді. 4 °C-қа дейін салқындаған кезде оның тығыздығы артады, бірақ одан әрі салқындаған сайын (4 °C-тан 0 °C-қа дейін) тығыздық төмендей бастайды (54-сурет). Су қатқан кезде оның тығыздығы 8–9% төмендейді. Бұл мұздың неге батпайтынын, бірақ оның бетінде қалуын түсіндіреді. Бұл құбылыс су қоймаларындағы тіршілік үшін өте маңызды, өйткені мұз суды және тірі ағзаларды толық қатып қалудан сақтайды, барлық судың түбіне дейін қатып қалуына жол бермейді.



**54-сурет.** Судың салқындаған кездегі тығыздығының өзгеруінің схемалық көрінісі: суыған кезде су молекулалары бір-біріне жақындап, тығыздығы артып, 4°C-та максимумға жетеді. Ол одан әрі салқындаған сайын сутегі байланысы басым болады және су молекулалары мұздың кристалдық құрылымына орналасады, бұл судың кеңеюіне және мұздың тығыздығының төмендеуіне әкеледі, сұйық суға қарағанда шамамен 10% аз тығыздыққа айналады.

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

## Су қасиеттерінің климат пен экожүйеге әсері

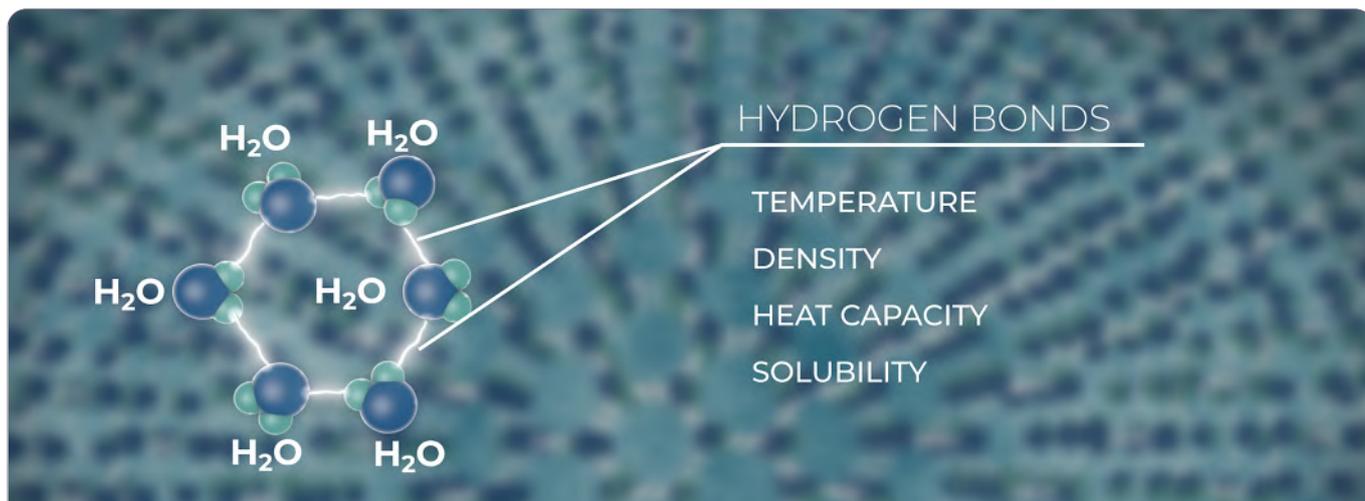
Су температурасының өзгеруі мұхиттардың жылу балансына және олардың жылуды сақтау және беру қабілетіне айтарлықтай әсер етуі мүмкін. Бұл өз кезегінде Жердің климаттық жүйесіне әсер етеді.

Осылайша, судың физика-химиялық қасиеттері, әсіресе оның жылу сыйымдылығы мен жылу өткізгіштігі, Жер планетасындағы экологиялық тепе-теңдікті сақтауда және климаттық үдерістерді реттеуде маңызды рөл атқарады (55-сурет).

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

<sup>153</sup>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>

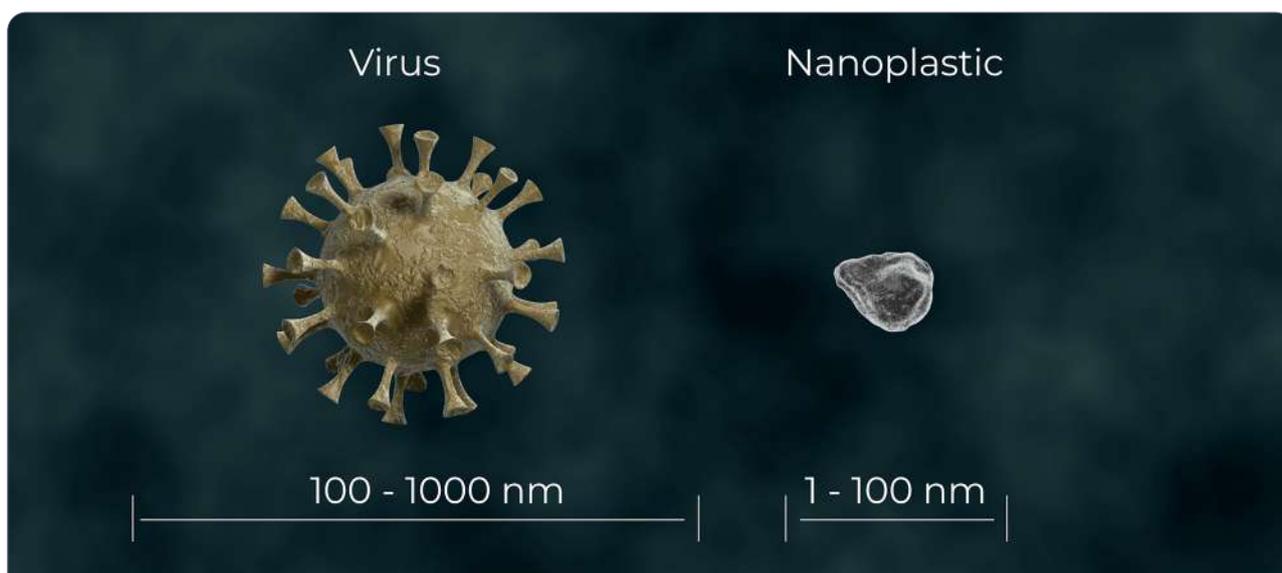
<sup>154</sup>Jamieson, D. T. & Tudhope, J. S. Physical properties of sea water solutions: thermal conductivity. Desalination 8, 393–401 (1970). [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)80240-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)80240-4)



**55-сурет.** Су молекулаларындағы сутегі байланыстарының схемалық көрінісі және олардың судың негізгі қасиеттеріне әсері: сутегі байланыстары судың жоғары жылу сыйымдылығына ықпал етіп, оның жылуды тиімді сіңіріп, ұстап тұруына мүмкіндік береді. Бұл байланыстар сонымен қатар судың 4°C ең жоғары тығыздығын және оның полярлық және иондық заттарды еріту қабілетін анықтайды, бұл суды әмбебап еріткіш етеді

## МНП-тің теңіз суының физикалық қасиеттерінің өзгеруіндегі рөлі

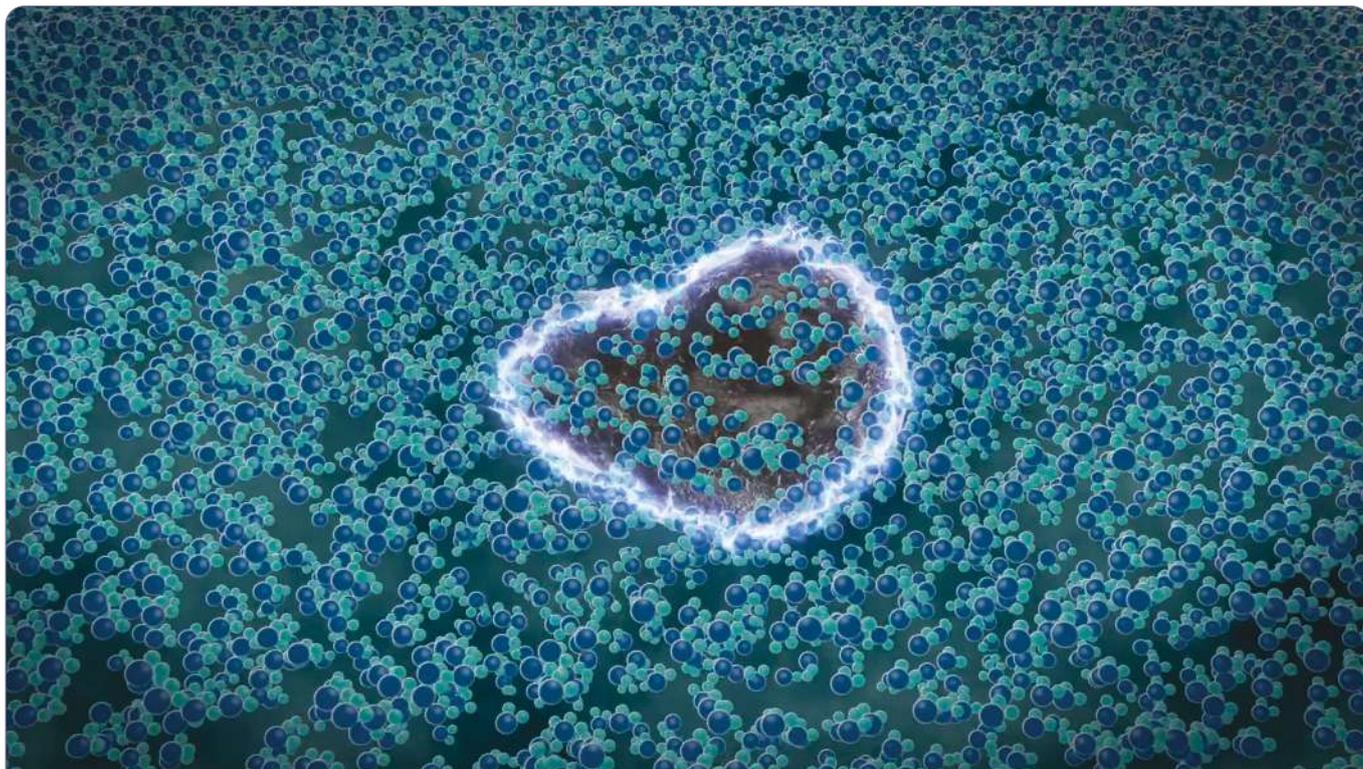
Мұнай-химия өнеркәсібінің өнімі болып табылатын пластик табиғатта ыдырамайды, керісінше микро- және нанопластик сияқты ұсақ бөлшектерге бөлінеді<sup>155</sup>. Бұл бөлшектер, әсіресе нанопластик, судың физика-химиялық қасиеттеріне елеулі әсер етуі мүмкін, ал бұл өз кезегінде экожүйелер мен климаттық үдерістерге ықпал етеді. Нанопластик — өлшемі нанометрмен өлшенетін бөлшектер, яғни олар вирустардан да кіші (56-сурет).



**56-сурет.** Вирус пен нанопластик бөлшегінің өлшемдерін схемалық салыстыру

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

Мысалы, азот пен оттекті қамтитын нейлоннан (полиамидтен) жасалған нанопластик судың молекулаларымен сутектік байланыс түзуге қабілетті<sup>156</sup>. Нанопластик бөлшектері суға түскенде, олар су молекулалары арасындағы сутектік байланыстарға негізделген судың ұйымдасқан құрылымын бұзады, бұл оның физика-химиялық қасиеттерін өзгертуі мүмкін (57-сурет). Әсіресе, су молекулалары қозғалғыштықтарын жоғалтады, бұл олардың жылуалмасу үдерістеріне тиімді қатысу қабілетін төмендетеді. Сонымен қатар, әртүрлі заттар еріген су ерітінділерінде нанопластик бөлшектері электр зарядын иеленуі мүмкін<sup>157</sup>.



**57-сурет.** Судағы зарядталған пластик нанобөлшектерінің схемалық бейнесі: органикалық немесе синтетикалық қоспалардың болуы, рН, температура немесе тұздықтылықтың өзгеруі сияқты тұрақсыз су жағдайлары әсер еткенде, нанопластиктің беті потенциалды түрде белсенді болып, судың ортасында электр зарядтарын түзе алады.

Дереккөз: 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).

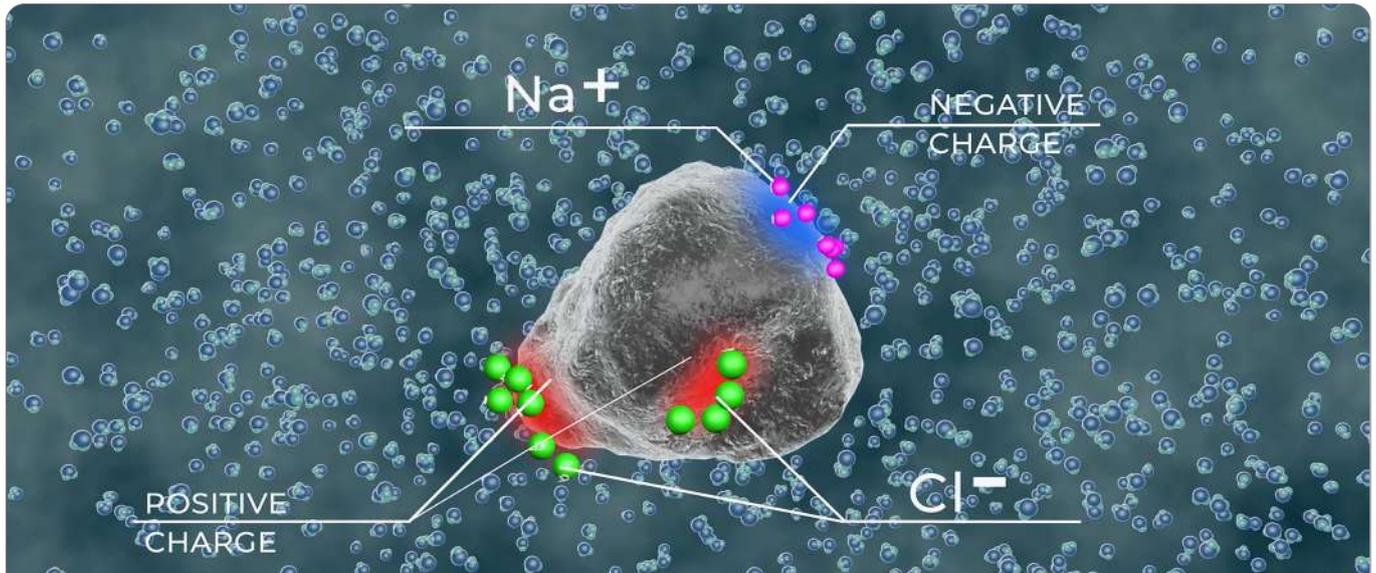
<https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.11.008>

Бұл оның бетінде болатын химиялық өзгерістер – мысалы, тотығу, сондай-ақ теңіз суындағы иондардың, мысалы натрий ( $\text{Na}^+$ ) және хлор ( $\text{Cl}^-$ ), адсорбциясы нәтижесінде болады. Иондармен қоршалған зарядталған пластик нанобөлшектері су молекулаларын тартып, өздерінің айналасында гидраттық қабықша түзеді<sup>158</sup> (58-сурет).

<sup>156</sup>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>

<sup>157</sup>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>

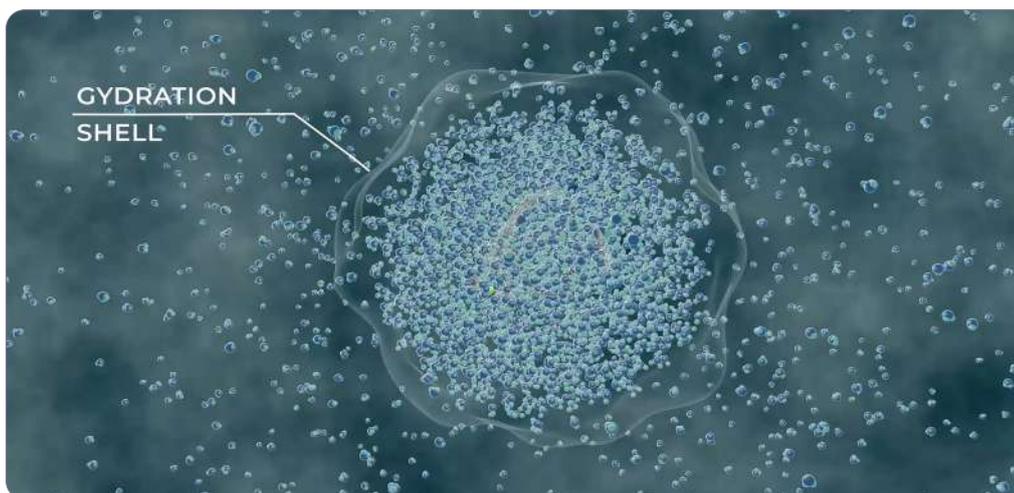
<sup>158</sup>Chen, Y. et al. Electrolytes induce long-range orientational order and free energy changes in the H-bond network of bulk water. *Sci. Adv.* 2, e1501891 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891>



**58-сурет.** Зарядталған пластик нанобөлшектерінің айналасында гидраттық қабықша түзілу процесінің схемалық бейнесі: осы үдеріс барысында зарядталған нанобөлшектер иондарды тартып, олардың айналасында су молекулаларының түзілуіне ықпал етеді, осылайша қорғаныш гидраттық қабықша пайда болады.

Дереккөз: 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>

Лозанна Политехник мектебінің зерттеушілері иондардың айналасындағы гидраттық қабықшаның көлемін, яғни қанша су молекуласы ионға жауап беретінін анықтауды жөн көрді. Зерттеу көрсеткендей, бір ион өзіне жақын шамамен миллион су молекуласына әсер ете алады. Бұл әсер бөлшектің бетінде үлкен заряд болса және адсорбталған иондардың концентрациясы жоғары болса күшейеді. Нәтижесінде бір нанопластик бөлшегі миллиондаған су молекулаларының қасиеттерін өзгерте алады<sup>158</sup> (59-сурет). Гидраттық қабықшаға байланған молекулалар аз қозғалғыш болады<sup>159</sup>. Нәтижесінде судың жалпы жылу сыйымдылығы төмендейді<sup>160, 161</sup>.



**59-сурет.** Нанопластик бөлшегінің айналасындағы гидраттық қабықшаның схемалық бейнесі

<sup>158</sup>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>

<sup>159</sup>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>

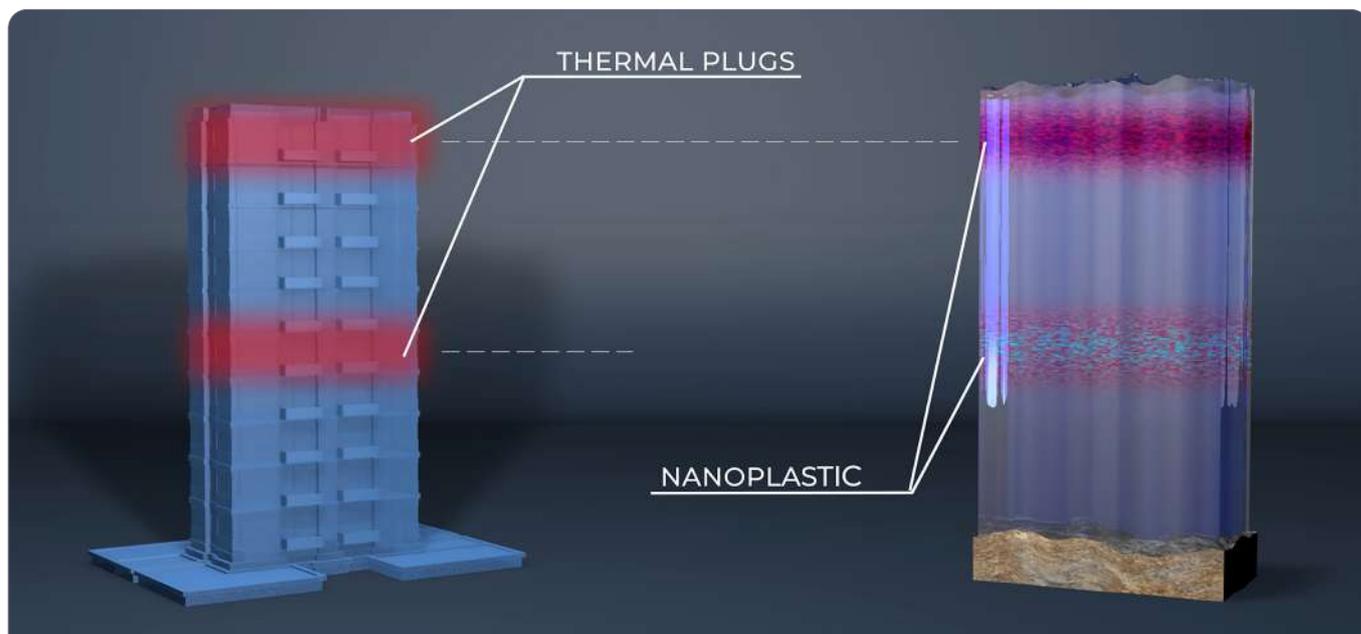
<sup>160</sup>Chew, T., Daik, R. & Hamid, M. Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Dodecylbenzenesulfonic Acid-Doped Polyaniline Particles—Water Based Nanofluid. *Polymers* 7, 1221–1231 (2015). <https://doi.org/10.3390/polym7071221>

<sup>161</sup>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>

Сутектік байланыстар құрылымының бұзылуы да судың жылуөткізгіштігінің төмендеуіне әкеледі<sup>162</sup>. Нәтижесінде нанопластикке жақын орналасқан су жылытылған күйде қалуы мүмкін, өйткені ол жылуды тиімді өткізу қабілетін жоғалтады.

## Микро- және нанопластиктің мұхиттағы шоғырлану аймақтары

Микро- және нанопластик мұхит бойымен ағымдар арқылы таралуы мүмкін, ал тығыз бөлшектер немесе ластанған пластик теңіз түбіне шөгіп қалуы мүмкін. Сондай-ақ, нанопластиктің шоғырлануы термоклин аймақтарында байқалады — бұл жылы беттік су мен суық терең сулар арасындағы өтпелі қабат<sup>163</sup> (60-сурет).

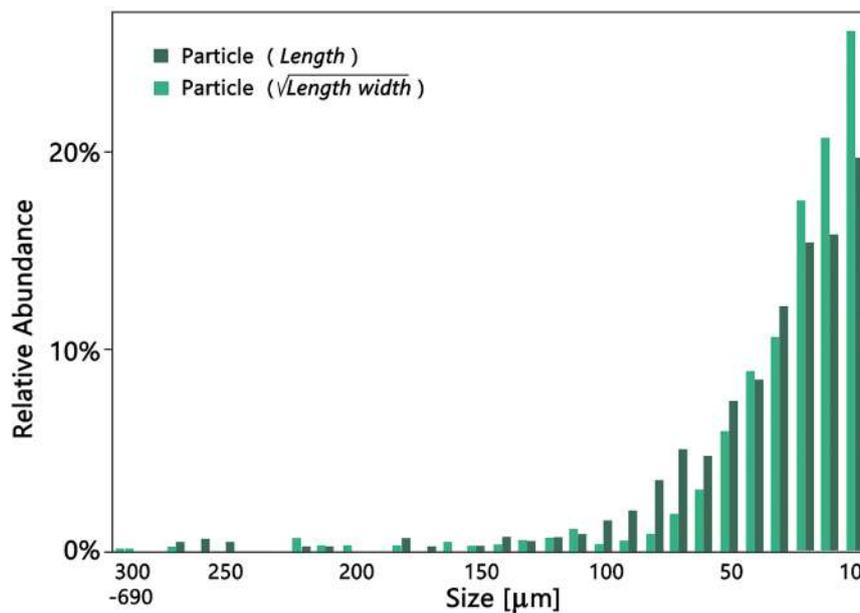


**60-сурет.** Суретте мұхиттағы микро- және нанопластик шоғырлану аймақтарын 5-ші және 10-шы қабаттардағы жылу кептелістері бар көпқабатты ғимаратқа бейнелі түрде салыстыру көрсетілген. Бұл кептелістер қалыпты жылуалмасуға кедергі жасап, жылудың біркелкі таралуының орнына, ол осы қабаттарда жиналады. Термокамера ғимарат ішіндегі температураның кептелістер жоқ ғимаратқа қарағанда әлдеқайда жоғары екенін көрсетеді. Сол сияқты, судан табылған нанопластик табиғи жылуалмасу механизмін бұзып, мұхитта “жылу кептелістерін” жасайды

Мұхиттағы нанопластик концентрациясының артуы жаһандық жылулық баланста өзгерістерге әкелуі мүмкін. Бұл мұхит температурасының көтерілуіне әсер етіп, климаттың өзгеруіне себеп болуы мүмкін. Ең маңыздысы, тіпті аз мөлшердегі нанопластик экожүйеге елеулі әсер етуі мүмкін. Мұхит бетінің температурасын арттыру пластикалық қалдықтардың микро- және нанопластикке ыдырау жылдамдығын арттырады (61-сурет). Нәтижесінде осы бөлшектер саны артып, олар су буымен бірге атмосфераға түседі. Атмосферадағы микро- және нанопластиктің болуы оның қосымша қызуына ықпал етеді, бұл өз кезегінде мұхиттың қызуын күшейтеді. Осылайша, өзара күшейтетін процестер қалыптасатын жабық шеңбер пайда болады.

<sup>162</sup>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>

<sup>163</sup>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>



**61-сурет.** Барлық талданған станциялар үшін микропластик бөлшектерінің өлшемге қатысты салыстырмалы таралуы ( $n = 543$ ). Суреттерде Раман микроспектроскопиясы арқылы анықталған және расталған ең кішкентай (оң жақта) және ең ірі (сол жақта) МП бөлшектері көрсетілген.

Дереккөз: 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>

## Микро- және нанопластиктің электростатикалық заряды мен атмосфералық құбылыстар арасындағы байланыс

Микро- және нанопластик әртүрлі жолдармен атмосфераға түседі. Мұхиттар мен басқа су көздерінің бетінен буланатын су буы микробөлшектерді ауаға көтереді<sup>164</sup>. Құрлықта атмосферадағы пластиктің негізгі көздері зауыттар, қалдықтарды өртейтін станциялар және қоқыс полигондары болып табылады. Сонымен қатар, ауыл шаруашылығы тыңайтқыштары мен пластикалық мульча кеуіп, желмен таралған кезде микропластик ауаға көтеріледі. Автомобиль шиналарының үйкелуі кезінде де пластик бөлшектері бөлінеді.

Осы және өзге де көптеген көздер атмосфераның ластануына үлкен үлес қосады. Бұл процестер атмосферада микропластиктің жиналуына және таралуына ықпал етеді, бұл айтарлықтай экологиялық және климаттық қауіптер туғызады. Атмосфераға шыққан микро- және нанопластик бөлшектер су буы үшін конденсация ядролары ретінде қызмет ете алады. Ядролар неғұрлым көп болса, су буының тамшыларға айналуы соғұрлым жылдамырақ жүреді. Жапониядағы таулы шыңдардан жиналған бұлтты судың үлгілерінде ауадағы микропластиктер табылған<sup>165</sup> (62-сурет).

<sup>164</sup>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>

<sup>165</sup>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>

**Микропластик атмосферада бұлттардың түзілуіне және климат өзгерісіне қалай әсер етеді**

**Микропластик (5 мм-ден кіші өлшемді) жер бетіндегі және су экожүйелерін ластауды жалғастыруда.**

Алайда оның бұлт түзілуі мен климат өзгерісіне әсері әлі зерттелмеген.

**Бұлт суында микропластикті талдау**

Жапонияда 1 300–3 776 метр биіктіктегі шыңдардан жиналған бұлт суының үлгілері

Толық ішкі шағылуды әлсірету әдісі және инфрақызыл диапазонда Фурье түрлендіргіші арқылы микроспектроскопия

**Талдау нәтижелері**

**Тоғыз полимер түрі анықталды:**

- Полиэтилен
- Полипропилен
- Полиэтилентерефталат
- Полиметилметакрилат
- Эпоксидті шайыр
- Полиамид 6
- Этилен мен пропиленнің сополимері немесе полиэтилен мен полипропиленнің қоспасы
- Полиуретан

**Микропластик фрагменттелген**

- Концентрация диапазоны: 6,7 – 13,9 бөлшек/литр
- Диаметр Фере диапазоны: 7,1 – 94,6 мкм

Гидрофильді топтары бар микропластик көп мөлшерде кездеседі

**Ауадағы гидрофильді микропластик бөлшектері бұлттардағы мұз және судың конденсациясының ядросы болып қызмет етеді, олардың түзілуіне әсер етіп, жаһандық климатқа ықпал етеді**

Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation  
Wang et al. (2023) | Environmental Chemistry Letters | DOI: 10.1007/s10311-023-01626-x

WASEDA University  
早稲田大学

**62-сурет.** Жоғары биіктіктегі бұлт суындағы ауадағы гидрофильді микропластиктер және олардың бұлт түзілуіндегі рөлі.  
Дереккөз: Hiroshi Okochi from Waseda University  
<https://www.sustainableplastics.com/news/scientists-find-microplastics-clouds-above-mount-fuji>

66

**«Аэрозоль бөлшектерінің, мысалы микропластиктің көп шоғырланған ластанған ортада, барлық су осы көп мөлшердегі аэрозоль бөлшектерінің арасында бөлінеді де, әрқайсысының айналасында кішігірім тамшылар түзіледі. Тамшылар көбірек болған сайын, жауын-шашын мөлшері азаяды. Бірақ тамшылар жеткілікті үлкен болғанда ғана жауын жауады, сондықтан бұлтта көбірек су жиналады. Нәтижесінде, жауын-шашын мол болады»,** — деді Пенсильвания штаты университетінің метеорология және атмосфералық ғылымдар кафедрасының химия профессоры Мириам Фридман<sup>166</sup>.

Бұл соңғы жылдары әртүрлі аймақтарда қалыптан тыс жауын-шашынның байқалуын түсіндіреді.

<sup>166</sup>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>

## Бұлттардағы электр зарядтары

Жер атмосферасы – күрделі электрлік жүйе, онда су молекулалары маңызды рөл атқарады. 1752 жылдан бастап, Бенджамин Франклин атмосфераның электрленгенін және найзағайдың электрлік табиғаты бар екенін алғаш дәлелдеген кезде, судың (бу, сұйық және мұз күйінде) өзара әрекеттесуі осы процестерде негізгі рөл атқаратыны белгілі болды. Су таза күйінде бейтарап болса да, кез келген фазалық ауысымдар кезінде – еру, қатып қалу немесе молекулалардың соқтығысуы сияқты жағдайларда – ол басқа бөлшектерге иондарды бере алады, бұл электрлік эффектілерге әкеледі.

Атмосферада мұз кристалдары, салқындатылған су тамшалары және басқа бөлшектердің табиғи электр өрістерінің әсерімен соқтығысуы зарядтардың бөлінуіне себеп болады. Бұл процесс атмосфералық электрлік құбылыстардың, соның ішінде найзағайлы бұлттардың пайда болуына маңызды. Бұл құбылыс бұлттардың және жауын-шашынның түзілуінде маңызды рөл атқарады. Зарядталған тамшылар бір-біріне тартылып, бірігу процесін жылдамдатады, нәтижесінде үлкен тамшылар түзіледі және жауын-шашынға (жаңбыр, қар немесе град) әкелетін бұлттар пайда болады.



**«Зарядтар өте маңызды, бұлт түзілу процесінде олар бәрін дерлік шешеді. Біз зарядтардың негізгі рөл атқаратынын анықтадық»** — деді Вашингтон университетінің биоинженерия профессоры, PhD, Джеральд Х. Поллак, WATER ғылыми журналын негіздеуші және бас редакторы<sup>167</sup>.

Сондай-ақ 1843 жылы Майкл Фарадей электр тогы су тамшыларының суды зарядтайтын металға үйкелісінен пайда болатынын анықтады. Бұл жаңалық үйкеліс, фазалық ауысулар және контактілі электрлендіру салдарынан суды зарядтауды одан әрі зерттеуге, сондай-ақ бұл әсерді жаңа энергия көздерін жасау үшін пайдалану әрекеттеріне әкелді.

Ылғалды ауа иондардың қозғалуына және жинақталған зарядты таратуға мүмкіндік беретін су қабықшасын қалыптастыру арқылы беттік зарядты бейтараптайтыны белгілі. Дегенмен, кейбір жағдайларда суды сіңіретін беттерде ылғалды атмосферадан заряд жиналуы мүмкін, бұл қоршаған ортаның электрлік күйіне де әсер етеді<sup>168</sup>. Зерттеулер көрсеткендей, ауыр металдар микропластиктерге оңай қосыла алады және бұл комбинация планетаның экожүйелеріне зиян келтіруі мүмкін.

<sup>167</sup>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).

<sup>168</sup>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>

Сонымен қатар, микропластиктер және олардың беттеріндегі заттардың қоспасы басқа ластаушы заттарға жабысып қана қоймай, сонымен бірге олардың химиялық қасиеттерін өзгерте отырып, бір-бірімен әрекеттесе алады<sup>169</sup>. Микро- және нанопластик бөлшектері атмосфераға кедергі жасағанда, олар атмосфералық процестердегі нәзік тепе-теңдікті бұзуы мүмкін. Пластикалық бөлшектер зарядты көтере алады, бұл полярлық су молекулаларының тартылуын арттырады, тамшылардың пайда болуына ықпал етеді. Пластикалық бөлшектер тозаң, теңіз тұзы немесе күйе сияқты қарапайым конденсация ядроларына айналмайды, бірақ бейтарап бөлшектерге қарағанда тамшыларға тиімдірек жинала алады<sup>170</sup>.

Бұл су тамшылары зарядталған бөлшектердің айналасында тезірек қалыптаса бастайтынын білдіреді, бұл бұлттардың құрылымына әсер етеді және үлкен тамшылардың және тіпті әдеттен тыс үлкен мұз кристалдарының пайда болуына әкелуі мүмкін<sup>171</sup>. Мысалы, жақында зерттеушілер тобы Жапониядағы таулы шыңдардағы бұлттардан суды тартатын беткі қабаты бар пластик гранулаларын тапты<sup>172</sup>.

## Бұлттардың және жауын-шашынның түзілуіне әсері

Микропластик жауын-шашынның сипатына, ауа райын болжауға, климаттық модельдеуге және тіпті ұшу қауіпсіздігіне әсер етуі мүмкін, себебі ол атмосфералық мұз кристалдарының бұлттарды қалай түзетінін өзгертеді.

Зерттеу<sup>173</sup> көрсеткендей, микропластик қосылған су тамшылары микропластиксіз тамшыларға қарағанда 4–10°C жоғары температурада қатып қалады, яғни төменгі биіктіктерде. Әдетте ешқандай қоспасы жоқ су тамшысы шамамен –38°C температурада қатып қалады. Алайда микропластик болған жағдайда, тамшылардың 50%-ы пластик түріне байланысты –18°C-тен –24°C-қа дейінгі температурада қатып қалған.

Микропластик қамтитын су тамшылары тезірек қатып, үлкенірек мұз түйіршіктерін түзеді. Бұл түйіршіктер ауадағы көтерілу ағындарымен жоғары көтеріледі, бірнеше қабат мұзбен қапталады да, кейін жерге түседі. Мұндай құбылыс бұршақтың өлшемін арттыруға (63–64-сурет), оның зиянды әсерін күшейтуге және мұз бұлттарының түзілу процесін белсендіруге әкелуі мүмкін. Нәтижесінде жауын-шашынның жиілігі мен қарқындылығы, соның ішінде жаңбыр мен қар жауу, өзгереді. Бұл климатқа, гидрологиялық циклге және экожүйелерге әсер ететін каскадтық эффектілер тудыруы мүмкін.

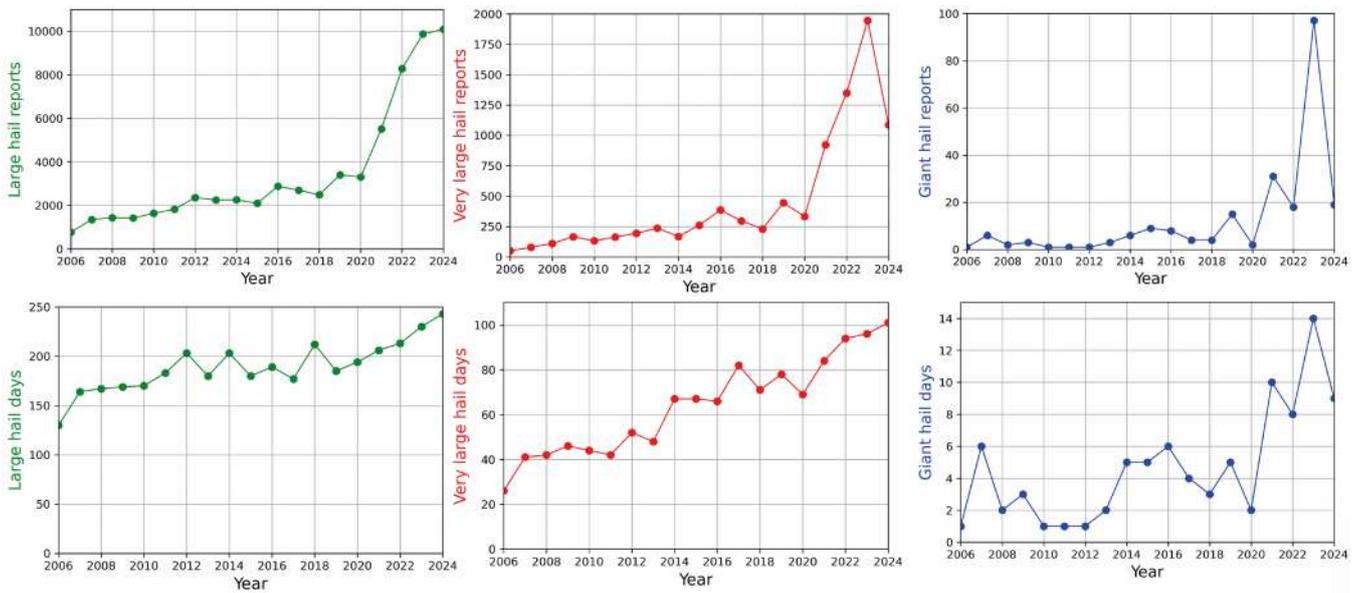
<sup>169</sup>Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 10, 27–32 (2023). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689>

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

<sup>171</sup>The 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>

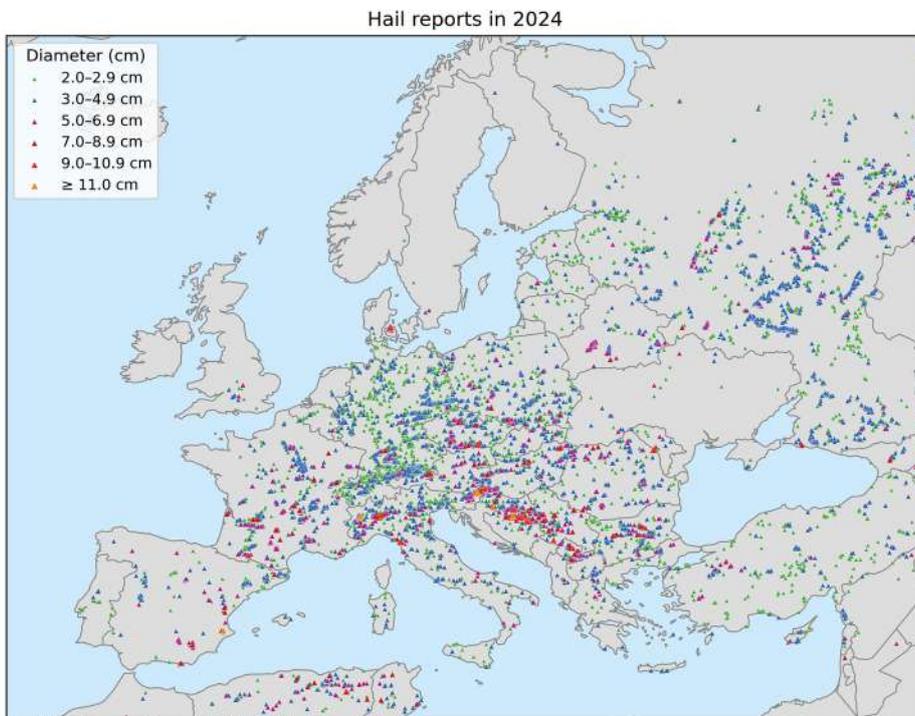
<sup>172</sup>Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. *Environ Chem Lett* 21, 3055–3062 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>

<sup>173</sup>Busse, 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>



**63-сурет.** 2006 жылдан 2024 жылға дейінгі кезеңде үлкен (2 см+), өте үлкен (5 см+) және алып (10 см+) бұршақ туралы хабарламалар мен күндер саны

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



Source: ESSL, European Severe Weather Database: [www.eswd.eu](http://www.eswd.eu)

**64-сурет.** 2024 жылы Еуропа мен оның көршілес аймақтарында үлкен бұршақ туралы хабарламалардың кеңістік бойынша таралуы

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

Атмосферада нанопластик бөлшектері болған кезде бұлттар әдетте 2 км-ден төмен биіктікте түзіле бастайды. Бұл бұлттардың қозғалғыштығы аз болуына әкеліп, жауын-шашынның қалыпты таралуын бұзады. Нәтижесінде кейбір аймақтарда құрғақшылық орын алса, ал басқаларында тым көп жауын-шашын түсуі мүмкін.

## Планетаның климаттық теңгерімін бұзудағы МНП рөлі

Тығызырақ бұлттар атмосфераның төменгі қабаттарында жылуды ұстап қалады, көрпе сияқты жылулық сәулеленудің бір бөлігін сіңіріп, оны Жер бетіне қайтарады. Бұл жылудың ғарыш кеңістігіне шығуын азайтып, атмосфераның жылынуына ықпал етеді. Температураның жоғарылауы мұхиттардан судың қосымша булануына әкеледі, ал атмосферадағы ылғалдың артуы одан әрі жылынуды күшейтеді. Бұл — тұйық шеңбер. Айта кету керек, әрбір бір градусқа жылынғанда ауадағы ылғал мөлшері шамамен 7%-ға артады<sup>174</sup>, ал найзағайлардың жиілігі 12%-ға көбейеді<sup>175</sup>.



Кевин Тренберт, АҚШ-тың Ұлттық атмосфералық зерттеулер орталығының (NCAR) еңбек сіңірген климатологы, МГЭИК баяндамаларының жетекші авторы, былай деп атап өтеді: **«Температураның жоғарылауы мен атмосферадағы су буының мөлшерінің артуы оның тұрақсыздығын күшейтеді. Бұл конвекцияның күшеюіне және дауылдар санының артуына әкеледі. Олардың кейбірі, ең күштілері, найзағайлы дауылдарға айналады. Мұндай жағдайларда күшті найзағайлы дауылдардың пайда болу қаупі артады.**

**Найзағайлы дауылдар бірігіп, өзара әрекеттесе бастағанда, тропикалық дауылдардағыдай, олар одан да қуатты урагандарға айналуы мүмкін. Осы факторлардың барлығы қосылып, дауылдар мен күшті найзағайлардың, әсіресе бұршақ тудыратын және кейбір жағдайларда торнадоға әкелуі мүмкін суперұшықты дауылдардың қаупін арттырады».**

Осылайша, мұхиттың шектен тыс қызуы, атмосферадағы электр мен жылудың артық мөлшері климаттық жағдайды ушықтырып, күшті найзағайлар, урагандар, найзағай разрядтары және спрайттар сияқты неғұрлым жойқын климаттық құбылыстарға әкеледі.

Атмосферадағы пластик қоршаған ортаны ластап қана қоймай, бұлттар мен жауын-шашынның қалыптасуына әсер ете отырып, климаттық процестерді де өзгертеді. Ол атмосферадағы электростатикалық зарядты күшейтеді, су буының конденсациясын жеделдетеді және бұлттардың тығыздығына әсер етеді, бұл дауылдар, найзағайлар және басқа да жойқын табиғи құбылыстардың қарқындылығының артуына әкелуі мүмкін. Біз бұл әсердің климатқа тигізетін ауқымды салдарын түсіну шегінде тұрмыз, сондықтан мұхиттар мен атмосферадағы пластик бөлшектерімен ластануды азайту үшін шұғыл әрі кешенді шаралар қажет.

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

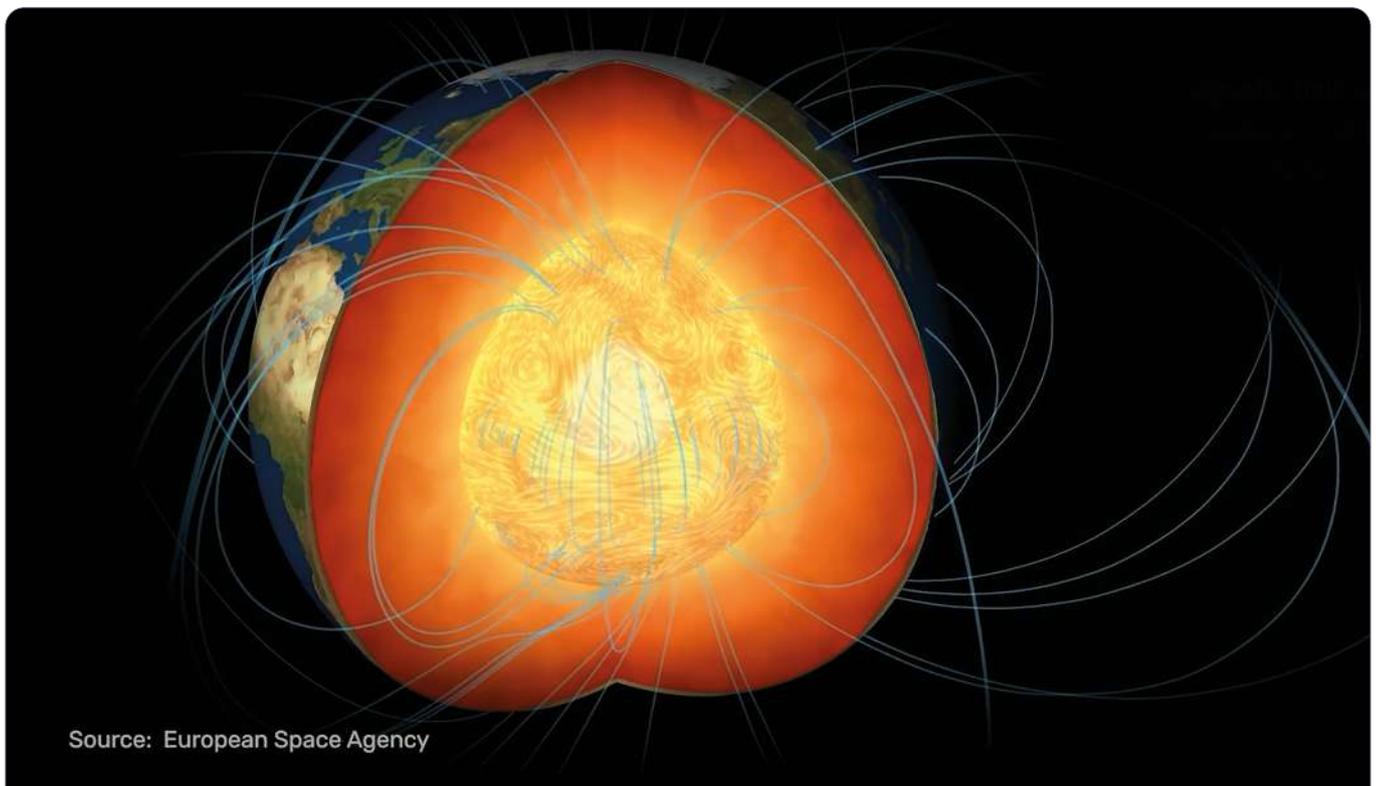
<https://science.nasa.gov/earth/climate-change/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifies-earths-greenhouse-effect>

<sup>175</sup> 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>

## Мұхиттың Жердің магниттік өрісімен әрекеттесуі

Мұхиттар Жер бетінің шамамен 70%-ын алып жатыр және олар тек алып су қоймалары ғана емес, сонымен қатар планетадағы күрделі электрлік процестердің маңызды элементтері болып табылады. Олар Жердің магнит өрісімен өзара әрекеттесіп, оның электромагниттік процестеріне қатысады.

Жердің магнит өрісі планетаның бетін күн желі мен ғарыштық сәулеленуден қорғайды, табиғи қалқан қызметін атқарады. Бұл өріс болмаса, атмосфера жойылар еді. Геомагниттік өріс планетаның терең қабаттарында түзіледі: металдардан тұратын сұйық сыртқы ядро қатты ішкі ядроның айналасында қозғалып, табиғи генераторды қалыптастырады. Бұл процесс геодинамо деп аталады (65-сурет).



Source: European Space Agency

**65-сурет.** Геомагниттік өрістің түзілу процесінің сызбалық көрінісі: Жердің сұйық сыртқы ядросы қатты ішкі ядроның айналасында айналып, табиғи генератор – геодинамоны қалыптастырады, соның нәтижесінде планетаның магнит өрісі пайда болады

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

Жердің магнит өрісі мұхиттар мен атмосферадағы электрлік құбылыстармен өзара әрекеттеседі. Теңіз суы құрамындағы тұздар мен еріген иондардың арқасында жоғары электрөткізгіштікке ие, бұл оған электр тогын өткізуге мүмкіндік береді. Ал бұл токтар магнит өрісімен әрекеттесіп, планеталық магнит өрісінің динамикасында маңызды рөл атқаратын күрделі электромагниттік процестерді тудырады.

Алдыңғы бөлімде қарастырылғандай, мұхиттардың, әсіресе микро- және нанопластикпен ластануы судың химиялық және электрлік қасиеттерін өзгерте алады. Ластаушы заттардың концентрациясы неғұрлым жоғары болса, табиғи электромагниттік процестер соғұрлым қатты бұзылады.

Ластанған судың булануы кезінде микроскопиялық тамшылар мен аэрозольдер микро- және нанопластикті, ауыр металдарды<sup>176</sup> және басқа заттарды атмосфераға жеткізе алады, бұл жергілікті электромагниттік процестерге әсер етуі мүмкін. Бұл магнит жанында орналасқан металдық объект сияқты, магнит өрісінің таралуын өзгертіп, оның белгілі бір аймақтағы күшін әлсірететін құбылысқа ұқсайды.

Мұхиттардың ластануының Жердің магнит өрісіне әсерін одан әрі зерттеу қажет, әсіресе жаһандық климаттық өзгерістер контекстінде. Бұл процестерді түсіну олардың климаттық жүйеге және планетаның экожүйелеріне ықтимал әсерін бағалауға көмектеседі.



---

<sup>176</sup>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>

## МИКРО- ЖӘНЕ НАНОПЛАСТИКТИҢ АДАМ ДЕНСАУЛЫҒЫНА ӘСЕРІ



**«Пластик тек мұхиттарымыз мен су жолдарын лаптап, теңіз тіршілігін жойып қана қоймайды — ол бәріміздің ағзамызда бар және біз пластик тұтынудан қаша алмаймыз. Бұл дағдарыспен күресу үшін жаһандық әрекет шұғыл қажет.»**

WWF International бас атқарушысы  
Марко Ламбертини

### МНП — XXI ғасырдағы эпидемиялардың дамуының жаңа қауіп факторы

Соңғы 30 жылда инфаркт, инсульт, қатерлі ісік, қант диабеті, аллергия және ішектің қабыну ауруларының үздіксіз өсуі байқалды. Иммунитеттің төмендеуі бүкіл әлемде балаларда да, ересектерде де көрініс табууда. Бедеуліктің таралуы өсуде. Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымының мәліметтері бойынша бедеулікпен ауыратын адамдар мен жұптардың саны туралы шектеулі деректерге қарамастан, бедеулік<sup>177</sup> ересектердің шамамен 17,5% немесе әлемдегі әрбір алтыншы адамға әсер етеді.

2010 жылдан бастап адамдардың интеллектуалдық қабілетінің төмендеуі байқалды. Тіпті дамыған елдердің өзінде ересектердің 25% қарапайым математикалық есептерді шеше алмайды; мысалы, АҚШ-та бұл көрсеткіш 35%-ға жетеді. Зейінін жинақтау, логикалық ойлау, қарапайым есептерді шешу қабілеті төмендейді. Деменцияның және когнитивті бұзылыстың әртүрлі түрлерінің таралуы өсуде<sup>178</sup>.

Психикалық бұзылулардың өсуі соматикалық аурулардың өсуінен асып түседі<sup>179</sup>. Мазасыздықтың бұзылуы, аутизм, депрессия, биполярлық бұзылыс, зейін тапшылығы гиперактивтілігінің бұзылуы (СДВГ) пандемиялық ауқымға ие болуда.

Көптеген деректер микро- және нанопластиктердің әртүрлі аурулардың патогенезіне қатысы бар екенін көрсетеді.

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

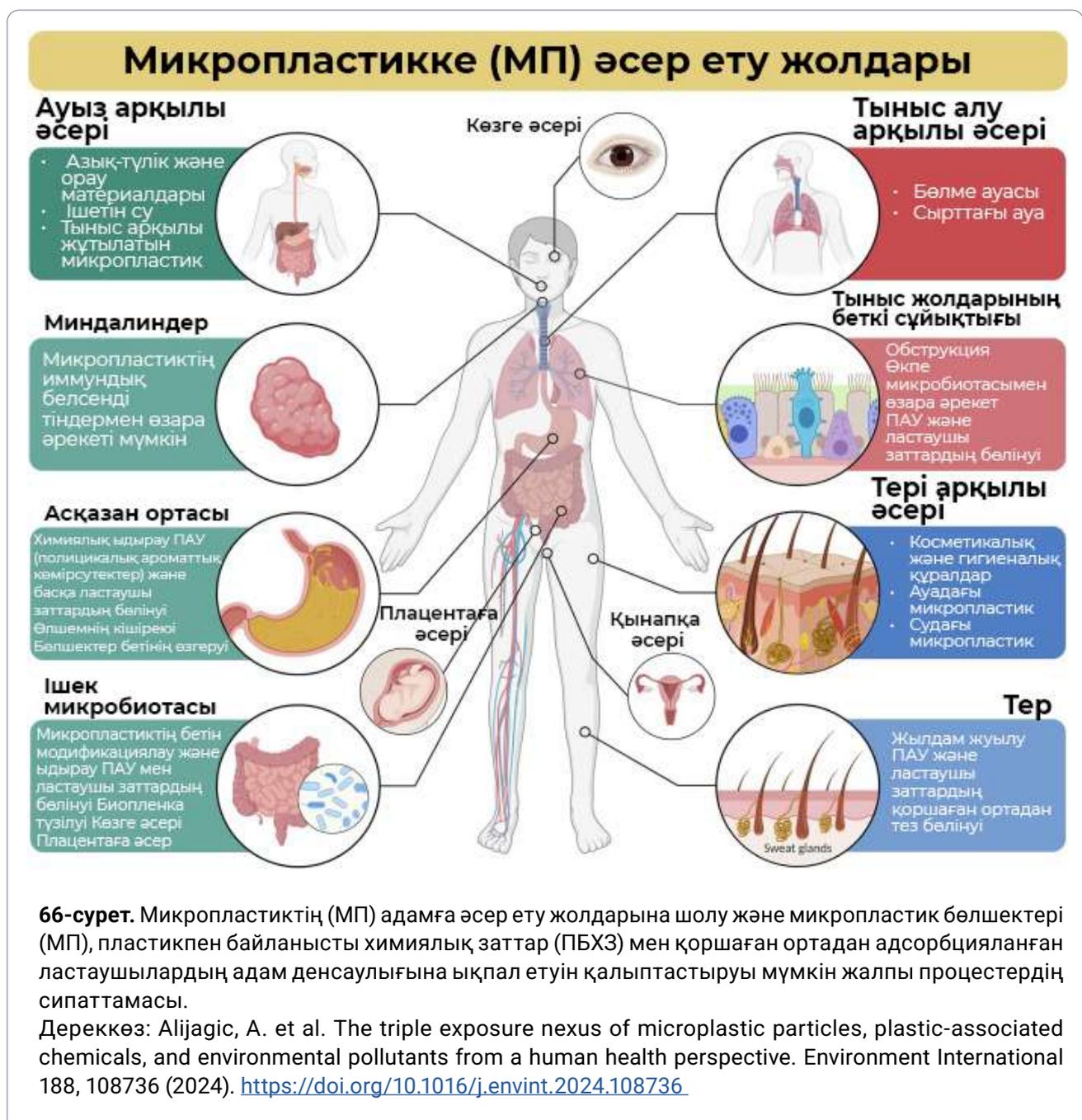
<https://www.who.int/news/item/04-04-2023-1-in-6-people-globally-affected-by-infertility> (Accessed May 1, 2025).

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

<sup>179</sup> 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).

## МНП улы әсерінің молекулалық механизмдері. ДНҚ, митохондрия және жасуша мембраналарының зақымдануы

Микро- және нанопластик (МНП) – қоршаған ортаның антропогендік ластануының ең кең таралған түрлерінің бірі. Физикалық-химиялық қасиеттерінің арқасында пластик бөлшектері географиялық және экологиялық кедергілерді еңсеріп, үлкен қашықтықтарға тарала алады. Микро- және нанопластиктің адам ағзасына түсуінің негізгі жолдары – оны сумен және тағаммен бірге жұту, ауамен бірге тыныс алу және тері арқылы ену (66-сурет)<sup>180</sup>.



<sup>180</sup>Bora, 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>

«Пластикалық ластанудың салдары: микро- және нанопластик (МНП) планеталық дағдарыстың жаңа факторы ретінде» бөлімінде айтылғандай, теңіз ортасы екінші реттік микропластиктің елеулі көзі болып табылады. Бағалауларға сәйкес, теңіз желдері жыл сайын жағалаудағы аудандарға шамамен 136 мың тонна микропластиктерді тасымалдайды. Сонымен қатар, урбанизацияланған аудандардағы ашық су объектілері, соның ішінде ағынды сулар мен жаңбыр сулары жүйелері пластикалық бөлшектердің жинақталуының және одан әрі таралуының маңызды орталықтарына айналуға, олардың мөлшері бұрынғы бағалаудан 90%-ға асуы мүмкін.

Азық-түлік өнімдері адам ағзасына түсетін МНП үшін маңызды жол болып табылады. Өсімдіктер тамыр жүйесі арқылы нанопластиктерді жинақтай алады: суару кезінде немесе жауын-шашын кезінде бөлшектер топыраққа еніп, сумен бірге сіңіріледі, ксилема бойымен қозғалады және жапырақтар мен жемістердің тіндерінде жиналады<sup>181</sup>. Пластикалық бөлшектердің ең көп мөлшері алма, алмұрт, сәбіз және брокколи сияқты дақылдарда табылды.

Теңіз өнімдері де МНП тасымалдаудың бір жолы болып табылады. Теңіз ағзаларының микропластикті жұтуы трофикалық деңгейлердің барлығында байқалады. Ньюкасл университетінің зерттеуіне сәйкес, орташа адам жылына шамамен 250 грамм микропластик тұтынуы мүмкін, бұл аптасына шамамен 5 граммға — бір пластик карта массасына тең. Сонымен қатар, пластик контейнерлерді, оның ішінде балалар тағамына арналған ыдыстарды микротолқынды пеште қыздырған кезде, әрбір шаршы сантиметр беткейден тағамға 2 миллиардтан астам нано-бөлшек және 4 миллион микро-бөлшек пластик бөлінуі мүмкін.

Микропластик ауыз су құрамында кең таралған. Зерттеулер АҚШ-тағы су құбыры суының үлгілерінің 90 %-на дейін МНП бар екенін көрсетеді. Оның су жүйелеріне түсуінің негізгі жолдары — ағын сулары, өнеркәсіптік шығарылымдар және ауадағы пластикті ұстайтын атмосфералық жауын-шашындар. Ластанған су буланған кезде пластик бөлшектері атмосфераға көтеріліп, кейін жаңбырмен немесе қармен бірге қайтадан жерге түсуі мүмкін. АҚШ-тағы 11 ұлттық паркінде жүргізілген зерттеу барысында 14 ай ішінде жауын-шашынмен бірге 1000 тоннадан астам пластик бөлшектерінің түсуі тіркелді — бұл көлем 120 миллион пластик бөтелке жасауға жеткілікті.

Аэрозоль арқылы МНП-тің таралуы адам денсаулығына әсер ететін ең қауіпті тетіктердің бірі болып табылады. Пластик бөлшектері теңіздер мен су қоймаларының беткейінен көтеріледі, ауа массаларымен тасымалданып, атмосфералық аэрозольдің құрамдас бөлігіне айналады. Бағалауларға сәйкес, мегаполис жағдайында ересек адам екі сағаттық серуен кезінде 106 мыңға дейін микропластик бөлшектерін тыныс арқылы қабылдауы мүмкін, ал су айдындарына жақын аудандарда бұл көрсеткіш он есе артады.

<sup>181</sup>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>

Америкалық кардиология колледжінің конференциясында (ACC.25) ұсынылған жаңа зерттеу нәтижелері көрсеткендей, тамақ арқылы немесе тыныс алу жолымен байқамай қабылдануы мүмкін микропластикке ұшыраудың жоғары деңгейі созылмалы жұқпалы емес аурулардың таралуының артуымен байланысты. Зерттеу нәтижелері АҚШ-та шығыс және батыс жағалаудағы шығанақ маңындағы елді мекендерде, сондай-ақ кейбір көл жағалауларында қоршаған ортада микропластиктің жоғары концентрациясы гипертония, диабет және инсульт сияқты созылмалы жұқпалы емес аурулардың таралуымен байланысты екенін көрсетті.



**«Бұл зерттеу микропластиктің әсері жүрек-қантaмыр жүйесінің денсаулығына ықпал ететінін, әсіресе жоғары қан қысымы, диабет және инсульт сияқты созылмалы жұқпалы емес ауруларға әсер ететінін көрсететін бастапқы дәлелдер береді»,** – деді Сай Рахул Поннана, ғылым магистрі, Огайодағы Case Western Reserve медицина мектебінің зерттеу деректері жөніндегі ғылыми қызметкері және зерттеудің жетекші авторы. **«Біз талдауымызға 154 түрлі әлеуметтік-экономикалық және экологиялық сипаттамаларды енгізген кезде, микропластик созылмалы жұқпалы емес аурулардың таралуын болжау бойынша алғашқы ондыққа кіретінін күтпеген едік», – деп қосты ол.»**<sup>182</sup>

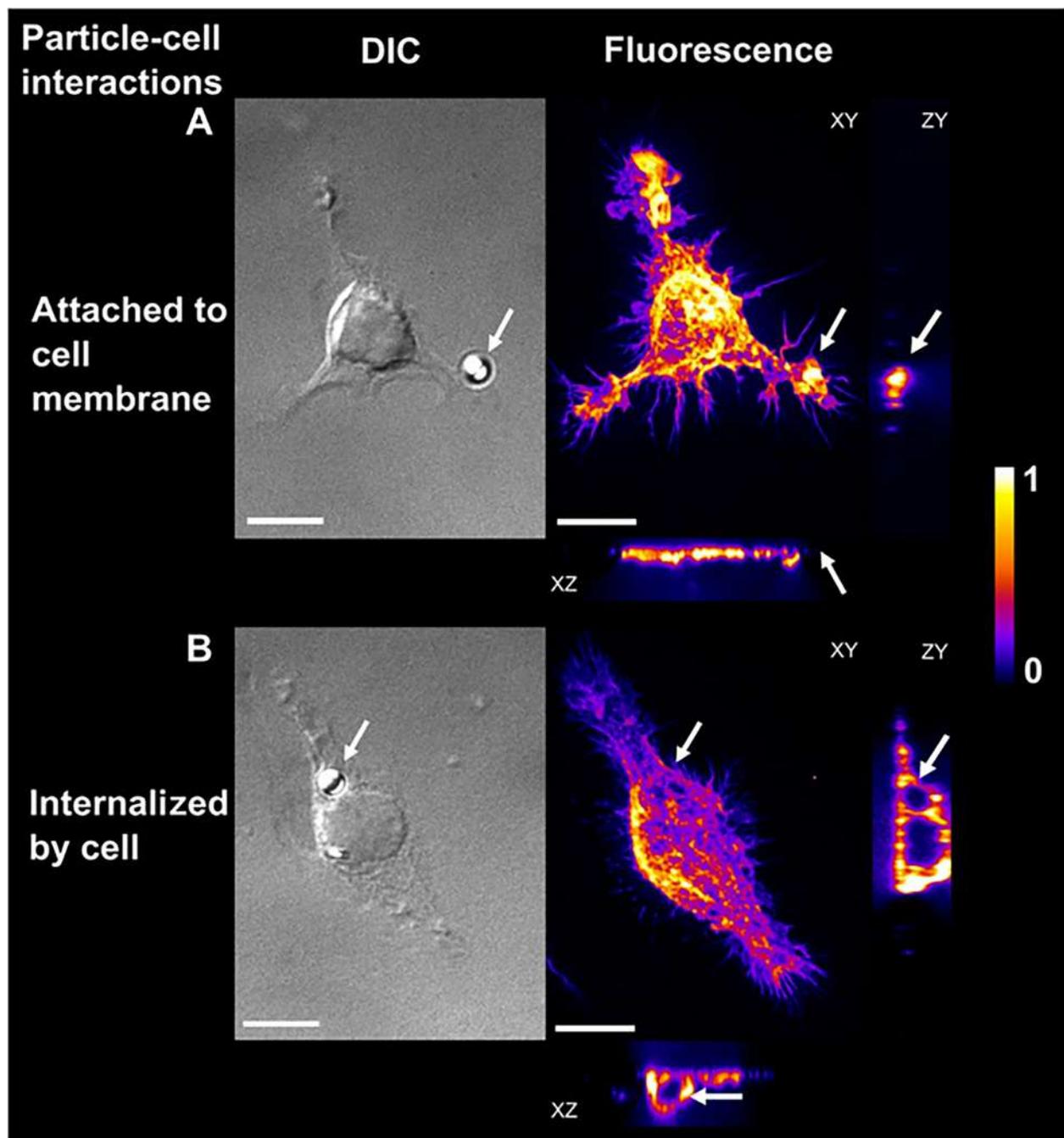
Микро- және нанопластик ішек, өкпе, ми және плацента тосқауылдары сияқты биологиялық тосқауылдардан өтіп кете алады<sup>183</sup>. Тұщы немесе теңіз суының әсеріне ұшыраған микропластиктің жасушаларға енуі оңайырақ болады (67-сурет), өйткені оның бетінде биомолекулалар шөгіп, жабынды түзеді. Бұл биомолекулалар микропластиктің асқорыту жолынан өтіп, тіндерге енуіне ықпал етеді. Мұндай қабық пластиктің жасушаларға енуін жеңілдететін тетік ретінде әрекет етеді, яғни ол троялық ат сияқты жұмыс істейді<sup>184</sup>.

<sup>182</sup>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).

<sup>183</sup>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>

<sup>184</sup>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>



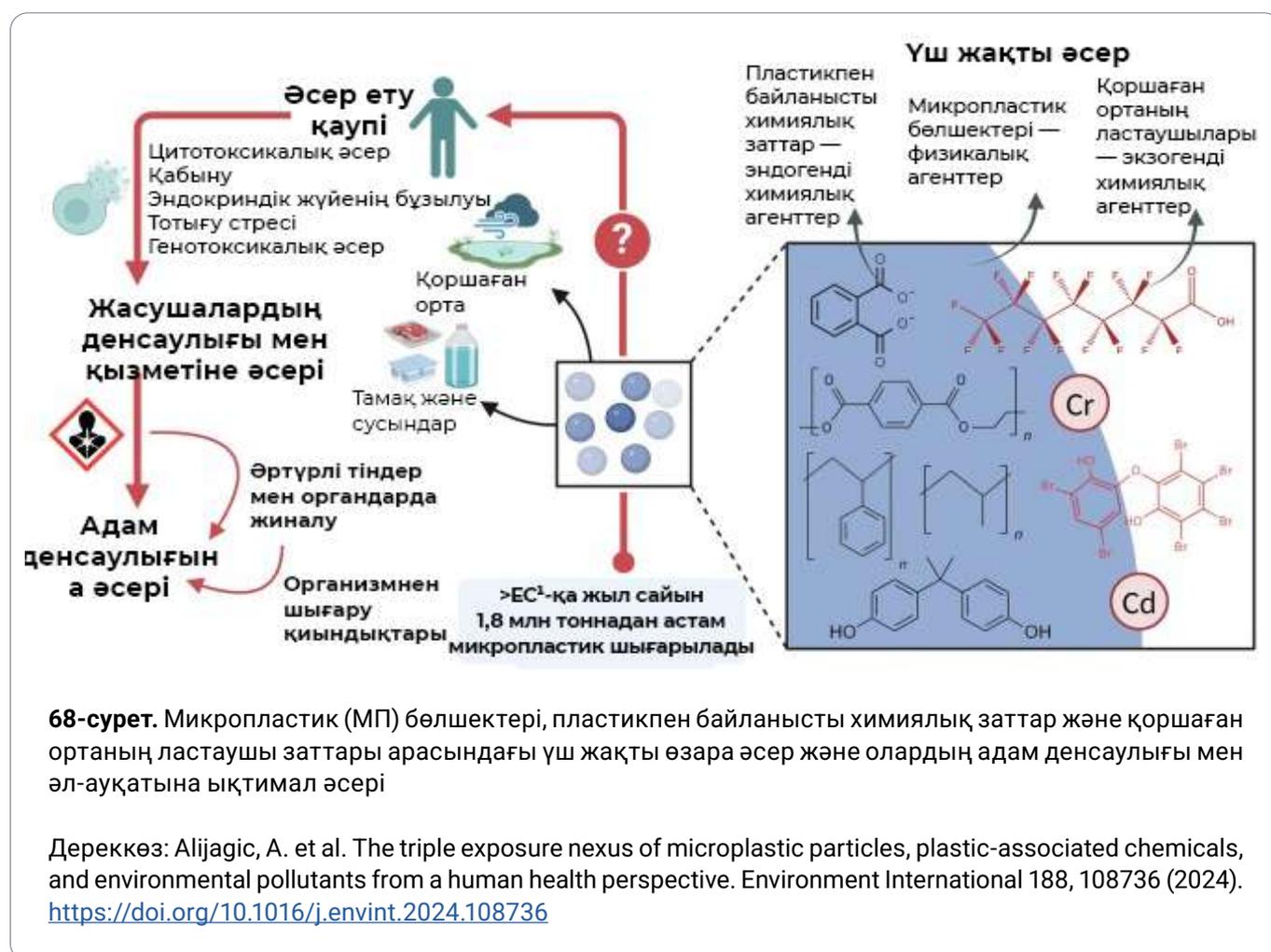
**67-сурет.** Тұщы суда 2 апта бойы болған микропластик бөлшектерінің жасушамен өзара әрекеттесуін бейнелейтін суреттер.

DIC: Бөлшектер мен жасушалардың өзара әрекеттесуін көрсететін дифференциалды-интерференциялық контрасты микроскопиялық суреттер. Флуоресценция: Жасушалардағы флуоресцентті боялған жіп тәрізді актинмен айналмалы диск конфокальді кескіндері (жалған түстердегі кескін, қарқындылықтың максималды проекциясы, шартты бірліктерді көрсетеді). XY, YZ және XZ жазықтықтарындағы үшөлшемді конфокальді кескіндердің проекциялары микропластик бөлшектерін (A) жасуша мембранасына жабысып тұрған және (B) жасуша ішіне енген бөлшектер ретінде ажыратуға мүмкіндік береді. Жебелер микропластик бөлшектерінің орнын көрсетеді. Масштаб сызықтары: 10 мкм.

Дереккөз: 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>

Микропластиктің уыттылығы көптеген факторларға байланысты: мөлшері, пішіні, беткі заряды, мүжілудің дәрежесі, әсер ету уақыты, қоспалардың құрамы және басқа да сипаттамалар<sup>185</sup>. Ұсақ бөлшектер жасушаларға оңайырақ енеді және айқынырақ тотығу стрессін тудырады. Микропластиктің беткі заряды — жасушалық сіңірілу тиімділігін анықтайтын негізгі параметр (адгезияға әсер етеді). Бұған қоса, микропластик оның теріс әсерін күшейтетін полимерлер мен әртүрлі қоспалардан тұрады<sup>186</sup>.

Микро- және нанопластик бөлшектері, пластик құрамындағы химиялық қосылыстар мен оның бетіне адсорбцияланған қоршаған ортаның ластаушы заттары адам денсаулығына кешенді<sup>187</sup> теріс әсерін тигізіп, айтарлықтай қауіп төндіреді (68-сурет).



**68-сурет.** Микропластик (МП) бөлшектері, пластикпен байланысты химиялық заттар және қоршаған ортаның ластаушы заттары арасындағы үш жақты өзара әсер және олардың адам денсаулығы мен әл-ауқатына ықтимал әсері

Дереккөз: Aljagic, 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>

<sup>185</sup>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>

<sup>186</sup>Aljagic, 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>

<sup>187</sup>Shanwei Government. Content on environmental health. Microplastics found in the human body for the first time, are they harmful to health? Here's the answer. [https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post\\_550539.html](https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post_550539.html) (Accessed May 1, 2025).

1 грамм микропластиктің құрамында 24 000 нанограммға дейін тұрақты органикалық ластаушы заттар<sup>187</sup> болуы мүмкін. Бұл заттар жоғары улылығымен ерекшеленеді, ағзаларда жиналып, тіпті өте аз мөлшерде де зиян келтіруі мүмкін.

Микропластик басқа ластаушы заттарды одан да зиянды етуі мүмкін<sup>188</sup>, себебі микропластиктің өзі және оның бетінде жиналған заттар басқа ластаушыларға жабысып қана қоймай, сонымен қатар олармен әрекеттесіп, олардың химиялық қасиеттерін өзгертуі мүмкін.

Зерттеулер микро- және микропластиктің әсері биологиялық ұйымдасу деңгейлерінің әртүрлі сатысында уытты әсерлерді тудыратынын көрсетеді:

- **Макромолекулалар деңгейінде:** ДНҚ-ның зақымдануы, ген экспрессиясының бұзылуы және ақуыздардың транскрипциясындағы өзгерістер.
- **Жасушалар мен органеллалар деңгейінде:** Жасушалық бөлінудің бұзылуы, цитоуыттылық, апоптоз, тотығу стрессі, метаболизмнің бұзылуы және жасуша ішіндегі кальций концентрациясының артуы.
- **Тіндер деңгейінде:** Қабыну процестері, фиброз және сүйек тінінің остеолізі.
- **Мүшелер деңгейінде:** Иммундық реакциялар, ағзалардың дисфункциясы, нейроуыттылық, канцерогенез, метаболизм мен энергетикалық тепе-теңдіктің бұзылуы.
- **Жануарлар мен адамдар популяциясы деңгейінде:** Тұқым беру қабілетінің төмендеуі, өсу қарқынының баяулауы, популяцияның азаюы.

Бұл әсерлер микро- және микропластиктің биологиялық жүйелерге көпдеңгейлі ықпалын көрсетеді<sup>189</sup>.

## 1. Жасушалық функциялардың бұзылуы

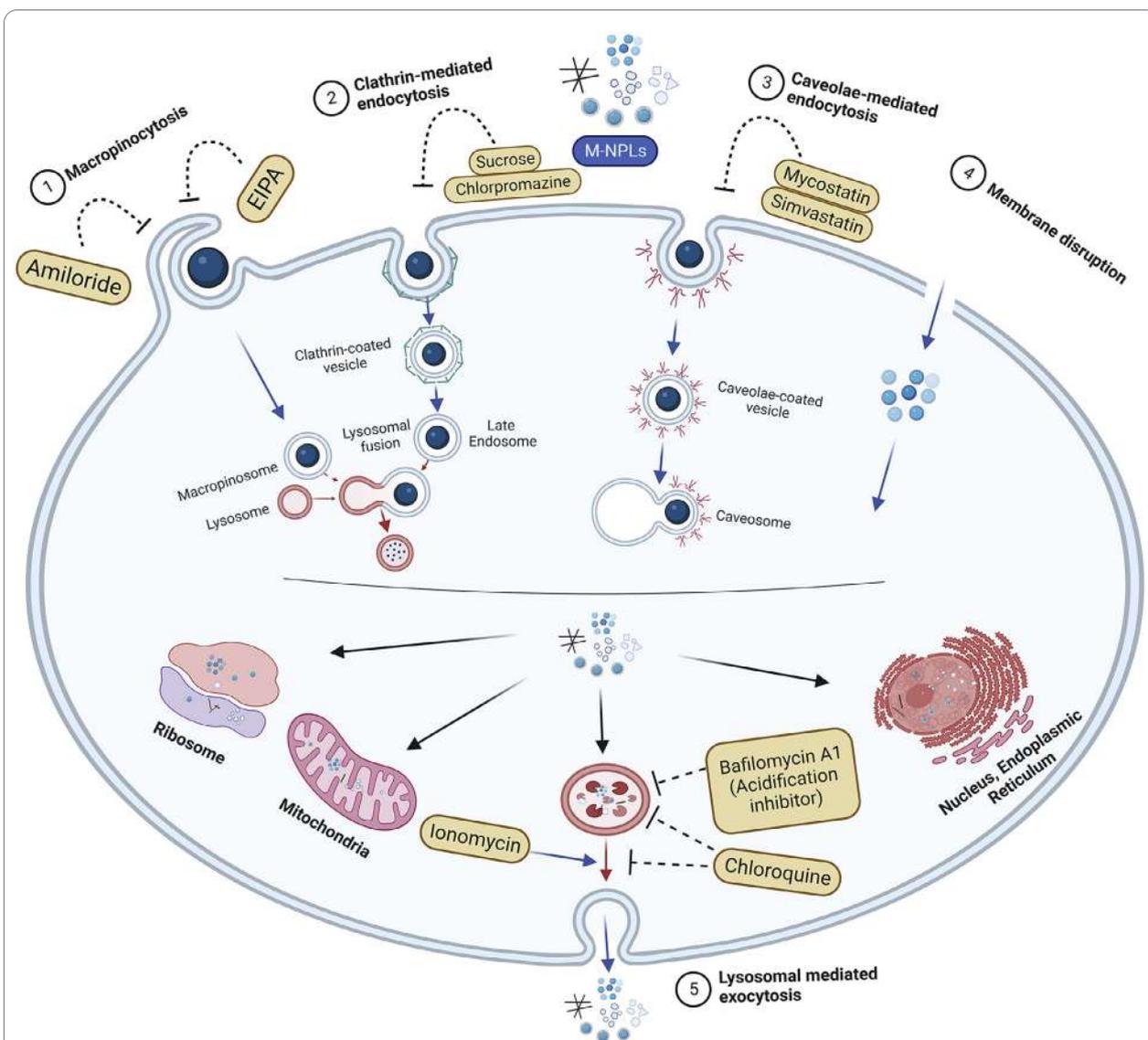
Ағзаның микро- және микропластиктің (МНП) әсерінен бұзылуы жасушалық деңгейден басталады<sup>190</sup>. МНП жасуша жарғақшаларымен әртүрлі механизмдер арқылы әрекеттеседі, соның ішінде сутектік және галогендік байланыстар, сондай-ақ гидрофобтық, ван-дер-ваальс және электростатикалық өзара әрекеттесулер бар. Дестабилизациялаушы фактор ретінде әрекет етіп, МНП жасуша жарғақшаларының тұтастығы мен жұмысын бұзады (69-сурет).

<sup>187</sup> Shanwei Government. Content on environmental health. Microplastics found in the human body for the first time, are they harmful to health? Here's the answer. [https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post\\_550539.html](https://www.shanwei.gov.cn/swbj/467/503/content/post_550539.html) (Accessed May 1, 2025).

<sup>188</sup> 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>

<sup>189</sup> 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>

<sup>190</sup> 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>



**69-сурет.** Жасушалық сіңіру және M-NPL шығару. M-NPL әртүрлі эндоцитоз түрлерін пайдаланады.

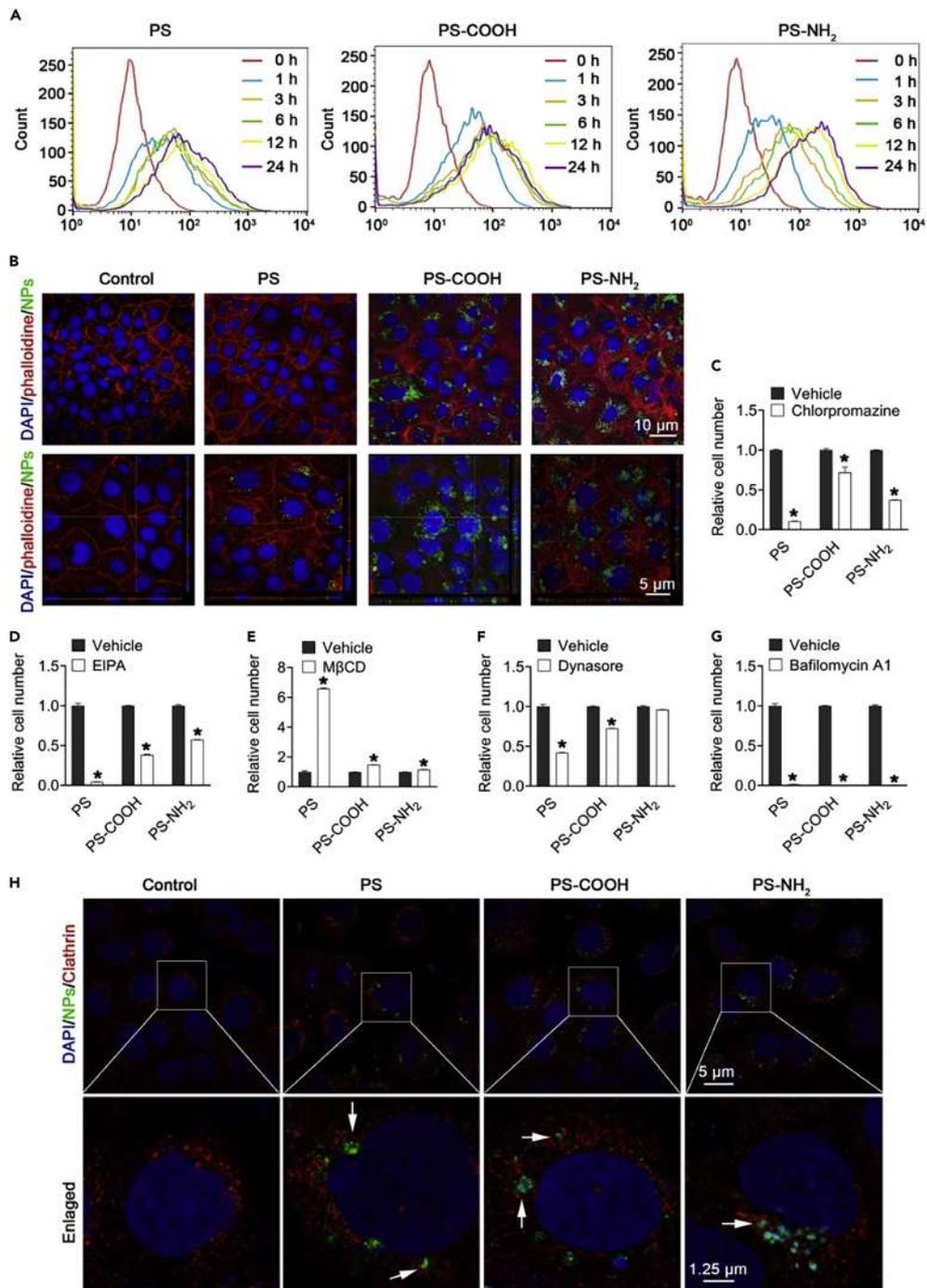
(1) Макропиноцитоз, (2) Клатрин арқылы жүретін эндоцитоз, (3) Кавеола арқылы жүретін эндоцитоз және жасуша мембранасын бұзу арқылы ішке ену. M-NPL жасушалардан (4) лизосома арқылы жүретін экзоцитоз жолымен босатылады.

Дереккөз: 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>

Өлшемдерінің өте кіші болуына байланысты микро- және нанопластиктер (МНП) адам жасушаларына оңай ене алады (70-сурет). МНП-тің шағын өлшемдері мен олардың бетінде жиналатын электростатикалық заряды ағзаға жүйелі әсер етуіне ықпал етеді<sup>191</sup>.

<sup>191</sup>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>



**70-сурет.** Сасо-2 жасушаларының нанопластиктерді (НП) интернализациялауы.

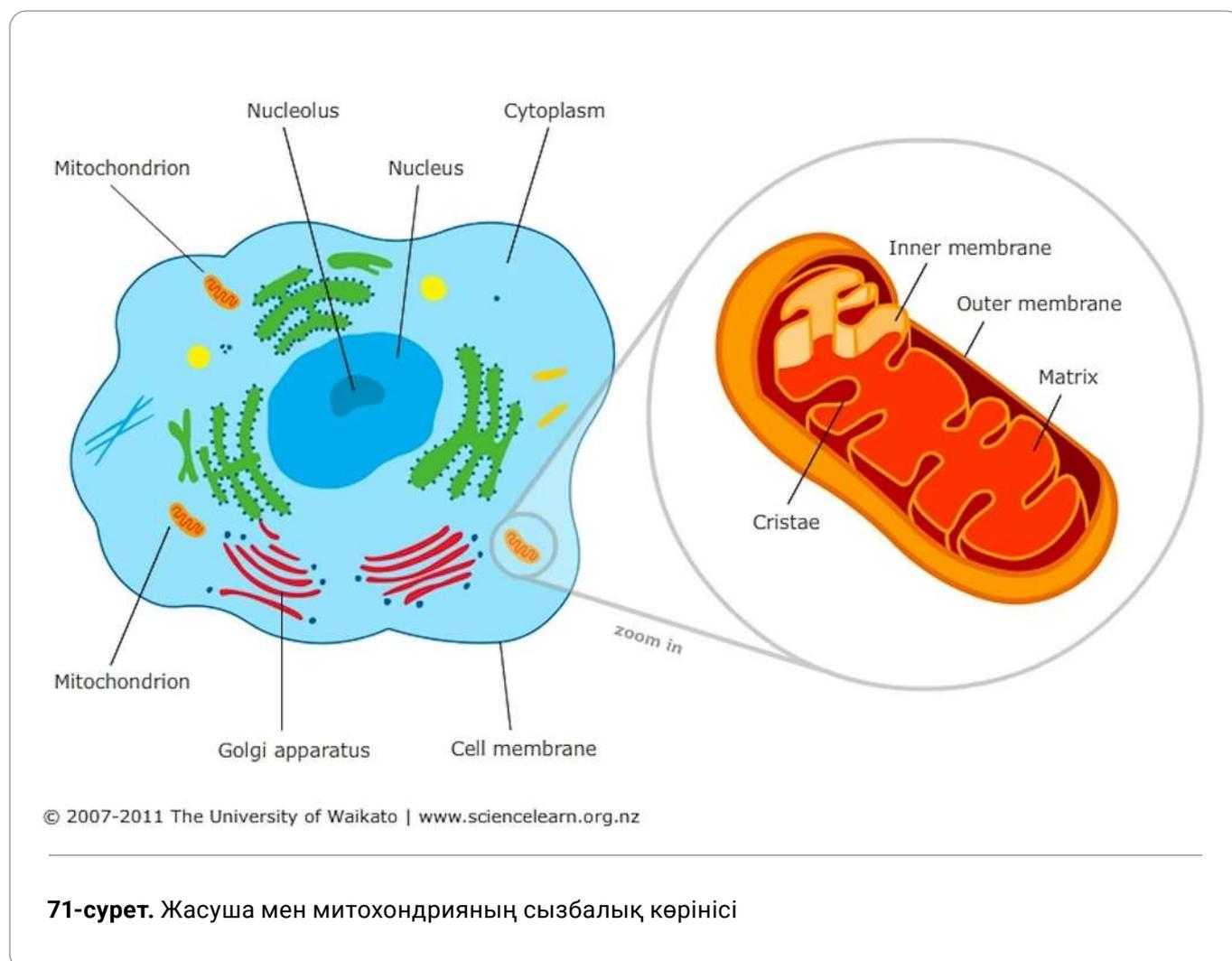
(А–G) Сасо-2 жасушаларымен НП интернализациясын ағымды цитометрия (А) және конфокальды микроскопия (В) көмегімен талдау. Сасо-2 жасушаларын хлорпромазинмен (С), ЕІРА (D), МβCD (E), динасор (F) және бафиломицин А1 (G) заттарымен 1 сағат өңдеп, кейін 24 сағат бойы НП-мен өңдегеннен кейінгі ағымды цитометриялық талдау. (H) Клатрин арқылы опосредияланған везикулалардағы НП локализациясы конфокальды микроскопия көмегімен зерттелді.

Дереккөз: 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>

Жасушалық деңгейдегі деструктивті әсердің негізгі тетігі — бұл жасуша мембранасының, митохондриялардың зақымдануы және ДНҚ құрылымының бұзылуы. Электростатикалық зарядталған микро- және нанопластик бөлшектері жасушалардың, әсіресе нейрондардың, мембраналық потенциалын тұрақсыздандырып, өздігінен электрлік сигналдардың пайда болуына, нейрондар арасындағы ақпарат алмасудың бұзылуына немесе жасушаның өліміне (апоптозға) себеп болады.

Жасуша ішінде нанопластиктің қиратушы әсерінің негізгі соққысы митохондрияларға — жасушаның тіршілігі мен қалпына келуін қамтамасыз ететін маңызды органеллаларға — тиеді (71-сурет). Митохондриялар «энергия станциясы» ретіндегі рөлінен бөлек, көпқызметті міндеттерді атқарады: олар ағзаның денсаулығын, күйзеліске төзімділігін, созылмалы аурулардың дамуын және қартаю үдерістерін айқындайды.



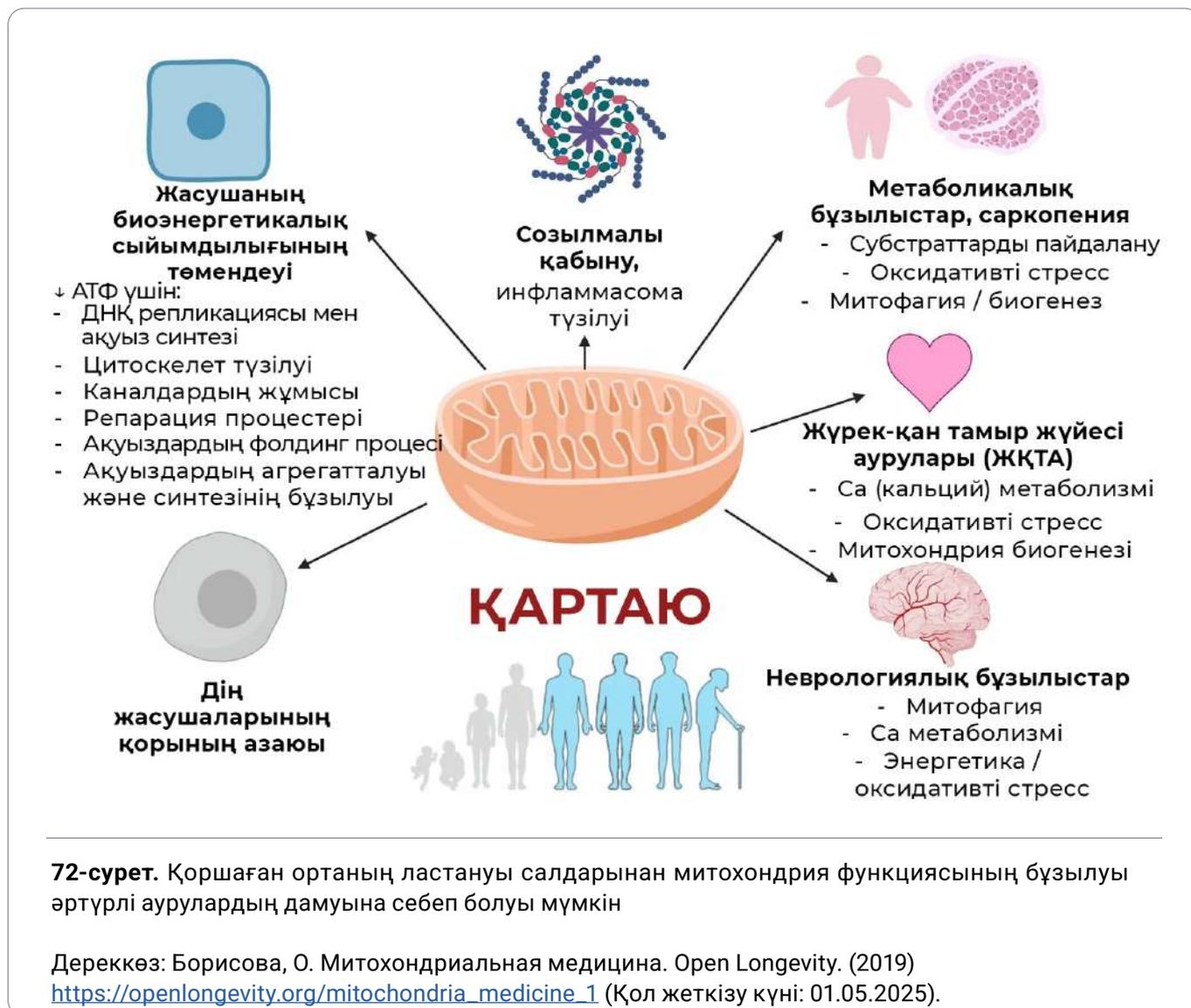
Митохондриялардың дұрыс жұмыс істеуі жасушалардың өмір сүруі, гомеостаз және биоэнергетика үшін шешуші маңызға ие. Митохондриялардың құрылымы мен функциясы митохондриялардың сапасын бақылау жүйесі арқылы қолдау табады, ол митохондриялық биогенез, митохондриялық динамика (қосылу/бөліну), митофагия және митохондриялық кеңейтілген ақуыз UPR МТ реакциясынан тұрады. Митохондриялардың дисфункциясы немесе зақымдануы нейродегенеративтік, жүрек-қан тамырлары, қартаюға байланысты аурулар, диабет және қатерлі ісік сияқты бірнеше адам ауруларының пайда болуына және прогрессіне байланысты. Экологиялық стресс пен ластаушы заттар митохондриялардың зақымдануға сезімталдығын күшейтіп, митохондриялық дисфункцияны тудыруы мүмкін. Микро- және нанопластиктердің митохондриялардың денсаулығы мен функциясына әсері туралы дәлелдер көбейіп келеді. МНП тотығу стрессі мен белсенді оттегі түрлерінің түзілуін тудыратыны, нәтижесінде митохондриялық мембрананың потенциалын өзгертетіні хабарланған. МНП адам организміндегі биологиялық кедергілерден өтіп, жасушаларға сіңіп, митохондриялық динамика, биоэнергетика және сигналдық жолдарды өзгертіп, жасушалық метаболизм мен функцияға әсер етуі мүмкін.

Митохондриялардың жасуша мен организмнің денсаулығындағы шешуші рөлін ескере отырып, МНП митохондриялардың денсаулығы мен функциясына елеулі қауіп төндіреді. Қолдағы деректер МНП ластану проблемасын шешудің шұғыл қажеттілігін көрсетеді, бұл тек қоршаған ортаны қорғау үшін емес, сонымен қатар адамның денсаулығын сақтау үшін маңызды<sup>192</sup>.

Митохондриялар барлық биологиялық процестерді — бұлшықет жиырылуынан және жүйке импульстарын беруден бастап гормондар синтезі мен жасуша бөлінуіне дейін — қамтамасыз ететін әмбебап энергия молекуласы болып табылатын АТФ-ты синтездейді. Олар көмірсулардың, майлардың және аминқышқылдарының алмасуына қатысады, сондай-ақ ағзадағы зат алмасу тепе-теңдігін сақтайды.

Митохондриялар жасушалық өлімді (апоптозды) бақылайды — бұл зақымданған немесе потенциалды қауіпті жасушалардың жиналуына жол бермейтін аса маңызды процесс. Бұл жүйедегі бұзылулар онкологиялық, аутоиммундық және нейродегенеративті аурулардың дамуына алып келеді. Сонымен қатар, митохондриялар антиоксиданттық қорғаныста басты рөл атқарады — олар оттегінің реактивті формаларының (ROS) деңгейін реттейді. Бұл жүйенің жұмысы бұзылған кезде жасушаларда зақымданулар жиналып, қартаю процесі жеделдейді және созылмалы қабынулар мен аурулардың даму қаупі артады (72-сурет).

<sup>192</sup>Yöntem, 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>



Митохондриялардың өздеріне тән ДНҚ-сы бар және ол ана жағынан беріледі, бұл оларды тұқым қуалайтын аурулардың бірегей қатысушылары етеді. Олар ядролық гендердің белсенділігін және жасушалардың сыртқы орта өзгерістеріне бейімделуін реттейді. Митохондриялар кортизол, эстрогендер мен тестостерон сияқты стероидты гормондардың синтезіне де қатысады. Нанопластиктің әсерінен митохондриялардың қызметінің бұзылуы – ағзаның жекелеген мүшелері мен жүйелерінің ғана емес, бүкіл ағзаның жұмысында ауыр және қайтымсыз болуы мүмкін патологиялық үдерістердің тізбекті дамуына негіз болады (1-кесте).

<b>Неврологиялық аурулар</b>	Паркинсон ауруы, Альцгеймер ауруы, Амиотрофиялық бүйірлік склероз (АБС), Эпилепсия, Мигрень, Митохондриялық энцефаломиопатиялар (мысалы, MELAS синдромы)
<b>Жүрек-қан тамырлары аурулары</b>	Кардиомиопатиялар, Жүрек жеткіліксіздігі, Атеросклероз (тотығу стрессі арқылы)
<b>Иммундық және қабыну аурулары</b>	Аутоиммундық аурулар (мысалы, жүйелі қызыл жег), Созылмалы қабыну жағдайлары (ROS пен цитокиндік сигналдардың дисфункциясы арқылы)
<b>Зат алмасу бұзылыстары</b>	2 типті қант диабеті, Семіздік, Метаболикалық синдром, Май қышқылдары мен лактат алмасуының бұзылыстары
<b>Онкологиялық аурулар</b>	Митохондрияның қызметінің бұзылуы кезінде жасушаларда мутациялар мен қатерлі трансформация қаупі артады
<b>Бұлшықет аурулары</b>	Митохондриялық миопатиялар, созылмалы бұлшықет әлсіздігі мен шаршау
<b>Сезім мүшелерінің аурулары</b>	Пигменттік ретинит, Лебердің көру нерві нейропатиясы (тұқым қуалайтын көру қабілетін жоғалту)
<b>Генетикалық митохондриялық синдромдар</b>	Лея синдромы, Kearns-Sayre синдромы, Барт синдромы

1-кесте. Митохондриялық дисфункциямен байланысты кейбір аурулардың шолуы

## МНП-тің ерте қартаю және онкогенез механизмдеріне қатысуы

Нанопластиктің әсері митохондриялардың жұмысына кедергі келтіріп, ағзаның генетикалық бағдарламаларын бұза отырып, ерте қартаюға себеп болуы мүмкін. Митохондриялардың зақымдануы оттегінің белсенді түрлерінің шамадан тыс түзілуіне әкеледі, бұл өз кезегінде тотығу стрессін туғызады. Мұндай стресс ДНҚ-ны зақымдайды, генетикалық тұрақтылықты бұзады, қабыну процестерін белсендіріп, тіндердің қартаюын жеделдетеді. Сонымен қатар, нанопластик теломерлердің қысқаруына ықпал етеді, бұл жасушалардың бөліну қабілетін шектейді.



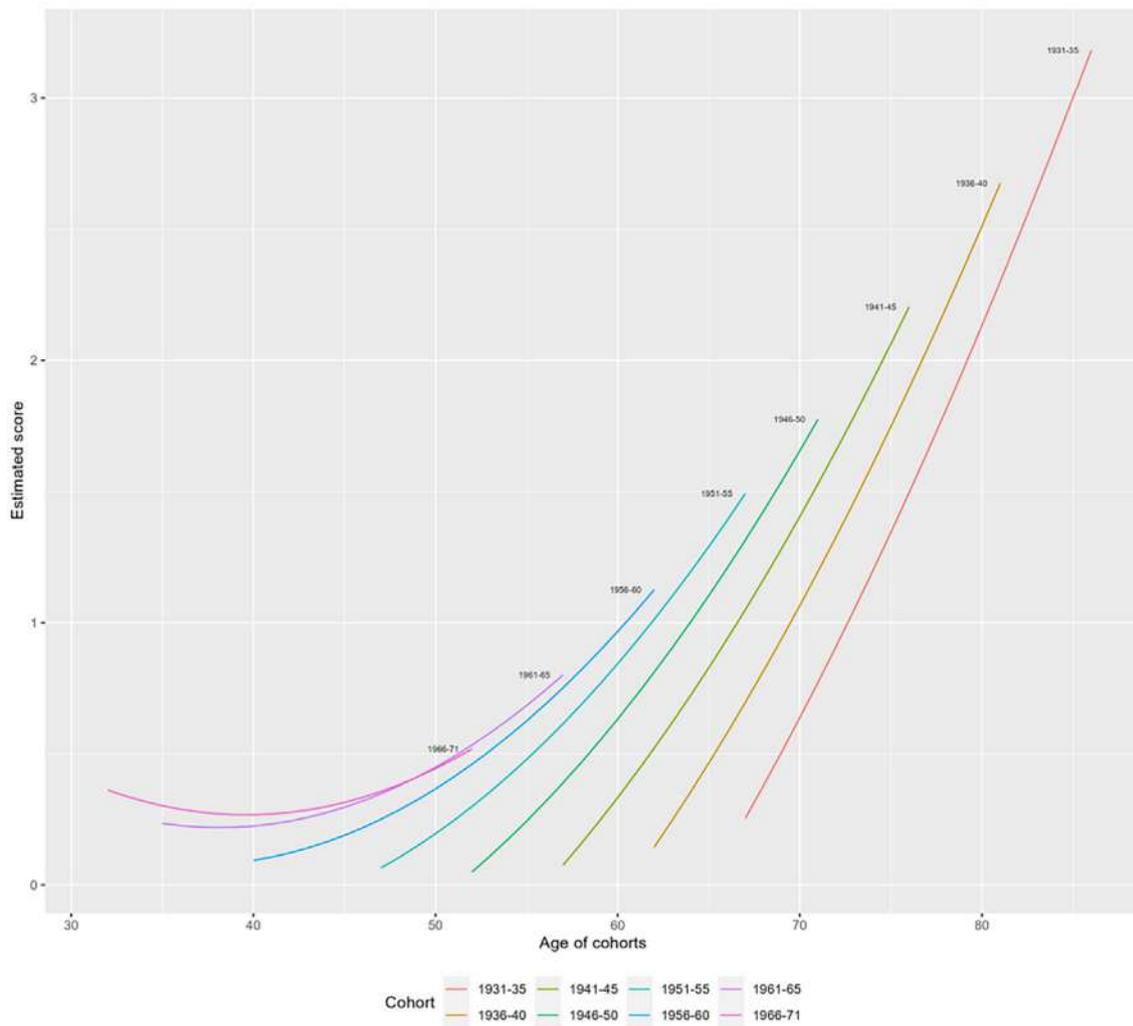
**«Біз, сондай-ақ, митохондриялардың жұмысын нашарлататын және бала кезінен байқалатын митохондрия ауруларымен байланысты митохондриялық ДНҚ-дағы бір ғана нуклеотидтік өзгеріс адам ағзасындағы қартаю үдерістерін жеделдетуі мүмкін екенін көрсете алдық»,** — деді Таошэн Хуан, медицина докторы, философия докторы, UB Джейкобс медицина және биомедициналық ғылымдар мектебінің педиатрия кафедрасының генетика бөлімінің профессоры және меңгерушісі. **«Біз митохондриялардың дұрыс жұмыс істемеуінен туындайтын белсенді оттегі формалары уақыт өте келе ДНҚ-ның зақымдануын күшейтетінін анықтадық.»**<sup>193</sup>

Эпигенетикалық қартаю — бұл ДНҚ-ның өз құрылымын өзгертпестен, гендердің қосылуы мен ажыратылуына әсер ететін гендердің реттелуіндегі өзгерістер. Бұл қартаюдың қалыпты қарқынынан баяу немесе жылдам жүруі мүмкін нәзік «молекулалық таймер». Митохондриялық ДНҚ-ның жоғары белсенділігі эпигенетикалық қартаюдың жеделдеуімен байланысты. Кейбір адамдарда 20–30 жаста-ақ жасушалардың биологиялық жасы хронологиялық жасынан әлдеқайда үлкен болуы мүмкін. Бұл дегеніміз — ағза өз жасына қарағанда тезірек қартаяды.

Митохондриялық бұзылыстары бар адамдарда қарттыққа тән аурулар — деменция, жүрек-қан тамырлары аурулары, аритмия, жүрек жетіспеушілігі — жиі жас кезінде-ақ пайда болады. Шотландиялық ғалымдар адамның туған жылы неғұрлым кеш болса, оның 50 жасқа жеткенде сырқаттану қаупі соғұрлым жоғары екенін анықтады. Мысалы, 1956–1960 жылдары туған адамдарда, орта есеппен, аурулар 1951–1955 немесе 1946–1950 жылдары туғандарға қарағанда көбірек кездеседі<sup>194</sup> (73-сурет).

<sup>193</sup>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).

<sup>194</sup>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>



**73-сурет.** Когорт мен жас ерекшеліктері бойынша мультиморбидтіліктің болжамды көрсеткіштері

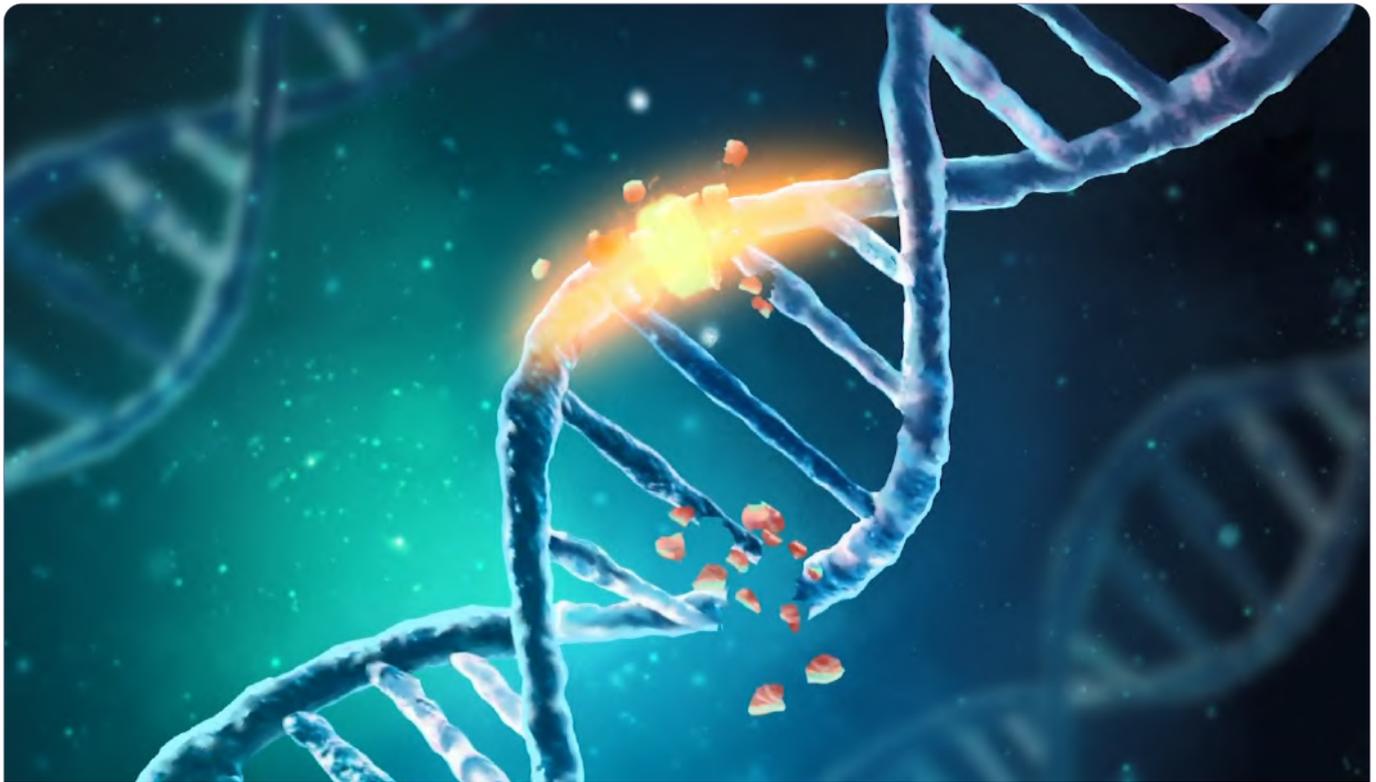
Дереккөз: Шотландское лонгитюдное исследование. Ribe, E., Cezard, G. I., Marshall, A. & Keenan, K. Younger but sicker? Cohort trends in disease accumulation among middle-aged and older adults in Scotland using health-linked data from the Scottish Longitudinal Study. *European Journal of Public Health*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

### Қартаю және қатерлі ісік кезіндегі митохондрия ДНҚ-сының мутациялары

Қартаю мен онкологиялық аурулардың дамуының негізінде жатқан түпкі механизмдер көбінесе ұқсас болып келеді. Орталық буындардың бірі – энергия өндіруге жауапты жасуша органоидтары – митохондриялардың қызметінің бұзылуы. Адам жасына қарай тіндерде митохондриялық ДНҚ-ның (мтДНҚ) мутациялары жиналады, және осындай өзгерістердің әртүрлі қатерлі ісік түрлерінде де бұрыннан байқалатыны анықталған<sup>195</sup>.

Жасушада мутация пайда болғанда, бұл оның қызметін өзгертуі мүмкін. Мысалы, жасуша тезірек өсе және бөліне бастайды, тіпті өлуі керек кезде де тірі қалады, иммундық жүйеге «көрінбейтін» болады, оттегі немесе қорек жетіспеушілігіне жақсы төзеді.

Мұндай жасушалар қалыпты жасушаларға қарағанда артықшылыққа ие болады – олар ұзағырақ өмір сүреді, жиі бөлінеді, көбірек кеңістікті алып, басқа жасушаларға үстемдік етеді. Осындай жасушалар көп жиналғанда, ісік дамуы басталуы мүмкін.



**74-сурет.** ДНҚ-ның мутацияларға алып келетін зақымданулары

Митохондриялық зақымдануларға әсіресе постмитоздық жасушалар – нейрондар, кардиомиоциттер және кейбір бұлшықет жасушалары – осал келеді. Бұл жасушалар бөлінбейді, сондықтан жас ұлғайған сайын жинақталған мутациялар, әсіресе митохондриялық ДНҚ-дағы (74-сурет), жасуша ішінде өмір бойы сақталып қалады.

<sup>195</sup>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>

Постмитоздық жасушалар — өте белсенді: нейрондар сигналдарды беру үшін көп энергия тұтынады, ал жүрек жасушалары үнемі қан айдайды. Бұл митохондриялардың шекті режимде жұмыс істеуіне алып келеді, нәтижесінде олар көп мөлшерде белсенді оттегі түрлерін өндіреді. Белсенді оттегі түрлері митохондрияларды зақымдайды, бұл өз кезегінде жаңа белсенді оттегі түрлерінің түзілуін күшейтіп, бұзылудың тұйық шеңберін іске қосады.

Зақымданулар жиналып, патологиялық үдерістердің (мысалы, нейродегенеративті, жүрек-қантамыр аурулары, онкологиялық аурулар) басталуына және тіпті өлімге әкелуі мүмкін.

Мүмкін, дәл осы себептен жүрек-қантамыр жүйесінің аурулары, инфаркт, инсульт және онкологиялық аурулар басқа барлық дертттермен салыстырғанда өлімнің негізгі себептері болып отыр. Ал нанопластиктің адам ағзасына уытты әсері соңғы 10–20 жылда бірнеше есе күшейіп, осы аурулардың жасарып, пандемия деңгейіне жетуін және жыл сайын ондаған миллион адамның өмірін қиюын түсіндіреді. Себебі, ең алдымен, нанопластик митохондрия жұмысының бұзылуына, тотығу стрессіне және митохондриялық пен ядролық ДНҚ-дағы мутацияларға себеп болады.

## МНП әсерінен гормоналды жүйенің тұрақсыздануы

Пластмасс өндіру кезінде қолданылатын химиялық заттар эндокриндік жүйенің жұмысына және гормондық тепе-теңдікке кері әсер етеді. Олар табиғи гормондардың әрекетін имитациялай алады, бөгей алады немесе өзгерте алады, бұл әртүрлі денсаулық мәселелеріне әкелуі мүмкін.

Адам ағзасында орау материалдарында қолданылатын 3000-нан астам химиялық зат анықталған<sup>196</sup>. Солардың шамамен 100-ге жуығы адам денсаулығына «жоғары қауіп төндіретін» заттар ретінде жіктеледі.

### Бисфенол

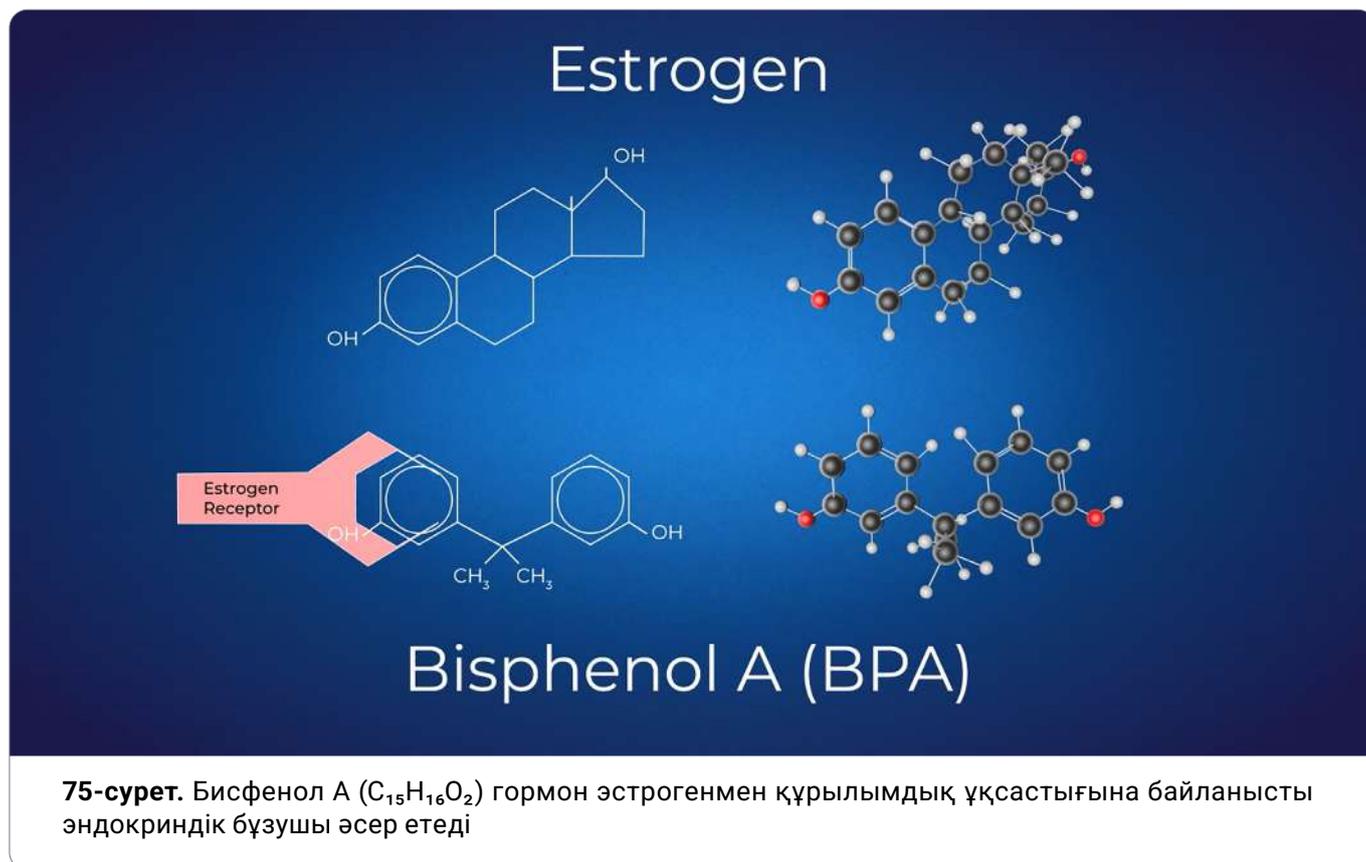
**Бисфенол А (BPA)** — поликарбонатты пластикте (бөтелкелер, контейнерлер), эпоксидті шайырларда (консерві банкаларының ішкі жабыны) және медициналық бұйымдарда кеңінен қолданылатын синтетикалық жұмсартқыш (пластификатор).

BPA (Бисфенол А) қыздырылған кезде тағам мен сусындардың құрамына өтеді.

<sup>196</sup>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>



«BPA әдетте осы жолға қатысатын табиғи гормонды ығыстырып шығару үшін “бақылаусыз” гормон ретінде әрекет етеді» — деді Мельбурн университетінің Химия мектебінің қоршаған орта химиясы жөніндегі маманы, профессор Ян Рэй (75-сурет)<sup>197</sup>.



Жыл сайын бүкіл әлем бойынша 8 миллион тонна бисфенол А өндіріледі және жылына 100 тонна биосфераға тасталады<sup>198</sup>.

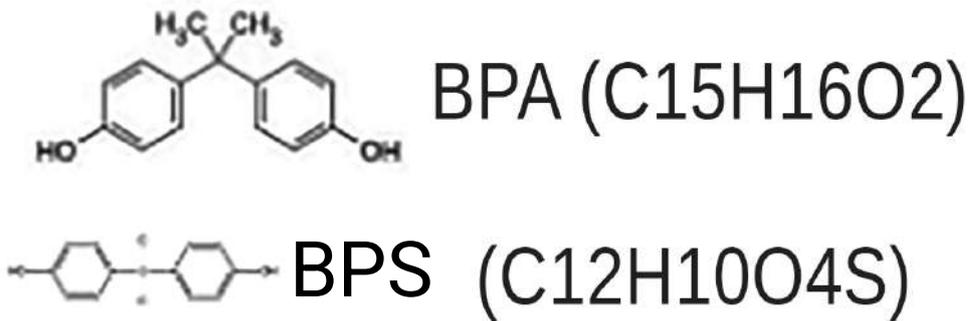
Зерттеулер BPA және оның орнын басатын бисфенол S (BPS) жүйке жүйесінде қоздырғыш және тежеуші сигналдардың үйлесуін бұзатынын көрсетеді<sup>199</sup>. Бұл екі қосылыс та жоғары концентрацияда ұқсас патологиялық әсерлерді туындатады (76-сурет). Ми жасушаларымен жүргізілген эксперименттер көрсеткендей, тіпті төмен дозадағы BPA/BPS бір ай бойы әсер еткен жағдайда да синапстар арқылы химиялық және электрлік сигналдардың берілуін өзгертеді<sup>200</sup>.

<sup>197</sup>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).

<sup>198</sup>Global Industry Analysts. Bisphenol A: Global strategic business report. Research and Markets. (2025) [https://www.researchandmarkets.com/reports/1227819/bisphenol\\_a\\_global\\_strategic\\_business\\_report](https://www.researchandmarkets.com/reports/1227819/bisphenol_a_global_strategic_business_report) (accessed 1 May 2025).

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

<sup>200</sup>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).



**76-сурет.** Бисфенол А (BPA) және бисфенол S (BPS) заттарының молекулалық құрылымдары мен химиялық формулалары

2023 жылы жүргізілген зерттеу нәтижесінде зейін тапшылығы мен гиперактивтілік синдромы бар балалардың ағзасында бисфенол А және фталат деңгейі бұл бұзылысы жоқ балалармен салыстырғанда жоғары екені анықталды<sup>201</sup>.

Мельбурн қаласындағы Флори неврология және психикалық денсаулық институтының ғалымдары жүктіліктің соңғы кезеңдерінде анасының ағзасында бисфенол А (BPA) деңгейі жоғары болған жағдайда, олардың ұл балалары үшін 11 жасқа дейін аутизмге шалдығу қаупі алты есе артатынын анықтады<sup>202</sup>.



**«BPA ер адамның ұрық миының гормондар арқылы реттелетін дамуын бірнеше жолмен бұзуы мүмкін, оның ішінде нейрогормондарды реттейтін және ер ұрығының миының дамуы үшін аса маңызды ароматаза деп аталатын негізгі ферменттің белсенділігін басу арқылы»,** – деді профессор Понсонби.

**«Бұл аутизм жұмбағының бір бөлшегі болуы мүмкін»<sup>197</sup>.**

Ароматаза ферментінің тежелуі аутизм кезіндегі жыныстық диспропорцияны түсіндіруі мүмкін: әрбір 1 қыз балаға 4–5 ұл бала<sup>203</sup>. Қыздарда аутизм сирек кездеседі, бірақ ол неғұрлым ауыр формада өтеді<sup>204</sup>.

Бисфенол А (BPA) 2-типтегі қант диабетінің дамуына да ықпал етеді, себебі ол гипергликемия мен инсулинге төзімділікті туындатады<sup>205</sup>. Қант диабетінен болатын өлім-жітім әлем бойынша үздіксіз өсіп келеді (77-сурет).

<sup>201</sup>EarthDay.org. Babies vs. Plastics Report. (2023) <https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know> (Accessed May 1, 2025)

<sup>202</sup>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>

<sup>203</sup>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>

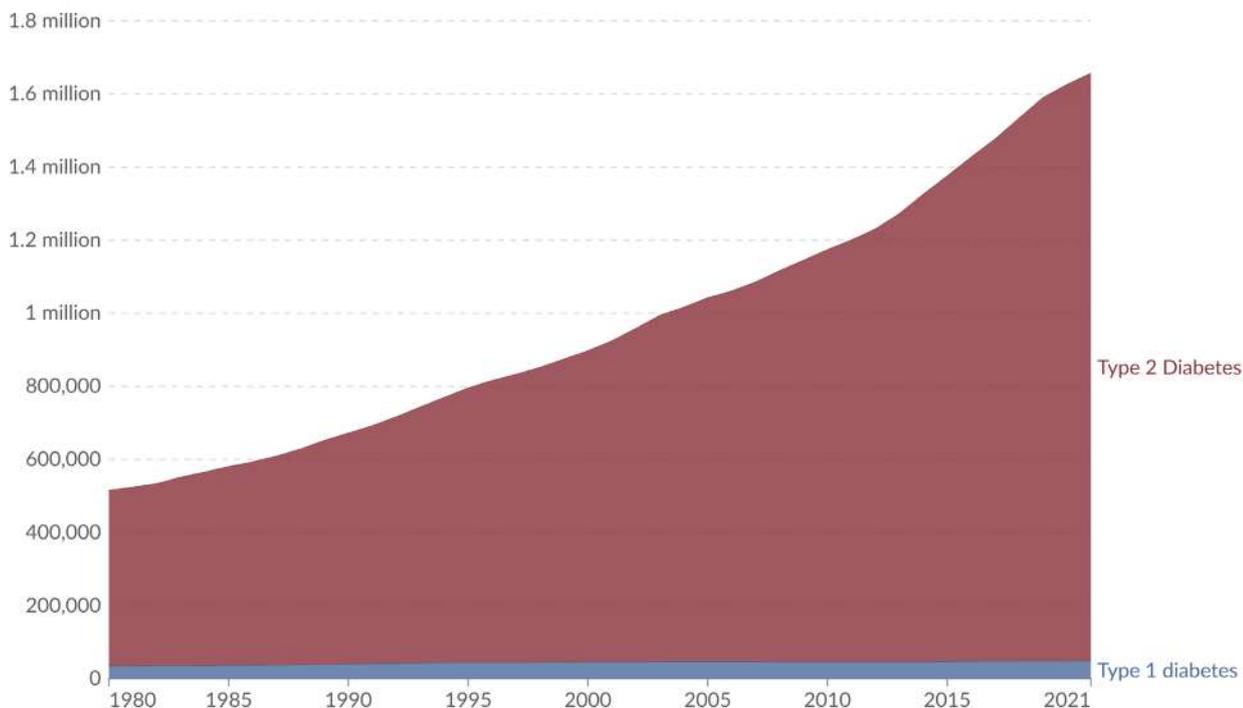
<sup>204</sup>Frazier, T. W., Georgiades, S., Bishop, S. L. & Hardan, A. Y. Behavioral and Cognitive Characteristics of Females and Males With Autism in the Simons Simplex Collection. Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry 53, 329–340.e3 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2013.12.004>

<sup>205</sup>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>

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

Our World  
in Data

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



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

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

**77-сурет.** Қант диабетінен өлім-жітім, түрлері бойынша, әлем. 1980–2021 жж.

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

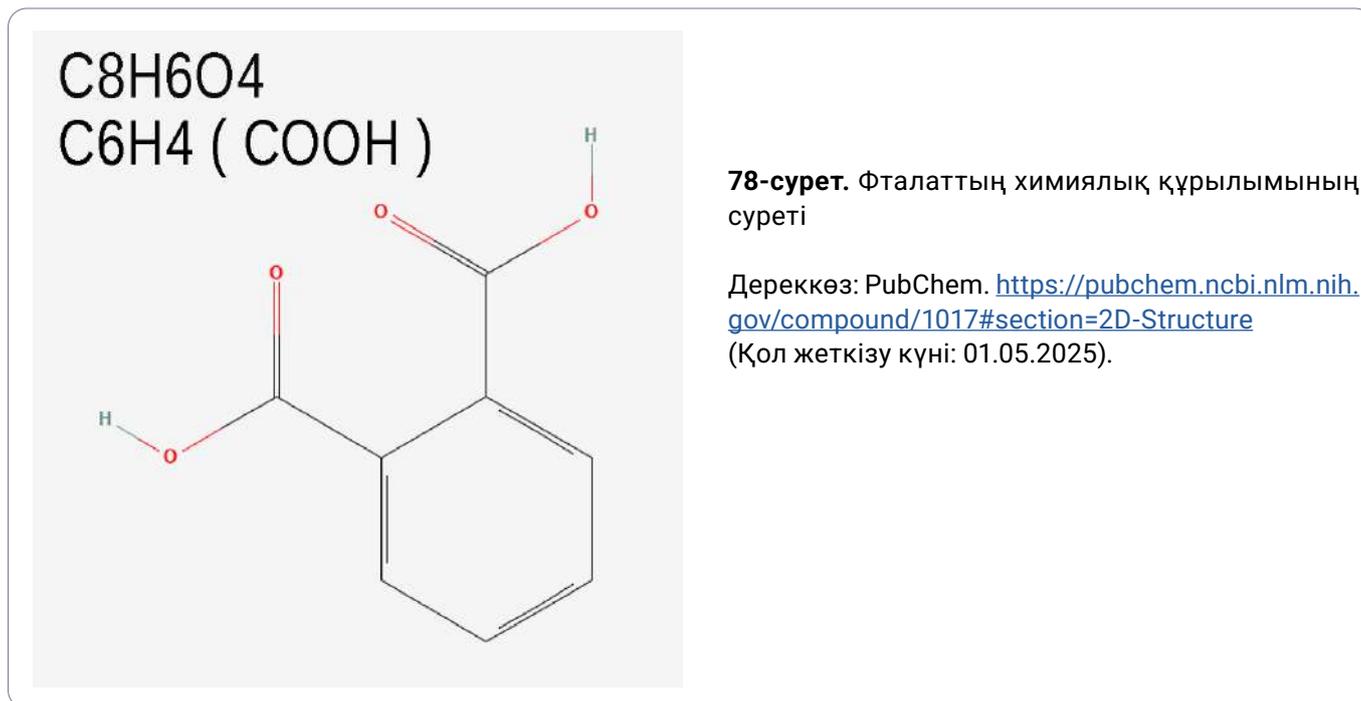
## Фталаттар

**Фталаттар** — негізінен пластификатор ретінде қолданылатын химиялық қосылыстар тобы. Пластификаторлар — поливинилхлорид (ПВХ) сияқты пластмассаларды икемдірек, жұмсағырақ және төзімдірек ететін заттар.

Фталаттар өнеркәсіпте де, тұрмыста да кеңінен қолданылады, алайда олардың эндокриндік жүйенің жұмысына араласу қабілеті алаңдаушылық туғызады<sup>206</sup>.

Молекулалық формуласы (78-сурет). Фталаттар гормондар болып табылмайды, бірақ олар андрогендердің (мысалы, тестостеронның) әсерін бәсеңдете алады, бұл әсіресе ер балалардың дамуы үшін маңызды. Олардың әсерінен сперматозоидтардың қозғалу белсенділігі төмендейді, жыныс мүшелерінің даму аномалиялары (мысалы, жаңа туған ұлдарда крипторхизм) байқалады. Белсіз деп танылған ер адамдардың ағзасынан фталаттардың жоғары концентрациясы анықталған.

<sup>206</sup>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>



Әйелдерде етеккір циклі бұзылып, түсік тастау және мерзімінен бұрын босану қаупі артады. Жүктілік кезіндегі ұрыққа әсері мидың дамуының баяулауына, IQ деңгейінің төмендеуіне және мінез-құлық мәселелеріне әкелуі мүмкін<sup>207</sup>.

Ғалымдар күнделікті тұтыну тауарларында кездесетін уытты химиялық заттар — қоршаған ортадағы фталаттар мен жатыр миомаларының (әйелдер арасында ең жиі кездесетін ісіктердің) есуінің артуы арасындағы себеп-салдарлық байланысты дәлелдеді<sup>208</sup>.

Пластиктегі фталаттардың әсері балалар арасында онкологиялық аурулардың даму қаупін 20 %-ға арттырады, оның ішінде сүйек ісігінің жиілігі үш есе, ал лимфомаға шалдығу екі есе артады<sup>209</sup>.

АҚШ-тағы 5000-нан астам ананы қамтыған зерттеу фталаттардың шала туған және салмағы төмен сәбилердің туылу қаупімен байланысын көрсетті<sup>210</sup>. Бұл факторлар нәресте өлімінің ықтималдығын біршама арттырады, сондай-ақ балалардың үлгеріміне, жүрек аурулары мен қант диабетінің даму қаупіне, сондай-ақ аутизм мен СДВГ сияқты психикалық бұзылыстарға әсер етуі мүмкін<sup>211</sup>.

<sup>207</sup> 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>

<sup>208</sup> 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>

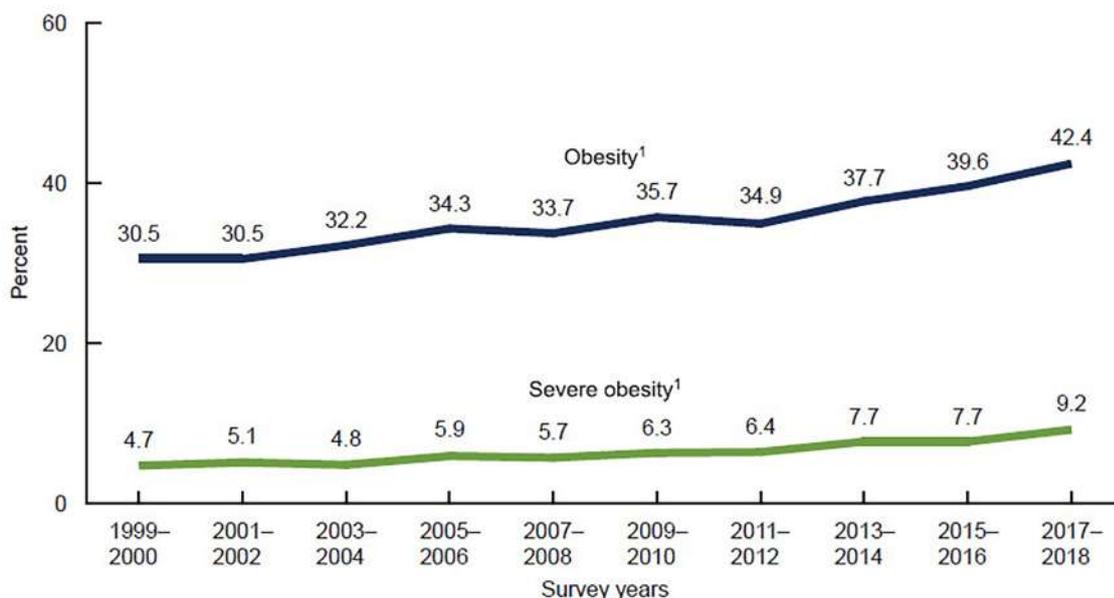
<sup>209</sup> Ahern, T. P. et al. Medication-Associated Phthalate Exposure and Childhood Cancer Incidence. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute* 114, 885–894 (2022). <https://doi.org/10.1093/jnci/djac045>

<sup>210</sup> 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)

<sup>211</sup> 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>

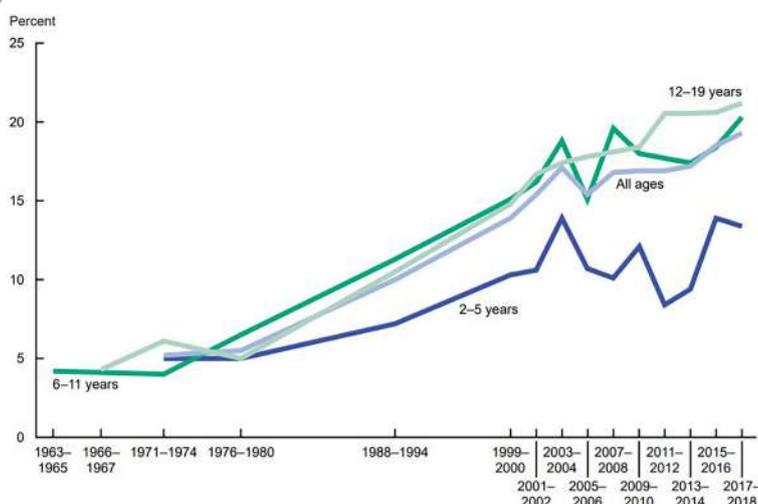
Пластиктердегі химиялық қоспалар семіздіктің дамуына ықпал етеді<sup>212</sup>. ДДСҰ (Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымы) деректеріне сәйкес, 1990–2020 жылдар аралығында әлем бойынша ересектер арасында семіздік деңгейі екі еседен астам, ал жасөспірімдер арасында төрт есеге артқан<sup>213</sup>.

АҚШ-тағы ересектер мен жастар арасындағы семіздік үрдістері (79-80-сурет).



**79-сурет.** 20 жастан асқан ересектер арасындағы семіздік пен ауыр семіздік деңгейінің таралу үрдістері (жасқа бейімделген көрсеткіштер): АҚШ, 1999–2000 және 2017–2018 жылдар.

Дереккөз: 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> (Қол жеткізу күні: 01.05.2025).



**80-сурет.** 1963–1965 жылдар мен 2017–2018 жылдары аралығындағы АҚШ-та 2–19 жас аралығындағы балалар мен жасөспірімдер арасындағы семіздік деңгейінің жас топтары бойынша өзгеру үрдістері.

Дереккөз: 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> (Қол жеткізу күні: 01.05.2025).

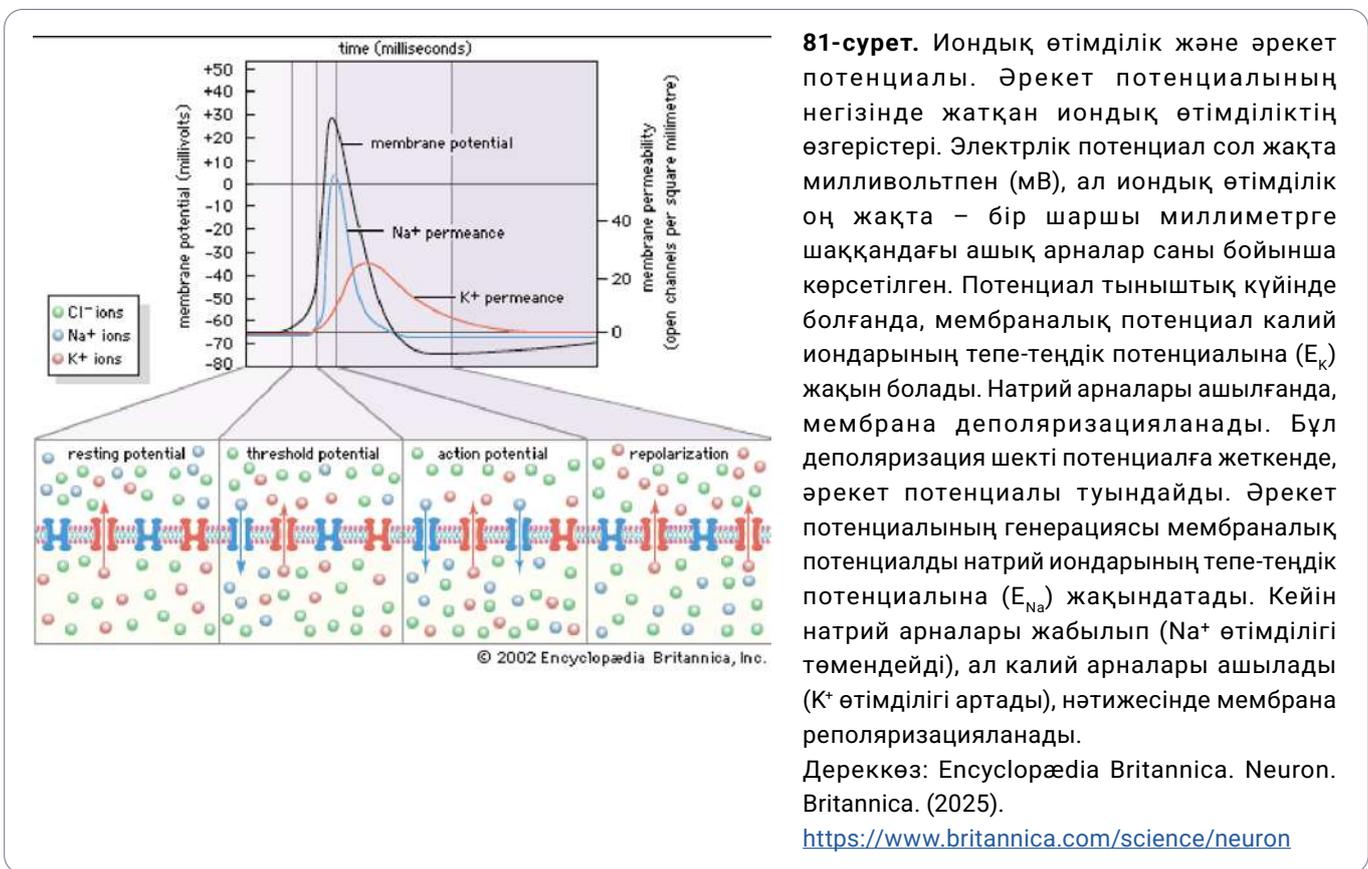
<sup>212</sup>Völker, J., Ashcroft, F., Vedø, Å., Zimmermann, L. & Wagner, M. Adipogenic Activity of Chemicals Used in Plastic Consumer Products. Environ. Sci. Technol. 56, 2487–2496 (2022). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06316>

<sup>213</sup>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).

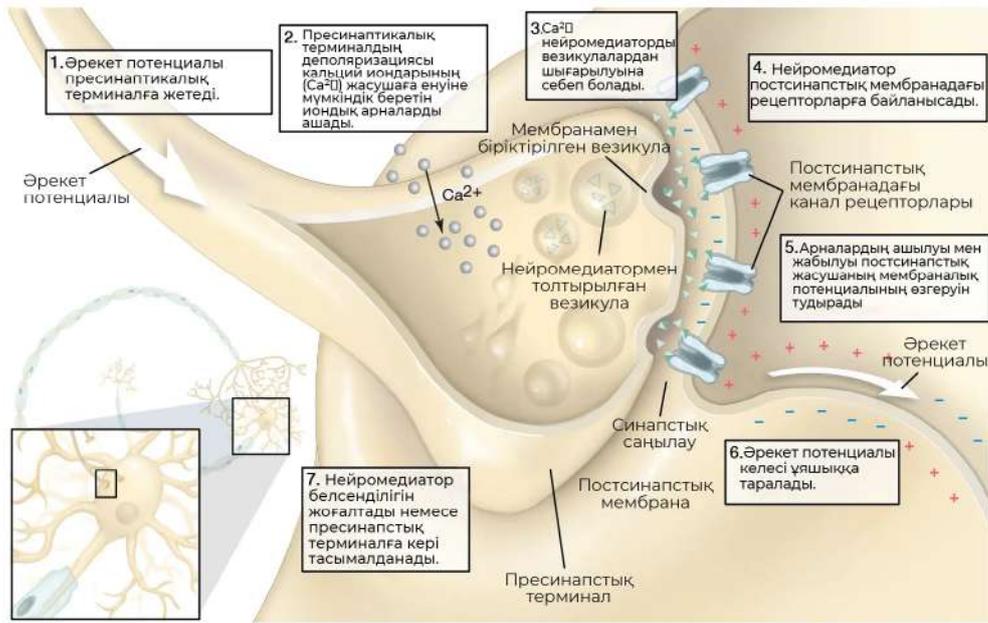
## Адам ағзасына нанопластиктің жоғары уыттылығына әсер ететін негізгі фактор ретінде оның электростатикалық заряды

Адам ағзасы үнемі биоэлектрлік энергия өндіреді. Жүрек қызметінен және сенсорлық қабылдаудан бастап жоғары когнитивтік функцияларға дейінгі барлық физиологиялық процестер – электрлік зарядтардың орын ауыстыруымен басталатын химиялық реакциялармен қамтамасыз етіледі. Ақуыздар орналасқан жасуша ішілік және жасушадан тыс сұйықтықтардың құрамында негізінен электрполярлық қасиеттерге ие су болады. Осыған байланысты электростатикалық әрекеттесулер – соның ішінде сутектік байланыстар, иондық байланыстар және гидрофобтық орау – жасушалық ақуыздардың қажетті құрылымдарын қалыптастыруда шешуші рөл атқарады. Бұл құрылымдар олардың қалыпты жұмыс істеуі және соған сәйкес, ағзаның тіршілік әрекетін сақтау үшін қажет болып табылады<sup>214</sup>.

Биоэлектрлік энергия иондық арналар мен мембраналық потенциалдардың өзара әрекеттесуі арқылы жасушалардың қызметінде тікелей рөл атқарады. Әрбір жасуша өзінің ішкі және сыртқы ортасы арасындағы электрлік потенциалдар айырмасын – тыныштық мембраналық потенциалын – сақтап отырады. Бұл потенциал жасуша ішіндегі және сыртындағы иондар концентрациясының айырмашылығымен қамтамасыз етіледі (81-сурет). Адам ағзасында болатын иондық арналардың негізгі түрлеріне натрий, калий, кальций және хлор иондарына арналған арналар жатады. Бұл арналар мембраналық потенциалмен бірге әртүрлі жасуша типтерінің негізгі функцияларын қамтамасыз етеді (82, 83-сурет).

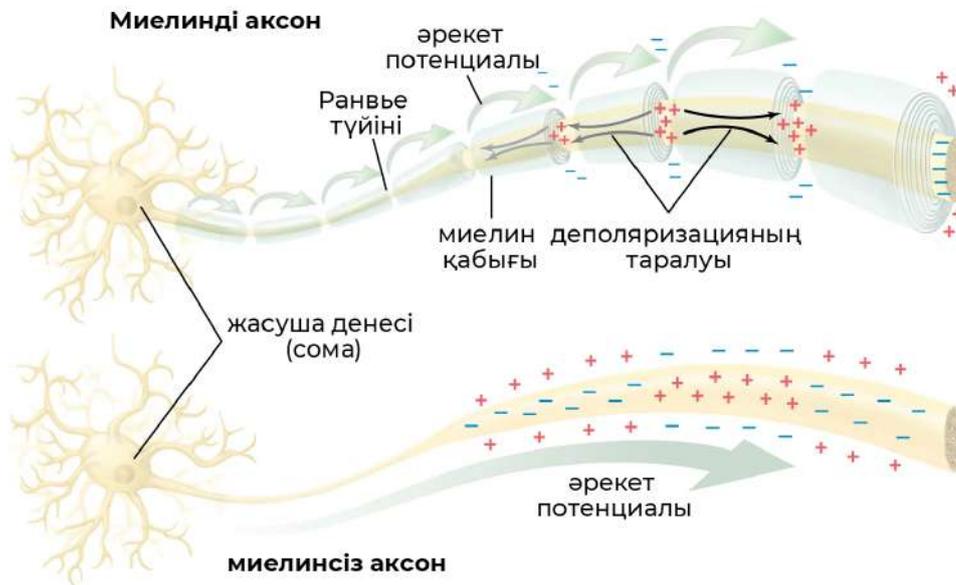


<sup>214</sup>Azim Premji University. The Biology of Electricity: How electricity is critical to the functioning of the human body. (2022) <https://azimpremiuniversity.edu.in/news/2022/the-biology-of-electricity> (Accessed May 1, 2025).



**82-сурет. Синапс.** Синаптағы жүйке импульсінің химиялық берілуі. Нерв импульсінің пресинаптикалық терминалға енуі нейротрансмиттерлердің синаптикалық саңылауға шығуын ынталандырады. Нейротрансмиттерлердің постсинапстық мембранадағы рецепторлармен байланысуы постсинапстық нейрондағы әрекет потенциалының регенерациясын ынталандырады.

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



**83-сурет.** Нейрон; әрекет потенциалының өткізілуі.

Миелінді аксонда миелин қабығы жергілікті токтың (кіші қара жебелер) мембрана арқылы өтуіне жол бермейді. Бұл токты жүйке талшығынан иондық арналардың жоғары концентрациясы бар Ранвьең миелінсіз түйіндеріне дейін күштеп жібереді. Қоздырған кезде бұл иондық арналар келесі түйінге әрекет потенциалын (үлкен жасыл көрсеткілер) таратады. Осылайша, әрекет потенциалы талшық бойымен секіреді, өйткені ол әрбір түйінде қайта қалпына келеді, бұл процесс тұзды өткізгіштік деп аталады. Миелінсіз аксонда әрекет потенциалы бүкіл мембрана бойымен таралады, ол мембрана арқылы қайтадан бастапқы деполаризацияланған аймаққа тараған кезде ыдырайды.

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

Адам ағзасында пайда болатын биоэлектр қуат (мысалы, бұлшық еттердің жұмысы немесе жүйке импульстерінің берілуі кезінде) адамға зиян келтірмейді, өйткені ол физиологиялық үдерістердің табиғи бөлігі болып табылады. Алайда микро- және нанопластиктер ағзаға енген кезде, олар өзімен бірге ұзақ уақыт бойы сақтала алатын электростатикалық зарядты ала кіреді. Дәл осы заряд биологиялық үдерістердің барлығына араласа отырып, денсаулыққа зиян келтіруі мүмкін.

Нанопластик – бұл өлшемі 1 микрометрден кіші пластик бөлшектері, олар өздерінің бірегей құрылымының арқасында электростатикалық зарядтарды жинақтау қабілетіне ие, сондықтан да ғалымдардың ерекше назарында тұр.

Микро- және нанопластик бөлшектері басқа беттермен жанасып, үйкелу нәтижесінде *трибоэлектрлік эффект* арқылы электрленген кезде, олар оң немесе теріс электростатикалық заряд алады. Бұл заряд бөлшектердің ағзада және қоршаған ортада қалай әрекет ететініне әсер етеді.

Нанопластик бөлшектерінің бірегей құрылымы оларға ластаушы заттарды, иондарды және органикалық молекулаларды адсорбциялауға мүмкіндік береді, бұл оларды экожүйелердегі уытты заттардың тасымалдаушысы ретінде одан әрі қауіпті етеді<sup>215, 216</sup>.

Нанопластиктің химиялық құрамы оның электростатикалық қасиеттерінің қалыптасуында негізгі рөл атқарады: полистирол (PS), полиэтилен (PE) немесе полипропилен (PP) сияқты полимерлер көбінесе функционалдық топтарды – карбоксильді (-COOH), сульфатты (-SO<sub>3</sub>H) немесе аминтоптарды (-NH<sub>2</sub>) – қамтиды. Бұл топтар ортаның жағдайына қарай иондануға қабілетті. Мысалы, *Langmuir* журналында жарияланған зерттеуге сәйкес, карбоксил топтары бар полистирол нанобөлшектері (PS-COOH) теріс зета-потенциалға ие, ал амин топтары бар бөлшектер (PS-NH<sub>2</sub>) оң зета-потенциалға ие болған. Бұл дерек функционалдық топтардың нанопластиктің зарядына әсер ететінін дәлелдейді<sup>217</sup>.

Зарядтардың жиналу процесі тек химиялық қасиеттермен шектелмейді. Өндіріс барысында немесе механикалық әсер – мысалы, үйкеліс – кезінде нанопластик байланыстық электрлену (контактная электризация) арқылы зарядтала алады. Пластик контейнерлерге жүргізілген зерттеу полистиролдың -10 кВ-қа дейін заряд жинай алатынын және бұл зарядтың ұзақ уақыт бойы сақталып, шаң немесе бактерия споралары сияқты қарама-қарсы зарядталған бөлшектерді тартатынын көрсетті<sup>218</sup>. Сонымен қатар, полимер құрылымындағы вариациялар – мысалы, полярлық топтардың болуы – нанопластикке ортаның рН деңгейіне байланысты оң немесе теріс заряд көрсетуге мүмкіндік береді. Қышқыл ортада амин топтары бөлшектерге оң заряд бере алады, ал сілтілі ортада карбоксильді топтардың әсерінен теріс зарядтар басым болады. Бұл құбылыс *Arabidopsis thaliana* өсімдігіне жүргізілген зерттеулермен дәлелденген<sup>219</sup>.

<sup>215</sup>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>

<sup>216</sup>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>

<sup>217</sup>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>

<sup>218</sup>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>

<sup>219</sup>Sun, 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>

Осылайша, нанопластиктің құрылымын және оның электростатикалық сипаттамаларын түсіну — бұл материалдың физикалық табиғатын ашып қана қоймай, сонымен қатар осы бөлшектердің экожүйелер мен тірі ағзаларға қалай әсер етуі мүмкін екендігін талдауға негіз қалайды. Бұл аспектілер олардың патогендік механизмдері аясында келесі бөлімдерде қарастырылады.

Жоғары диэлектрлік өтімділігіне (электр зарядын сақтау қабілетіне) байланысты нанопластик ағзаға енгеннен кейін жаңа зиянды зарядтарды жинақтауды жалғастырады. Мұндай зарядтар қалыпты жағдайда ағзаның табиғи өткізгіш жүйелері арқылы бейтараптандырылып немесе таратылады. Алайда бұл тепе-теңдік бұзылғанда, ағзаның өзін-өзі реттеу процестері бұзылады.

Соның салдарынан жасушалық құрылымдар ұзақ уақыт бойы қалыптан тыс электростатикалық энергияның әсеріне ұшырап, бұл олардың зақымдалу қаупін арттырады.

Ағзаға енген нанопластиктің төндіретін қауіп ауқымын бағалау үшін, қайтадан ағзаның биоэлектрлік жүйелеріне жүгінуге болады — бұл жасушалар арасындағы байланыс тілі ретінде электрлік импульстар қолданылатын күрделі механизмдер.

Әрбір қимыл мен ой — жасушаларға командалар беретін көзге көрінбейтін сигналдардың арқасында жүзеге асады. Нейрондар ақпарат алмасуды электрлік импульстар арқылы жүзеге асырады, бұл сигналдарға жауап ретінде бұлшықеттер жиырылады, ал ми мәліметтерді биоэлектрлік және химиялық үдерістердің үйлесімі арқылы өңдейді. Тіпті тыныс алу, рефлекс, көру және есту де — мүшелер жұмысын реттейтін электрлік разрядтарға тәуелді.

Миллиондаған жылдар бойы қалыптасқан эволюциялық үдерістер нәтижесінде бұл көзге көрінбейтін токтар биоэлектрлік импульстарды тіршіліктің тіліне айналдырды. Алайда бұл үйлесімділікті бөгде элементтер — нанопластиктің микроскопиялық бөлшектері бұзады.

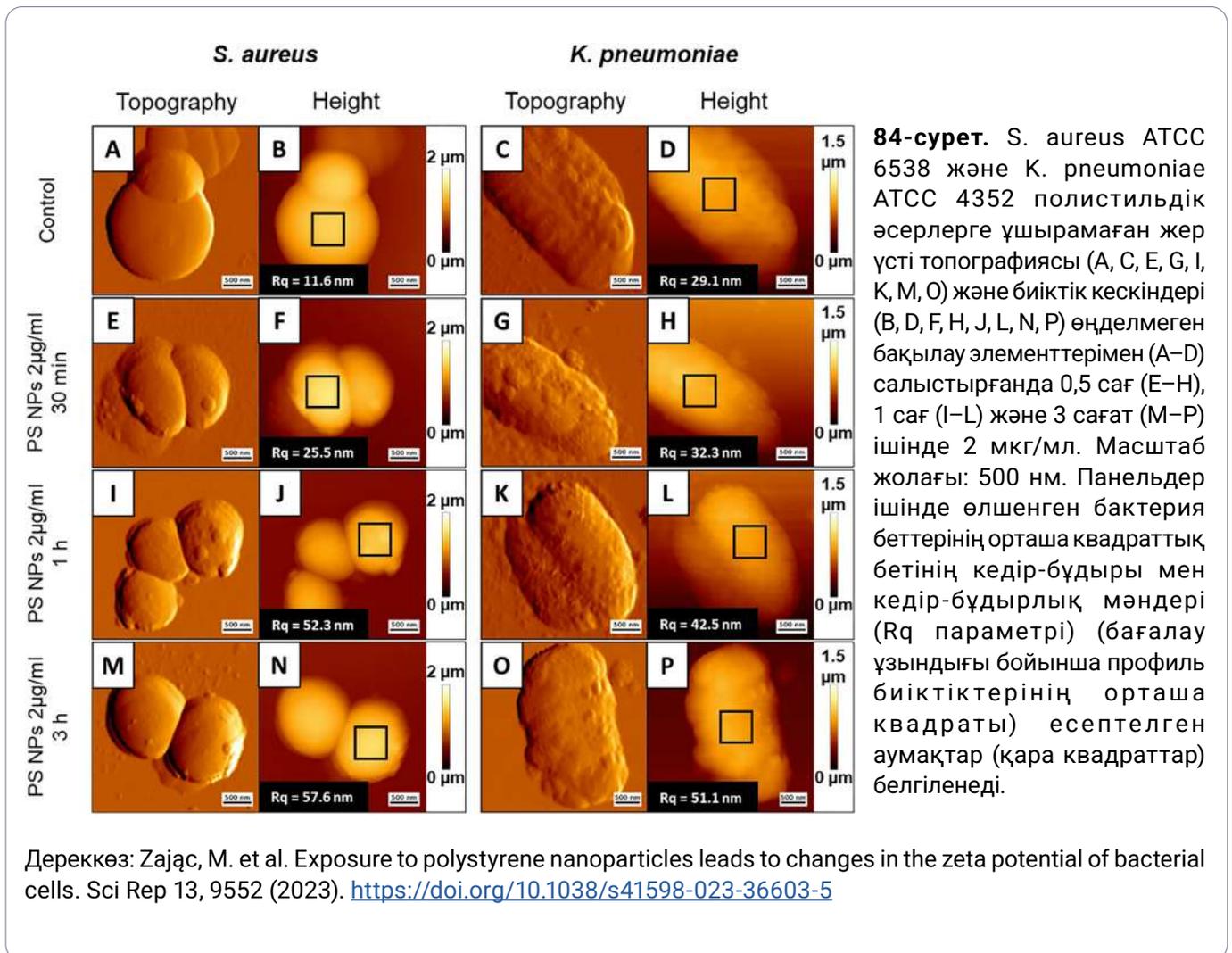
Ағзаға түскен нанопластиктер иондарды адсорбциялауға қабілетті болып, аномалды электрөткізгіштік аймақтарын түзе алады. Бұл жасушааралық сұйықтық арқылы реттелетін табиғи иондық тепе-теңдік пен жергілікті зарядтарды бейтараптандыру үдерістерін бұзады. Нанопластик бетінде иондардың адсорбциялануы олардың электростатикалық заряд жинауына әкеледі. Мұндай құбылыс белсенді оттегі түрлерінің түзілуі арқылы тотығу стрессін туындатып, жасушалар арасындағы электрохимиялық байланысты бұзуы мүмкін, бұл өз кезегінде жасушалық функцияларға теріс әсер етеді.

Бұл<sup>220</sup> - зерттеуде расталады: өлшемі 100 нм болатын полистирол бөлшектері натрий иондарының ( $\text{Na}^+$ ) болуына қарамастан тұрақтылығын сақтап, теріс зарядтарына қарамай бактериялар бетіне адсорбцияланған. Мысалы, *Staphylococcus aureus* және *Klebsiella pneumoniae* бактерияларымен жүргізілген тәжірибелер нанопластиктің жасушалардың дзета-потенциалын едәуір өзгертіп, олардың бетін анағұрлым теріс зарядталған ететінін көрсетті, бұл табиғи электростатикалық тепе-теңдікті бұзады.

<sup>220</sup>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>

Зарядталған нанопластик бөлшектері жасушалар айналасындағы электр өрістеріне әсер етіп, сигналдардың берілуін бұрмалауы мүмкін. Бұл радиобайланыстағы кедергілерге ұқсас: анық бұйрықтардың орнына — жасушалардың ақпарат алмасуына кедергі келтіретін хаустық шудың пайда болуы. Нерв жасушаларына тікелей әсер ету бұл зерттеуде қарастырылмаған, сондықтан адам ағзасына ықпалы туралы тұжырымдар алдын ала сипатта және қосымша зерттеуді қажет етеді. Алайда бактериялардың беткі зарядының өзгеруі нанопластиктің мембраналардың электрохимиялық қасиеттерін өзгерте алатынын көрсетеді. Мысалы, концентрациясы 64 микрограмм/миллилитр-ден жоғары болған жағдайда, полистирол бөлшектері дзета-потенциалдың айтарлықтай өзгеруіне себеп болды, бұл жасушалар арасындағы байланыс үшін маңызды иондық каналдар мен рецепторлардың жұмысына кедергі келтіруі мүмкін.

Аталған зерттеуде атомдық-күштік микроскопия (84-сурет) көмегімен көрсетілгендей, нанобөлшектердің беттерге «жабысу» қабілеті ұзақ мерзімді әсер ету қаупін тудырады. Ұлпаларға орныққаннан кейін бұл бөлшектер тұрақты электростатикалық аномалияларды түзе алады, ал натрий мен калий иондары оларды толық бейтараптай алмайды, әсіресе нанопластик жасушааралық сұйықтықтың қорғаныс тетіктерінен өтіп, жасушалардың ішіне енген жағдайда.



Нанопластикте жинақталған патогендік зарядтың тағы бір қауіптілігі, ол иммундық жасушалардың айналасында электрлік кедергі тудыруы мүмкін, бұл<sup>221</sup> зерттеумен расталған, оң зарядталған нанопластик (PS-NH<sup>2</sup>) теріс зарядталғандармен (PS-COOH) салыстырғанда иммундық жасушалардың өміршеңдігін және лизосомалық мембраналардың тұрақтылығын айтарлықтай төмендететінін көрсетті, бұл олардың жасушалармен өзара әрекеттесуінде зарядтың маңыздылығын көрсетеді.

Электростатикалық зарядталған МНП бөлшектерінің жасуша мембраналарында, тіндерінде және басқа биологиялық беттерде адсорбциялану қабілеті жоғарылайды, оларға сөзбе-сөз жабысады - бұл жасушалардың механикалық және химиялық зақымдану қаупін арттырады, олардың құрылымы мен функцияларын бұзады.

Электростатикалық заряд гематоэнцефалдық немесе гематоплацентарлы тосқауылдар сияқты күрделі биологиялық кедергілер арқылы МНП бөлшектерінің енуін жеңілдетуі мүмкін. Нәтижесінде токсиндер миға немесе ұрыққа жетуі мүмкін, бұл нейротоксикалық әсерлердің және жатырышілік даму бұзылыстарының қаупін арттырады.

Нанопластиктің электростатикалық әсері ақуыздардың, иондық арналардың және жасушалық рецепторлардың құрылымы мен қызметін бұзуы мүмкін, бұл өз кезегінде жасушалар арасындағы сигналдардың берілуінде іркілістерге әкеліп, тотығу стрессін қоздырады және ағзаның иммундық қорғанысын әлсіретеді.

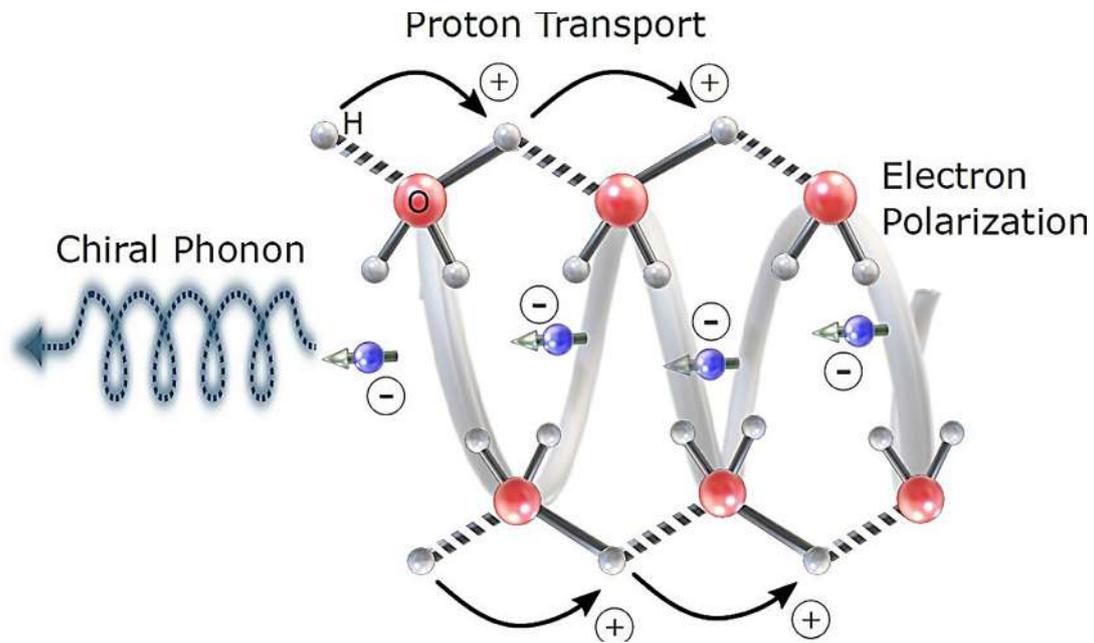
Бұл өзгерістер созылмалы қабынуды, нейродегенеративті бұзылыстарды, қатерлі ісіктердің дамуын және ағзаның жүйелік дисфункциясын қамтитын патологиялық үдерістер каскадын бастауға қабілетті, соның нәтижесінде ауыр аурулардың қаупі едәуір артады.

Осылайша, нанопластикте электростатикалық зарядтың жиналуы – жай ғана физикалық құбылыс емес, микро- және нанопластиктің (МНП) қауіптілігін күшейтетін механизм болып табылады. Әсіресе, МНП бетінде электростатикалық зарядтың өте ұзақ уақыт сақталу қабілетін және микро- мен нанопластик бөлшектерінің ағзадан іс жүзінде шығарылмайтынын ескерсек, бұл жағдай аса маңызды.

Қазіргі уақытта бұл феноменді зерттеу ерекше өзектілікке ие, өйткені ол нанопластикте жиналатын патогенді электр зарядтарының адамзат өміріне макроскопиялық деңгейде қауіп төндіруі мүмкін екенін түсінуге жол ашады.

Соңғы уақытқа дейін жасушалық энергияның негізі – протондардың тасымалдануы – тек химиямен анықталады деп есептелді: протондар бір су молекуласынан екіншісіне «секіреді». Алайда, *Proceedings of the National Academy of Sciences* журналында жарияланған жаңа зерттеу бұл идеяны түбегейлі өзгертеді. Тірі организмдердегі протонның тасымалдануы тек химиялық қасиеттерге ғана емес, сонымен қатар кванттық қасиеттерге де, атап айтқанда, электрондардың спиніне және биологиялық молекулалардың хиралдығына байланысты екені белгілі болды (85-сурет).

<sup>221</sup>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>



**85-сурет.** Схемалық үлгі-модель. Протонды тасымалдау хиралды ортада электронды поляризациямен бірге жүреді. CISS әсеріне байланысты бұл электрлік поляризация спиндік поляризацияны тудырады. Бұрыштық импульсті сақтау протонның тасымалдануын жақсартатын хиралды фонндарды тудырады.

Дереккөз: 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>

Израильдің Еврей университетінің ғалымдары жүргізген зерттеу көрсеткендей, лизоцим сияқты ақуыздарда протондардың тасымалдануы «дұрыс» спинді электрондар енгізілген кезде айтарлықтай жеделдейді, ал керісінше спин кезінде баяулайды. Бұл тірі жүйелерде протондар мен электрондардың жақсы үйлестірілген кванттық механизм ретінде әрекет етуіне байланысты. Олардың айналу бағдарындағы ең аз өзгерістердің өзі іргелі процестерге - энергия өндіруге, зат алмасуға, жасуша ішіндегі реттеуге әсер етуі мүмкін.

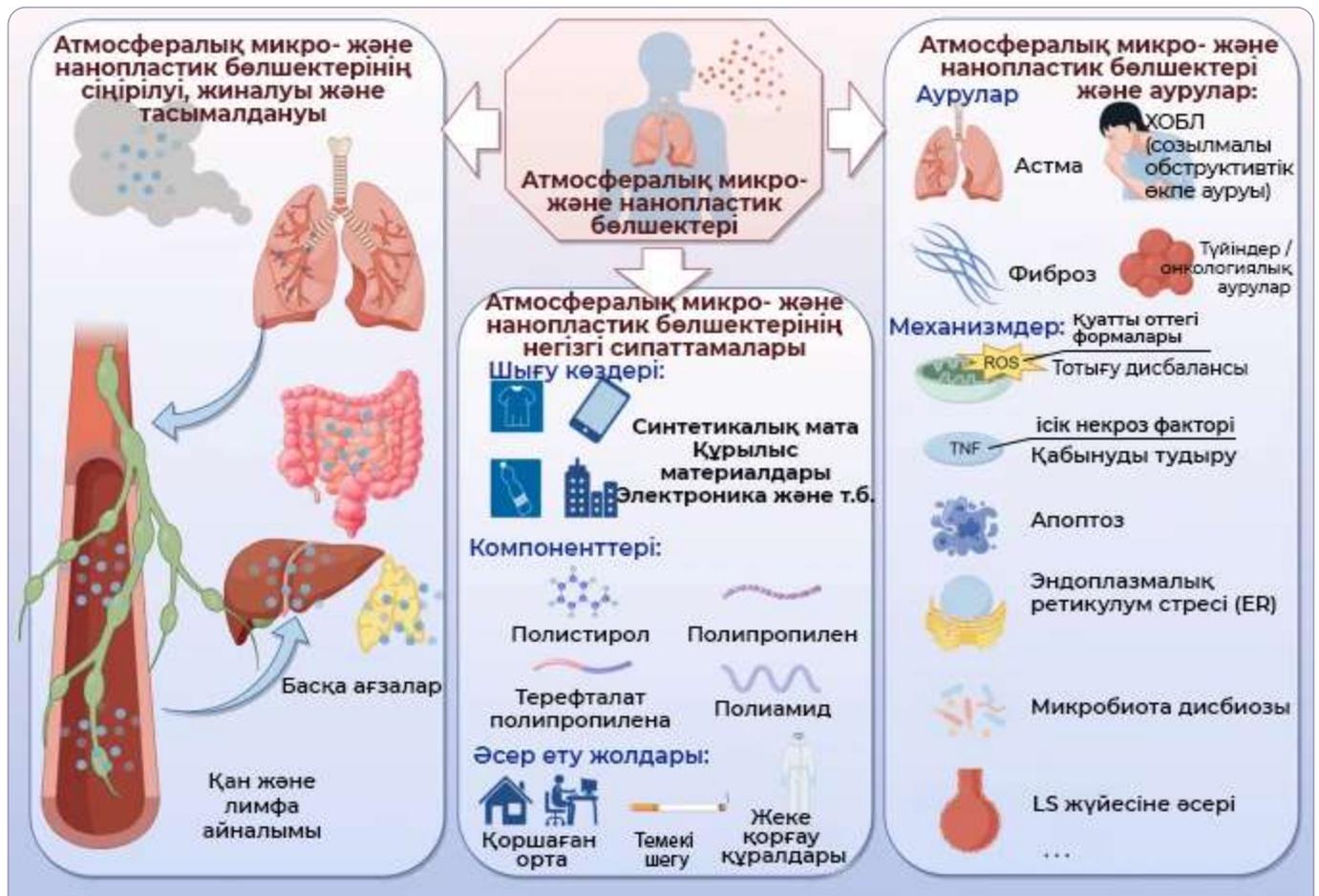


Зерттеу жетекшісі Наам Горен атап өткендей: **«Біздің нәтижелеріміз протондардың биологиялық жүйелердегі қозғалысы тек химияға ғана емес, сонымен қатар кванттық физикаға да қатысты екенін көрсетеді»**. Бұл электр зарядындағы немесе магниттік бағдардағы ең кішкентай бұзылулардың өзі жасушалық зат алмасуға, энергия өндіруге және жалпы денсаулыққа әсер етуі мүмкін дегенді білдіреді<sup>222</sup>.

<sup>222</sup>[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).

## МНП-тің адам ағзалары мен функционалдық жүйелеріне жүйелі әсері

МНП адам ағзасына түскеннен кейін қан айналымы арқылы барлық мүшелер мен тіндерге енеді (86-сурет). Пластикалық бөлшектер адамның қанында, жүрек және сүйек тінде, миында, плацента, өкпе, бауыр және басқа органдарда табылған<sup>223</sup>.



**86-сурет.** МНП-тің адам ағзасына тыныс алу және токсикалық әсер арқылы түсуі

Дереккөз: 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>

<sup>223</sup>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>

## МНП-пен тыныс алу кезіндегі тыныс алу жүйесінің зақымдану механизмдері

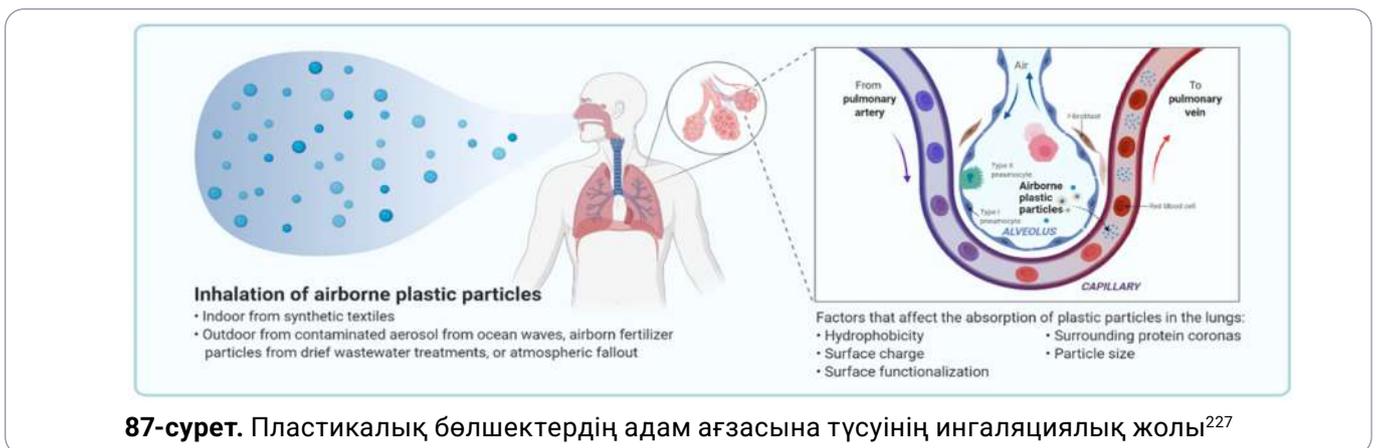
МНП-тің адам ағзасына енуінің негізгі жолдарының бірі - тыныс алу.

Қытай ғалымдарының<sup>224</sup> зерттеуі көрсеткендей, екі сағаттық белсенді ауадағы уақыт өткізу кезінде ересектер шамамен 106 000 микропластик бөлшектерді жұтады, ал балалар шамамен 73 700 микропластик бөлшектерін жұтады.

0,1 мкм-ден кіші бөлшектер өздерінің термодинамикалық қасиеттеріне байланысты барлық тыныс алу жолдарында (жоғарғы тыныс алу жолдарынан альвеолаларға дейін) тиімді тұндыра алады<sup>225</sup>.

Өкпенің үлкен альвеолярлы беті (шамамен 150 м<sup>2</sup>) және жұқа тіндік тосқауыл (1 мкм-ден аз), бұл НП-ке қанға оңай енуге мүмкіндік береді (87-сурет).

Микропластиктер (МП) адамның 20 өкпе тінінің үлгілерінің 13-інде анықталды<sup>226</sup>.



**87-сурет.** Пластикалық бөлшектердің адам ағзасына түсуінің ингаляциялық жолы<sup>227</sup>

Зерттеу деректері бойынша өкпе аурулары бар 22 науқастың қақырық үлгілерінің барлығында микропластик анықталған<sup>228</sup>: 10 мл-де 18,75-тен 91,75 бөлшекке дейін<sup>229</sup>. Аллергиялық ринит пен микропластиктер арасында да байланыс орнатылды<sup>230</sup>.

МНП әртүрлі респираторлық аурулардың, соның ішінде астма, өкпе фиброзы, созылмалы обструктивті өкпе аурулары және ісіктердің пайда болуымен және өршуімен тығыз байланысты<sup>229</sup>. Зерттеу көрсеткендей, өкпе ісіктерінің қатерлі үлгілерінің 97% микропластик талшықтарынан тұрады<sup>231</sup>.

<sup>224</sup>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).

<sup>225</sup>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>

<sup>226</sup>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>

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

<sup>228</sup>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>

<sup>229</sup>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>

<sup>230</sup>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>

<sup>231</sup>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>

Ықтимал механизмдерге тотығу стрессі, қабыну және өкпе микробиотасының теңгерімсіздігі жатады. МНП өкпенің қабынуына әкелуі мүмкін<sup>232</sup>.

Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымының есебіне сәйкес, төменгі тыныс жолдарының инфекциялары қазіргі уақытта әлемдегі ең өлімге әкелетін жұқпалы ауру болып қала береді және өлім-жітімнің бесінші себебі болып табылады<sup>233</sup>. Ал трахея, бронх және өкпе ісігінен қайтыс болғандар саны артып, өлімнің алтыншы себебі болып табылады.

## МНП-тің нейротоксикалық әсері.

### Орталық және перифериялық жүйке жүйесінің зақымдануы

Зерттеулер көрсеткендей, неврологиялық бұзылыстар бүкіл әлем бойынша физикалық және когнитивтік (танымдық) мүгедектіктің негізгі себебі болып табылады, қазіргі уақытта олар шамамен 3,4 миллиард адамды қамтиды. Соңғы 30 жылда науқастардың абсолют саны едәуір артты<sup>234</sup>. Сонымен қатар, созылмалы нейродегенеративті аурулардың ауыртпалығы алдағы екі онжылдықта кем дегенде екі есе артады деп күтілуде. Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымының мәліметі бойынша әлемде әрбір сегізінші адам психикалық ауытқушылықтан зардап шегеді<sup>235</sup>.

Жасөспірімдер мен жас адамдар арасында бүкіл әлемде биполярлық бұзылуға шалдыққан адамдардың саны 1990 жылы 100 000 адамға 79,21-ден 2019 жылы 100 000 адамға 84,97-ге дейін өскен<sup>236</sup>. Соңғы үш онжылдықта аурушандық ерлер мен әйелдерде де артқанын байқауға болады (88-сурет). Соңғы жылдары балалар мен жасөспірімдер арасында психикалық ауытқулардың артуы байқалады. 2022 жылғы ұлттық денсаулық сақтау сапасы мен айырмашылықтар туралы есепке сәйкес, 2016 жылдан 2019 жылға дейін 0–17 жас аралығындағы балалар арасында психикалық денсаулыққа байланысты жедел жәрдем бөлімшелеріне жүгіну жағдайлары 100 000 адамға шаққанда 784,1-ден 869,3-ке дейін өсті. Сонымен қатар, 2008 жылдан 2020 жылға дейін 12 жастан асқан адамдар арасында суицидтен болатын өлім деңгейі 100 000 адамға шаққанда 14,0-ден 16,3-ке дейін артып, 16%-ға өсті<sup>237</sup>.

*Blue Cross Blue Shield* медициналық сақтандыру компаниясының есебіне сәйкес, 2013 жылдан бері клиникалық депрессия (үлкен депрессия ретінде де белгілі) диагноздарының саны 33%-ға артқан. Кейбір дереккөздер 2030 жылға қарай депрессия ұзақ өмір сүру немесе өмірдің өзін жоғалтуының негізгі себебіне айналады деп болжауда. Бұл есепте айтылғандай, депрессиядан зардап шегетін әйелдер мен ерлер орта есеппен 9,6 жылға дейін салауатты өмір жылдарынан айырылуы мүмкін<sup>238</sup>.

<sup>232</sup>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>

<sup>233</sup>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).

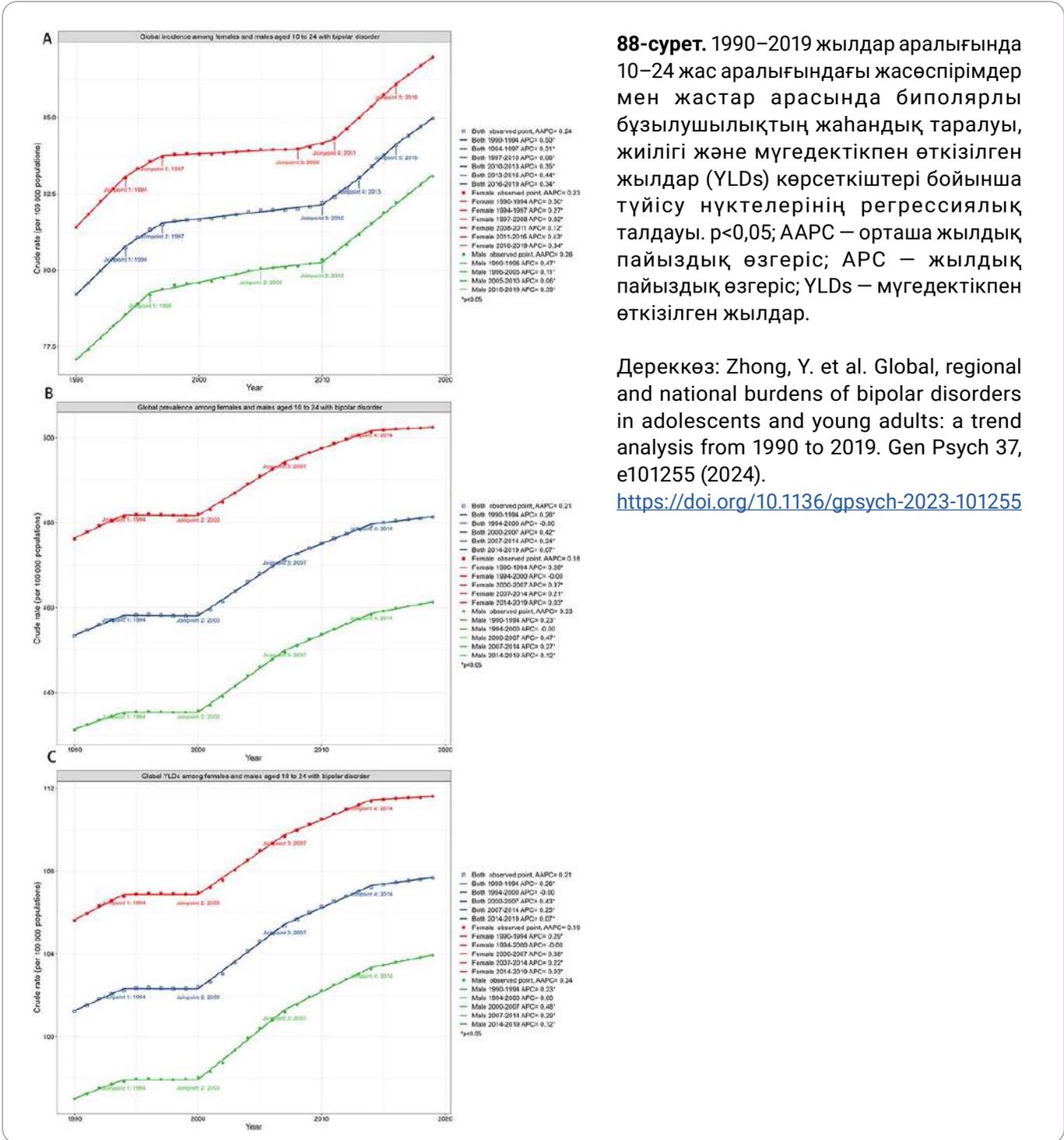
<sup>234</sup>Van Schependom, J. & D'haeseleer, M. Advances in Neurodegenerative Diseases. *Journal of Clinical Medicine* 12, 1709 (2023). <https://doi.org/10.3390/jcm12051709>

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

<sup>236</sup>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>

<sup>237</sup>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).

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



**88-сурет.** 1990–2019 жылдар аралығында 10–24 жас аралығындағы жасөспірімдер мен жастар арасында биполярлы бұзылушылықтың жаһандық таралуы, жиілігі және мүгедектікпен өткізілген жылдар (YLDs) көрсеткіштері бойынша түйісу нүктелерінің регрессиялық талдауы.  $p < 0,05$ ; AAPC – орташа жылдық пайыздық өзгеріс; APC – жылдық пайыздық өзгеріс; YLDs – мүгедектікпен өткізілген жылдар.

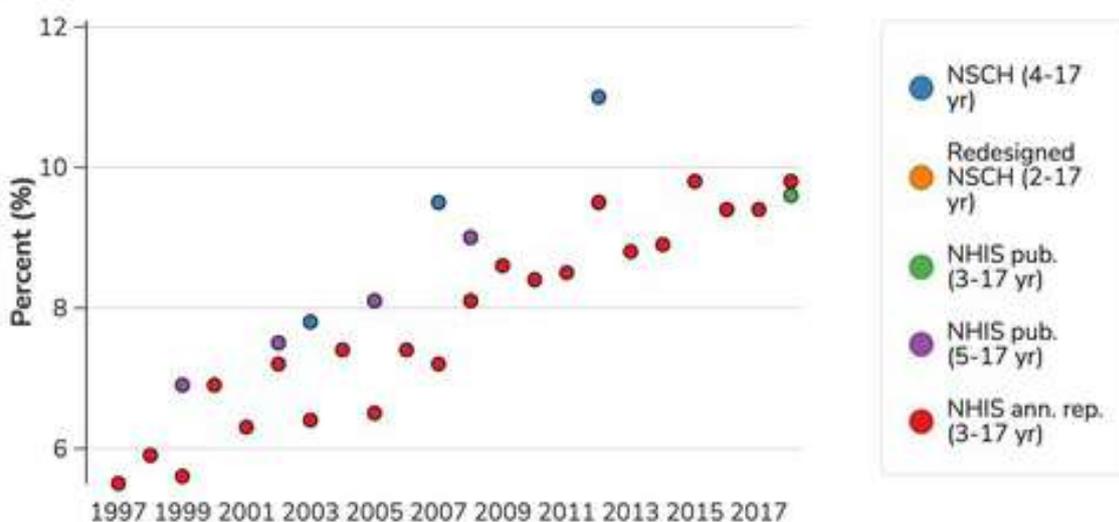
Дереккөз: Zhong, Y. et al. Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019. *Gen Psych* 37, e101255 (2024).  
<https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>

Соңғы бірнеше онжылдықта назар аудару мен гиперактивтілік синдромы (СДВГ) диагноздарының саны тұрақты түрде өсіп келеді. АҚШ-тағы ұлттық халық сауалнамалары бойынша оның таралуы 1997 жылдан 2016 жылға дейінгі 20 жылдық кезеңде 6,1%-дан 10,2%-ға өскен<sup>239</sup> (89-сурет).

2023 жылғы шолу 31 елді қамтып, сауаттылық және есептеу дағдыларының төмендеп жатқанын анықтады<sup>240</sup> (90-сурет).

<sup>239</sup>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>  
<sup>240</sup>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](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).

**Ата-аналардың хабарлауы бойынша балалардағы назар тапшылығы мен гиперактивтілік синдромы (СДВГ) диагнозының пайызы**

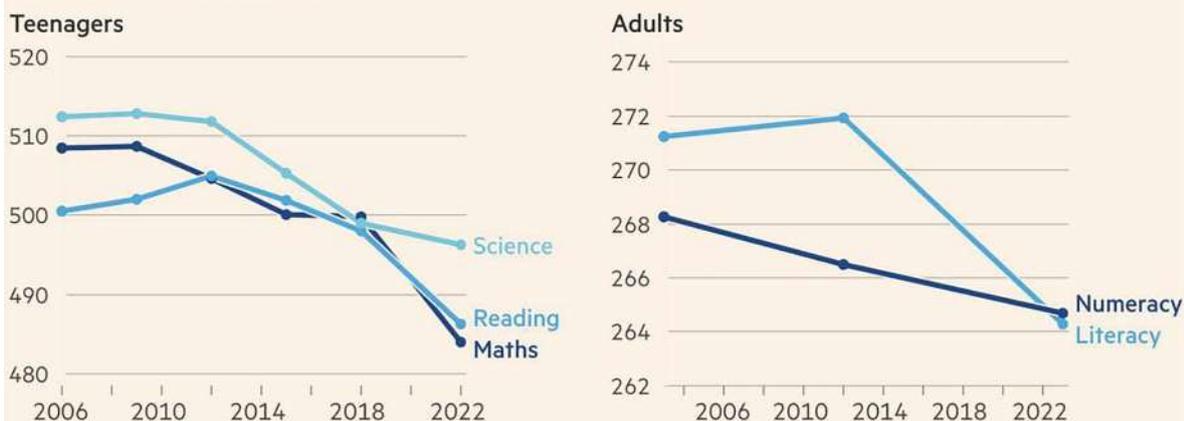


**89-сурет.** 1997 жылдан 2016 жылға дейінгі назар аудару мен гиперактивтілік синдромының (СДВГ) таралу өсімін көрсетуге арналған график.

Дереккөз: 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

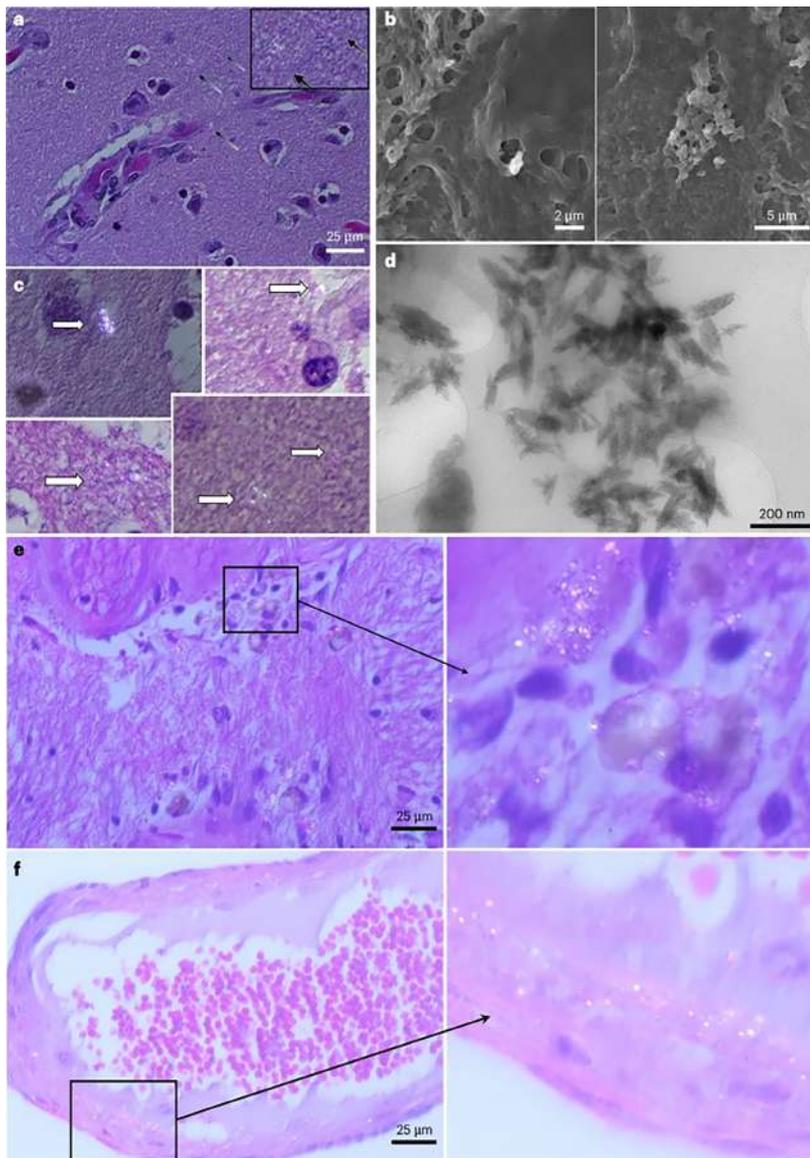
**90-сурет.** Логика және тапсырмаларды шешу бойынша тестілердегі өнімділік төмендеуде.

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

Нейродегенеративті және нейропсихикалық аурулардың өсу үрдістері қоршаған ортадағы пластиктің көбею үрдісімен айқын корреляциялайды (96-97-суреттер).

Адамның ми тіндерінде НП-тің ең жоғары концентрациялары анықталды — олар бауыр немесе бүйрек тіндеріндегі концентрациялардан 7–30 есе жоғары. Ал деменция диагнозы қойылған адамдардың ми тіндері деменциясы жоқ адамдардың ми тініне қарағанда МНП-тің әлдеқайда көп мөлшерін — шамамен 10 есе артық — көрсетті<sup>241</sup> (91-сурет).

Мидағы басым бөлшектер полиэтиленнің ұсақ сынықтары немесе қабыршақтары болып шықты — олар орау материалдарында ең кең қолданылатын пластиктердің бірі.



**91-сурет.** Поляризациялық толқынды микроскопия (а, қара жебелер жоғары температураға төзімді қосындыларды көрсетеді; айқындық үшін енгізбе цифрлық үлкейту болып табылады) және СЭМ (b, көру өрістерінің ені 15,4 және 20,1 мкм) марқұм адамдардың үлгілерінен алынған ми тінінің кесінділерін сканерлеу үшін қолданылды. с — Үлкен (>1 мкм) қосындылар байқалмады; қосымша поляризациялық толқын мысалдары көрсетілген (ақ жебелер субмикрондық, жоғары температураға төзімді қосындыларды көрсетеді). Бұл технологиялардың рұқсат ету қабілетінің шектеулері Ru-GC/MS үшін пайдаланылған гранулалардан алынған экстракттарды зерттеу мақсатында ТЭМ қолдануға әкелді. d — ТЭМ кескіндері дисперсиядан кейінгі сансыз көп қатты бөлшектерді, негізінен ұзындығы <200 нм және ені <40 нм болатын сынықтар немесе қабыршақтар түрінде анық көрсетті. e, f — Поляризациялық толқынды микроскопия деменция жағдайларында айтарлықтай көп рефрактерлік қосындыларды анықтады, әсіресе иммундық жасушалардың жиналуымен бірге жүретін аймақтарда (e) және тамыр қабырғалары бойында (f). Барлық кескіндер аналитикалық химияны растайтын көрнекі дәлелдер беру мақсатында қатысушылардың шағын ішкі тобынан (қалыпты ми үшін n = 10; деменция жағдайлары үшін n = 3) алынды.

Дереккөз: 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>

<sup>241</sup>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>

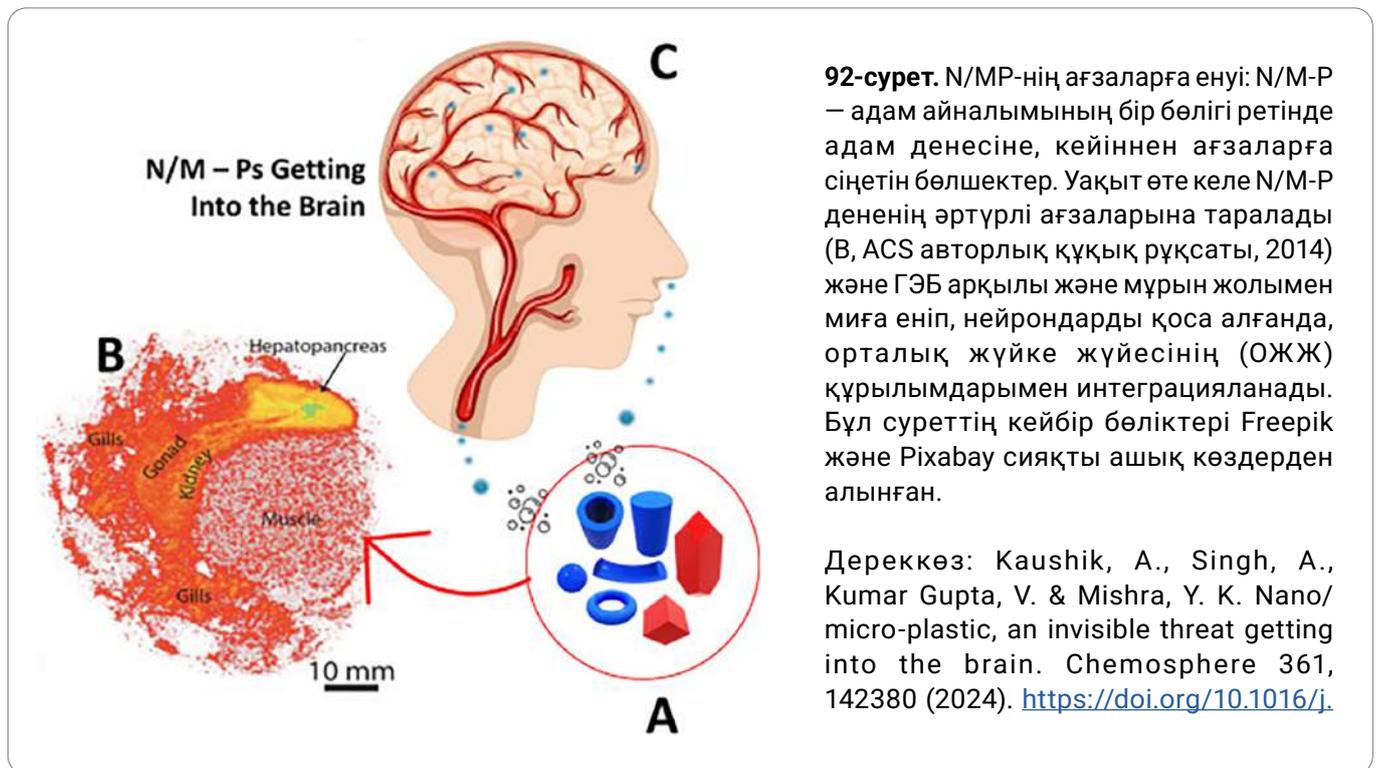
Жаңа деректер 2016 жылдан 2024 жылға дейін, яғни 8 жыл ішінде, мидағы пластик мөлшері 50 %-ға артқанын растайды<sup>241</sup>.



**«45–50 жастағы дені сау адамдардың ми тінінің әр грамында орта есеппен 4 900 микрограмм пластик бөлшектерін анықтадық. (...) Бұл – бүтін бір пластик қасыққа тең. Біздің миымызда шамамен осынша микропластик бар. Бұл бүгінгі күні біздің миымыздың 99,5 %-ы – ми тіні, ал қалған бөлігі – пластик дегенді білдіреді»,** – деді Нью-Мексико университетінің жетекші зерттеушісі Мэтью Кэмпен<sup>242</sup>.

Атмосферадағы, судағы және тағамдағы пластик бөлшектерінің мөлшерінің артуын ескере отырып, біздің ағзамыздағы нанопластик саны тек өсетінін сеніммен айтуға болады. Егер бұл үрдіс жалғаса берсе, онда 4 жылдан кейін мидағы пластик деңгейі тағы 50 %-ға артады.

МНП миға қан арқылы – гематоэнцефалдық бөгетті (ГЭБ) еңсеріп – және тыныс алу кезінде иіс сезу жүйкелері арқылы енеді (92-сурет).



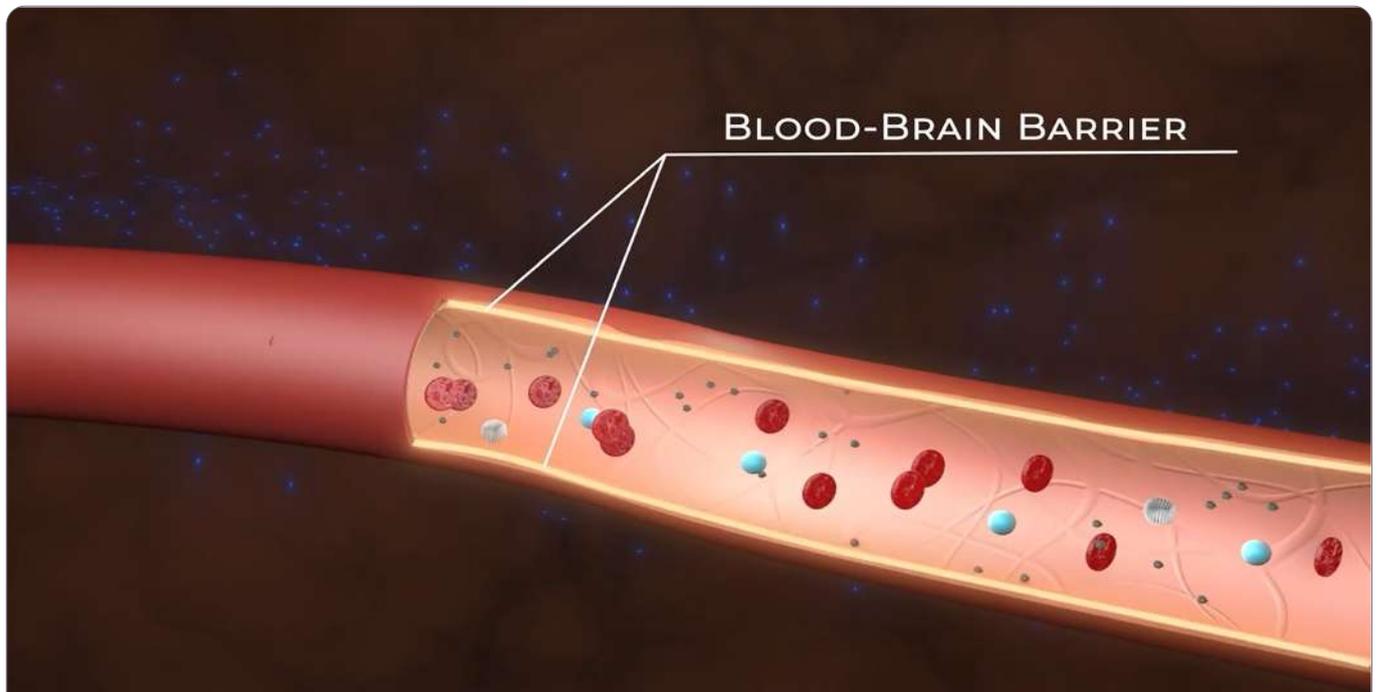
**92-сурет.** N/MP-нің ағзаларға енуі: N/M-P – адам айналымының бір бөлігі ретінде адам денесіне, кейіннен ағзаларға сіңетін бөлшектер. Уақыт өте келе N/M-P дененің әртүрлі ағзаларына таралады (B, ACS авторлық құқық рұқсаты, 2014) және ГЭБ арқылы және мұрын жолымен миға еніп, нейрондарды қоса алғанда, орталық жүйке жүйесінің (ОЖЖ) құрылымдарымен интеграцияланады. Бұл суреттің кейбір бөліктері Freerik және Рихау сияқты ашық көздерден алынған.

Дереккөз: 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>

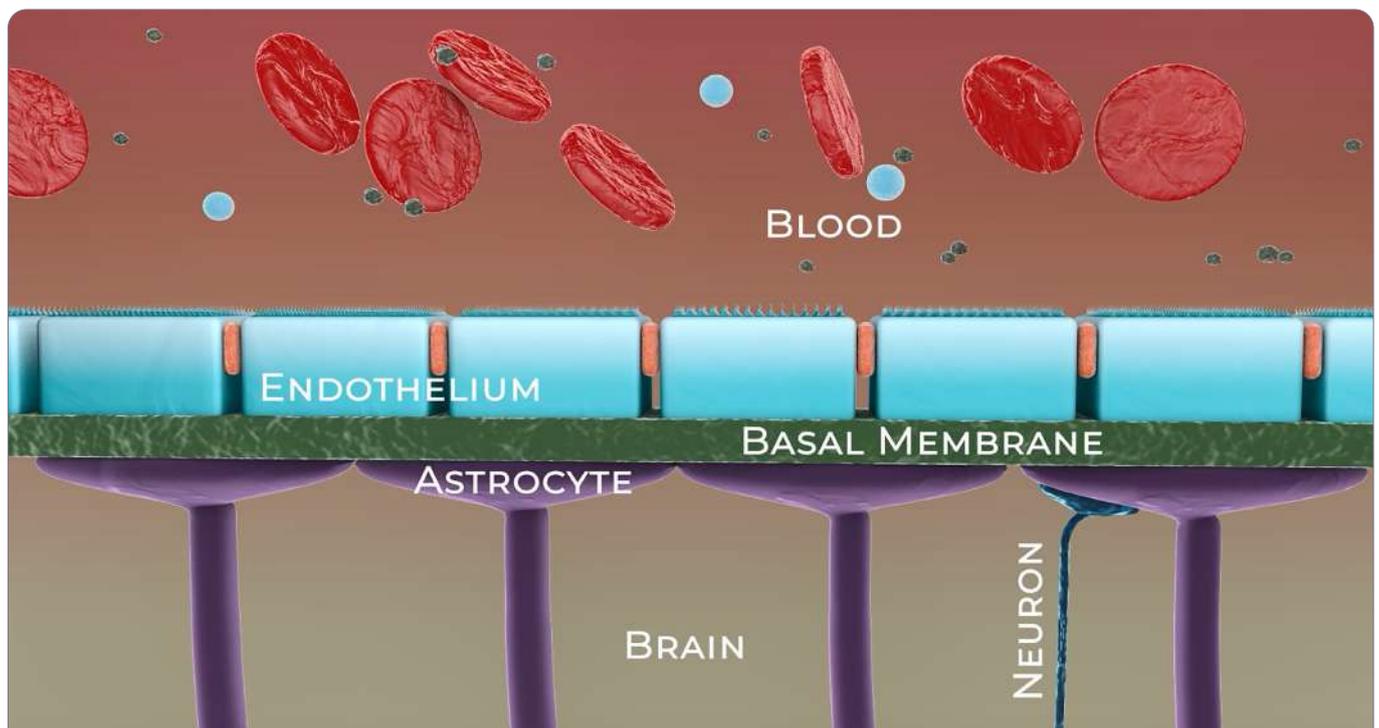
<sup>241</sup>Nihart, A.J., Garcia, M.A., El Hayek, E. et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. Nat Med 31, 1114–1119 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41591-024-03453-1>

<sup>242</sup>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).

Гематоэнцефалдық бөгет – қан ағымынан орталық жүйке жүйесіне заттардың өтуін реттейтін маманданған физиологиялық жүйе (93-сурет). Ол қоректік заттар мен оттегіні таңдамалы түрде өткізіп, токсиндер мен патогендердің енуін бөгейді (94-сурет). Бұл механизм нейрондық ортаның гомеостазын сақтай отырып, мидың маңызды қорғанысын қамтамасыз етеді.



93-сурет. Ми қан тамырының сызбалық бейнесі



94-сурет. Гематоэнцефалдық бөгеттің сызбалық бейнесі

Пластиктің нанобөлшектері субмикрондық өлшемдері мен физико-химиялық қасиеттерінің арқасында ағзаға түскеннен кейін небәрі 2 сағат ішінде миға ене алады<sup>243</sup>.

Тыныс алу кезінде пластиктің нанобөлшектері мұрын жолындағы иіс сезу жүйкелері арқылы тікелей иісті қабылдайтын ми аймағына түседі<sup>244</sup> (95-сурет). Нәтижесінде, олар басқа ағзаларға қарағанда миға қысқа әрі тікелей жолмен жетеді.



95-сурет. НП-тің иіс сезу жүйкелері арқылы миға енуі

Миға еніп кеткеннен кейін нанопластик ми жасушаларының – нейрондардың жұмысын бұзады. Зерттеулер көрсеткендей, нанобөлшектердің беткі қабаты мен олардың электрлік заряды нейрондармен әрекеттесуіне және нерв импульстарын өткізуге айтарлықтай әсер етуі мүмкін.

Нанопластиктің электростатикалық заряды оның адам ағзасындағы әрбір жасушаның жұмысын кедергісіз бұзуға мүмкіндік береді: жасушаға еніп, тотығу стрессі мен созылмалы қабынуды тудырады, митохондриялардың жұмысын бұзады, кейде оларды толық жойып, жасушаның өзі өлуіне әкеледі.

Зерттеу<sup>245</sup> көрсеткендей, теріс зарядталған нанобөлшектер нейрондардың мембранасын деполяризациялауға қабілетті, бұл олардың электрлік белсенділігінің өзгеруіне әкеледі.

<sup>243</sup>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>

<sup>244</sup>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>

<sup>245</sup>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>

Эксперимент нәтижесінде теріс зарядталған нанопластик бөлшектері нерв импульсін жеткізуде белсенді қатысатын нейрондармен таңдамалы түрде байланысатыны анықталды. Олар нейрондардың денелеріне, аксондарына, дендриттеріне және синаптикалық саңылауларына жабысып, ал электрлік белсенділігі жоқ глиа жасушаларымен өзара әрекеттеспеді.

Яғни, нейрондардың электрлік белсенділігі теріс зарядталған нанопластиктің жасушалық мембранаға байланысуының негізгі қозғаушы механизмі болып табылады.

Зерттеулерге сәйкес, микро- және нанопластик липидке бай миелин қабығында жиналуға бейім, ол нейрондарды қоршап, нерв сигналдарының өтуін қамтамасыз етеді<sup>246</sup>. Нанопластик аксондардың миелин қабығын<sup>247, 248</sup> бұзуға әкеліп, нейрондар арасындағы нерв импульстарының берілуін бұзады.

## Нанопластиктің нейрондарға әсері

Нанопластиктің нейрондарға әсері келесі жолдар арқылы жүзеге асуы мүмкін:

### 1. Нейрондардың мембраналық потенциалына әсері

Нейрондар мембранадағы потенциал айырмашылығына (демалыс күйінде шамамен -70 мВ) байланысты жұмыс істейді, бұл айырмашылық иондық градиенттер ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  және т.б.) және иондық каналдардың белсенділігі арқылы қалыптасады. Егер нейрон мембранасының жанында электрикалық зарядталған нанопластик бөлшегі пайда болса, ол электрлік өрісті өзгертіп, мембраналық потенциалды тұрақсыздандыра алады. Бұл деполяризацияға немесе гиперполяризацияға әкелуі мүмкін, ал ең нашар жағдайда — нейронның спонтанды белсенділігін тудыруы немесе сигналдың блокталуына себеп болуы мүмкін.

### 2. Иондық каналдармен электростатикалық өзара әрекеттесу

Нейрон мембранасындағы иондық каналдар зарядталған амин қышқылдарын қамтиды, әсіресе каналдың «қақпаларында». Күшті теріс немесе оң зарядқа ие бөлшек осы аймақтармен электростатикалық өзара әрекеттесе алады, бұл каналдың конфигурациясын өзгертеді. Нәтижесінде каналдың блокталуы немесе дұрыс белсенділенбеуі мүмкін, бұл нейронның қалыпты жұмысын бұзады..

### 3. Синапстардың жұмысының бұзылуы

Синапстардың қызметі  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  иондары мен нейромедиаторлардың дәл әрекетіне тәуелді. Электростатикалық зарядталған нанопластик бөлшектері нейромедиаторлардың бөлінуін бұзуы немесе жалған сигнал тудыруы мүмкін, бұл жүйке импульстарының берілуіндегі ақауларға әкелуі ықтимал.

<sup>246</sup>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).

<sup>247</sup>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>

<sup>248</sup>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>

<sup>249</sup>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>

#### **4. Тотығу стрессі және қабыну**

Зарядталған нанопластиктер белсенді оттегі формаларының деңгейін жоғарылатуға қабілетті, бұл тотығу стрессіне әкеледі. Нейрондардағы тотығу стрессі белсенді оттегі формаларының жасушаның оларды бейтараптандыру қабілетінен асып кеткенде пайда болады. Бұл ДНҚ-ның, мембраналар, ақуыздар және митохондриялар сияқты жасушалық құрылымдардың зақымдануына әкеліп, нейрондардың қалыпты жұмысын бұзады. Нәтижесінде жасуша нерв импульстарын тиімді өткізу қабілетін жоғалтады, бұл оның деградациясына және ақырында өліміне әкеледі. Нейрондардың қалпына келу қабілеті шектеулі болғандықтан, тотығу стрессі тудырған зақымдар жиі қайтымсыз болып, есте сақтау, зейін және басқа когнитивтік функциялардың біртіндеп нашарлауына әкелуі мүмкін.

#### **5. Митохондрия функциясына әсері**

Электростатикалық оң зарядқа ие нанопластиктер жасуша ішіне еніп, митохондрияларда жиналуы мүмкін, бұл олардың мембраналық потенциалын бұзады. Нәтижесінде тыныс алу тізбегінің жұмысы бұзылып, электрондардың ағымы ағып кетеді, олар оттектен әрекеттесіп белсенді оттегі формаларын, әсіресе супероксид-аниондарын түзеді. Олардың шамадан тыс жиналуы тотығу стрессін күшейтіп, жасушалық құрылымдарға зақым келтіруі мүмкін.

#### **6. Митохондриялық мутациялар**

Пластиктің нанобөлшектері митохондрия ДНҚ-сына зақым келтіріп, митохондриялардың қалыпты жұмысын бұзуы мүмкін. Бұл жасушаның негізгі процестеріне әсер етеді — энергия өндіру, тотығу стрессін бақылау, бағдарламаланған жасушалық өлім және метаболизм. Осы жүйелердегі бұзылыстар аурулардың дамуына қолайлы жағдай тудыруы мүмкін.

#### **7. Нанопластик бетінің реактивтік қасиеттері**

Нанопластиктің үлкен беткі ауданы оның жоғары химиялық белсенділігін және белсенді оттегі формаларын тудыру қабілетін анықтайтын негізгі факторлардың бірі болып табылады. Микропластикпен салыстырғанда, нанобөлшектердің бірлік массасына шаққандағы беткі ауданы он есе, тіпті жүз есе үлкен, бұл олардың биомолекулалармен және қоршаған ортамен өзара әрекетін едәуір күшейтеді.

Пластик бөлшектеріндегі электростатикалық заряд нейрондардың жұмысын бұзып, нерв импульстарының берілуін блоктап немесе бұрмалауы мүмкін. Бұл жүйке жүйесінің қызметінде ақаулар туғызып, организмде кең ауқымды патологиялық жағдайлардың пайда болуына әкелуі мүмкін. Бұл әртүрлі неврологиялық, вегетативтік, когнитивтік және психикалық бұзылуларда көрініс табады.2-кесте.

Нанопластиктің нерв жасушаларына әсері көптеген ауруларға әкелуі мүмкін: склероздың шашыраңқы және бүйірлік амотрофиялық түрлері, Альцгеймер және Паркинсон аурулары, аутоиммунды аурулар, эпилепсия, ишемиялық және геморрагиялық инсульт, депрессия, мазасыздық және когнитивтік бұзылыстар, шизофрения, биполярлы бұзылыс, аутизм және т.б.

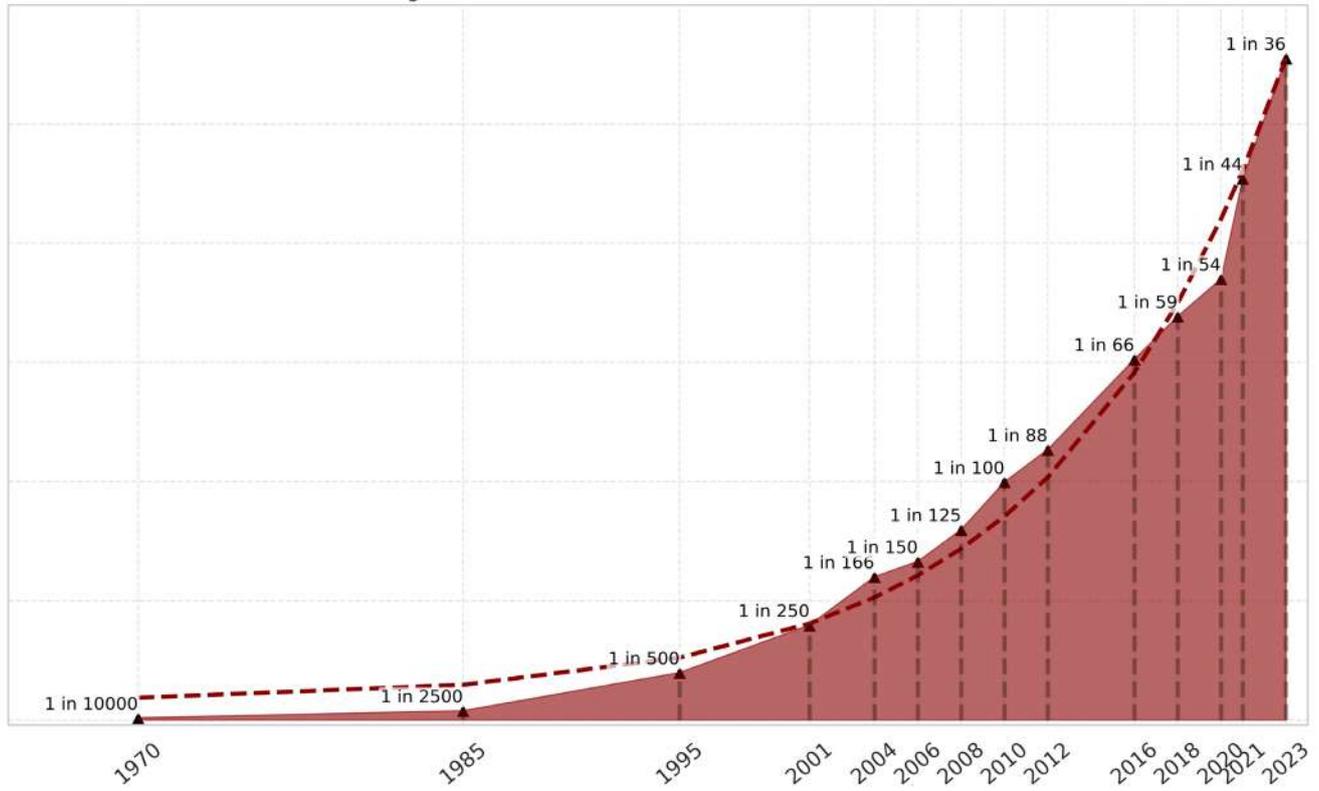
Категория	Көрінісі	Себебі / Механизмі
<b>Қозғалыс бұзылыстары</b>	Паралич	Жүйке импульстарының орталық жүйке жүйесінен бұлшық еттерге берілуінің бұзылуы
	Құрысу жағдайлары (судороги)	Қоздырғыш және тежегіш нейросигналдар арасындағы теңгерімсіздік
	Сезімталдықты жоғалту	Рецептордан миға ақпарат беретін сенсорлық нейрондық тізбектердің жұмысының бұзылуы
	Қозғалысты үйлестірудің бұзылуы	Мишық немесе омыртқа миының өткізгіш жолдарының зақымдануы
<b>Сенсорлық бұзылыстар</b>	Сөйлеу, көру және есту бұзылыстары	Мидың сенсорлық және моторлық орталықтарына байланысты нерв жолдарының зақымдануы
<b>Вегетативтік бұзылыстар</b>	Тыныс алу, жүрек соғуы және ас қорыту функцияларының бұзылуы	Автономды (вегетативтік) жүйке жүйесінің жұмысының бұзылуы
	Терморегуляцияның бұзылуы және ішкі мүшелердің жұмысы	Вегетативтік реттеуші орталықтардың дисфункциясы
<b>Когнитивтік бұзылыстар</b>	Есте сақтау және зейіннің бұзылуы	Ми қабығында құрылымдық немесе функционалдық өзгерістер
	Сананың бұзылуы, кома	Мидың ретикулярлы формациясының зақымдануы, ол сергектік пен сана деңгейін реттеуде маңызды рөл атқарады
<b>Психоэмоциялық бұзылыстар</b>	Мазасыздық, депрессия, көңіл-күйдің бұзылуы	Нейротрансмиттерлердің теңгерімсіздігі, ми эмоциялық орталықтарының зақымдануы

**2-кесте.** Нанопластиктің нейрондарға әсерінен туындайтын патологиялық жағдайлардың спектрі

### **Микро- және нанопластик – аутистикалық спектрлі бұзылыстардың қауіп факторы**

Қоршаған ортаның пластикпен ластануының артуына байланысты аутистикалық спектрлі бұзылыстардың таралуы да көбейіп отыр (96-97-суреттер).

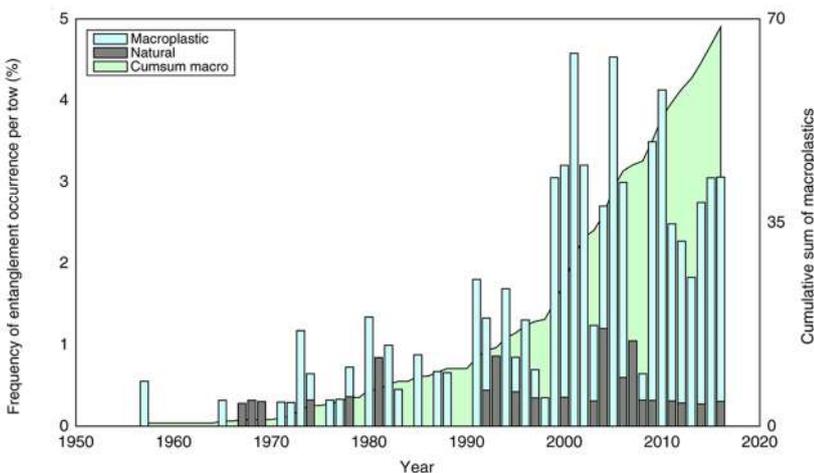
The Rising Prevalence of Autism in the U.S. from 1970 to 2023



96-сурет. АҚШ-та аутизмнің таралуының өсуі, 1970 жылдан 2023 жылға дейін

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

<https://tobyrogers.substack.com/p/the-political-economy-of-autism> (Қол жеткізу күні: 01.05.2025).



97-сурет. 1957 жылдан 2020 жылға дейін мұхиттағы пластик мөлшерінің өсуі

Дереккөз: 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>

АҚШ-та әр 36 баланың біреуінде аутизм спектрлік бұзылысы анықталған (CDC-ның Аутизмді және даму бұзылуларын бақылау желісінің – ADDM – бағалауларына сәйкес). 2020 жылғы деректерге қарағанда, аутизм жағдайлары 2000 жылмен салыстырғанда 317 % өскен<sup>250, 251</sup>.

Эмбриондық кезеңнен бастап және өмірдің алғашқы жылдарында адамның нерв жүйесі қалыптасады. Зерттеулер микро- және нанопластиктің әсері мен аутизм спектрлік бұзылыстарының дамуы арасында потенциалды байланыс бар екенін көрсетеді. Корей ғалымдарының эксперименттік деректері пренатальдық (тұқым қуалаушылық алдындағы) және постнатальдық (туғаннан кейінгі) микро- және нанопластиктің әсері нейроқалыптасу бұзылыстарының пайда болуына ықпал етуі мүмкін екенін көрсетеді<sup>252</sup>.

Адамның нервтік өсімдік жасушаларына полистиролдан жасалған нанопластиктердің молекулалық әсерін зерттеу көрсеткендей, нанопластиктің әсері тіндердің зақымдалуына және неврологиялық дамуымен байланысты аурулардың пайда болуына әкелуі мүмкін<sup>253</sup>.

Кеміргіштерге жүргізілген зерттеулер<sup>254</sup> көрсеткендей, жүктілік және емізу кезеңінде аналарға микро- және нанопластиктің әсері ұрпақтың гиппокампында нейрогенездің бұзылуына әкелуі мүмкін, сондай-ақ қимылдық қыртыс, гиппокамп, гипоталамус, сопақша ми және иіс алаңы сияқты мидың құрылымдарының көлемінің кішіреюіне себеп болуы мүмкін.

Нерв тіндерінің ақуыздарының құрылымы мен қызметінің өзгеруі көптеген аурулардың, соның ішінде аутизмнің дамуы үшін ерекше маңызды болып табылады<sup>255</sup>.

Соңғы зерттеулер көрсеткендей, нанопластиктер негізінен ақуыздармен әлсіз байланыстар арқылы әрекеттеседі, мысалы: гидрофобтық өзара әрекеттесулер, сутектік байланыстар, Ван-дер-Ваальс күштері және электростатикалық күштер<sup>256</sup>. Бұл ақуыз молекулаларының құрылымдық деформациясына әкеліп, олардың функциясын бұзады. Ақуыздардың нейрондық желілердің қалыптасуы мен синапстық сигналдардың берілуіндегі рөлін ескере отырып, мұндай өзгерістер аутизм спектрлік бұзылыстарының дамуына әсер етуі мүмкін.

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

<sup>251</sup>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).

<sup>252</sup>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>

<sup>253</sup>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>

<sup>254</sup>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>

<sup>255</sup>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>

<sup>256</sup>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>

## Жүрек-қантамыр ауруларының патогенезіне МНП-тің қатысуы

Пластик бөлшектері тек қан айналымында жүрумен шектелмей, сонымен қатар қан тамырларының қабырғаларына шөгіп, патологиялық өзгерістер каскадын іске қосуға қабілетті. Ең алаңдатарлығы – микропластиктің атеросклеротикалық түйіндерден анықталуы<sup>257</sup>. Жақында жүргізілген зерттеу көрсеткендей, ұйқы артерияларында микропластик анықталған науқастарда миокард инфарктісі, инсульт және өлім қаупі 4,5 есе жоғары болған. Бұл пластик бөлшектерінің атеросклеротикалық түйіндердің қалыптасуы мен тұрақсыздануына белсенді қатысатынын, олардың жарылуын және тромб түзілуін қоздыратынын көрсетеді<sup>258</sup>. МНП эндотелийдің тұтастығын да бұзады. Эндотелий – қан тамырларының ішкі бетін астарлап, тамыр тонусын реттеуге, тромб түзілуінің алдын алуға және қабыну реакцияларын бақылауға жауапты негізгі жасушалық қабат. Пластик бөлшектерінің әсерінен эндотелийдің зақымдануы созылмалы қабынуға және тромб түзілу қаупінің артуына әкеледі. Бұл әсіресе жүрек пен миды қоректендіретін артериялар үшін өте қауіпті<sup>259</sup>. Микропластик тромбоциттер мен эритроциттер сияқты қанның формалық элементтерімен өзара әрекеттеседі. Ол тромбоциттердің агрегациясын күшейтіп, тромб түзілу процесін бастайды. Сонымен қатар, микропластиктің беті жасушаларға механикалық зақым келтіруі және қанның үю каскадтарын белсендіруі мүмкін, бұл ұзақ мерзімді перспективада созылмалы гиперкоагуляцияға және микротамырлық бұзылыстарға әкелуі ықтимал.

Иммундық жасушалар пластиктің микробөлшектерін сіңіре алады, алайда оларды толық ыдырататын механизмдерге ие емес. Бұл жасушалардың деформациясына және олардың көлемінің ұлғаюына әкеледі. Осындай өзгерген жасушалардың мидың ұсақ тамырларында жиналуы микротромбтардың түзілуіне ықпал етеді, бұл ми қан айналымының бұзылуына және инсульт қаупінің артуына, соның ішінде жас адамдар арасында да, себеп болуы мүмкін<sup>260</sup>. Мидың оттегімен қамтамасыз етілуінің созылмалы төмендеуі (гипоксия) нейрондардың өліміне және нейродегенеративті өзгерістердің, соның ішінде ми тінінің атрофиясының дамуына әкеледі<sup>261</sup>. Ұзақ уақыт бойы әсер еткен жағдайда бұл процестер мидың жекелеген құрылымдарының көлемінің кемуіне әкелуі мүмкін.

Электростатикалық зарядтың арқасында МНП жасушалық мембраналармен белсенді әрекеттесіп, олардың электрлік потенциалын бұзады. Бұл өз кезегінде тамырлардың қысылғыштығына, миоциттердегі сигналдардың берілуіне және жүрек ритміне әсер етеді. Жүрек-қан тамырлары ауруларынан өлім-жітім бүкіл әлемде тұрақты түрде өсуде (98-сурет). Арнайы назарды 25–44 жас аралығындағы жас адамдар арасындағы кенеттен жүрек өлімі синдромына аудару қажет<sup>262</sup> (99-сурет). АҚШ-та бұл синдром негізгі өлім себебі ретінде танылған. Соңғы жиырма жылда жағдайлар саны күрт өскен. МНП-тің кең таралуын ескере отырып, олардың осы қайғылы оқиғалардағы ықтимал рөлін жоққа шығаруға болмайды.

<sup>257</sup>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>

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

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

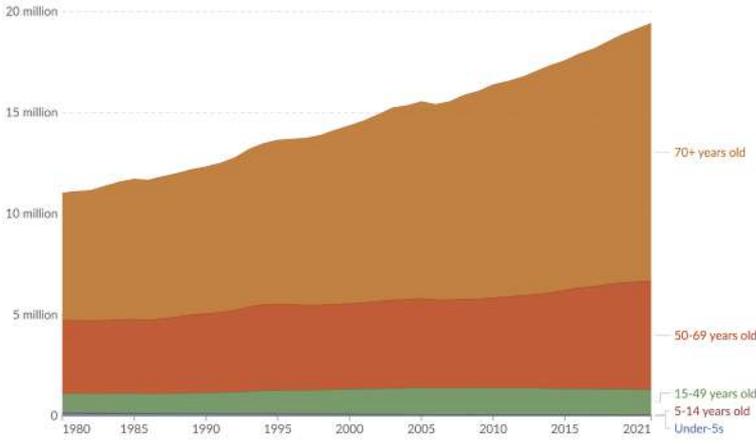
<sup>260</sup>Huang, H. et al. Microplastics in the bloodstream can induce cerebral thrombosis by causing cell obstruction and lead to neurobehavioral abnormalities. *Sci. Adv.* 11, eadr8243 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adr8243>

<sup>261</sup>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>

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

### Number of deaths from cardiovascular diseases by age, World

Estimated annual number of deaths from cardiovascular diseases<sup>1</sup> in each age group. Estimates come with wide uncertainties especially for countries with poor vital registration<sup>2</sup>.

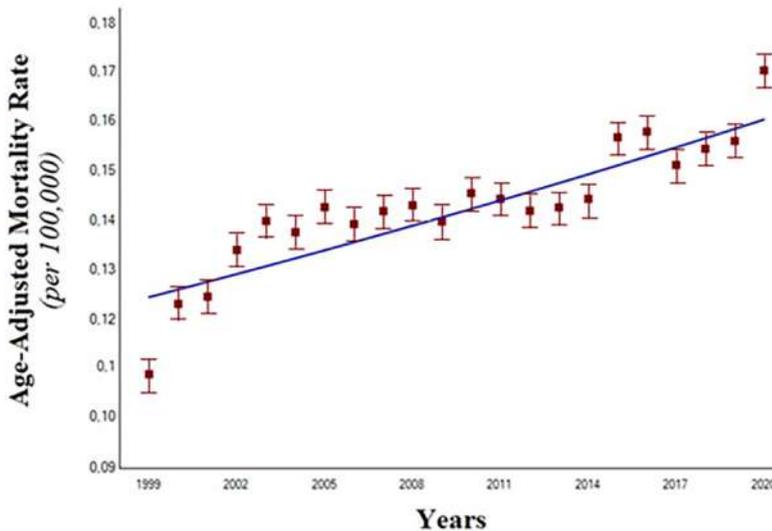


Data source: IHME, Global Burden of Disease (2024) OurWorldinData.org/causes-of-death | CC BY

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

**98-сурет.** Жас бойынша жүрек-қан тамырлары ауруларынан болатын өлім саны. Әлем

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



**99-сурет.** 1999–2020 жылдар аралығында АҚШ-та 25–44 жас аралығындағы жас ересектер арасында кенеттен жүрек өлімі салдарынан болатын жасқа түзетілген өлім көрсеткіштерінің тенденциялары және сәйкес 95 % сенімділік интервалы.

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

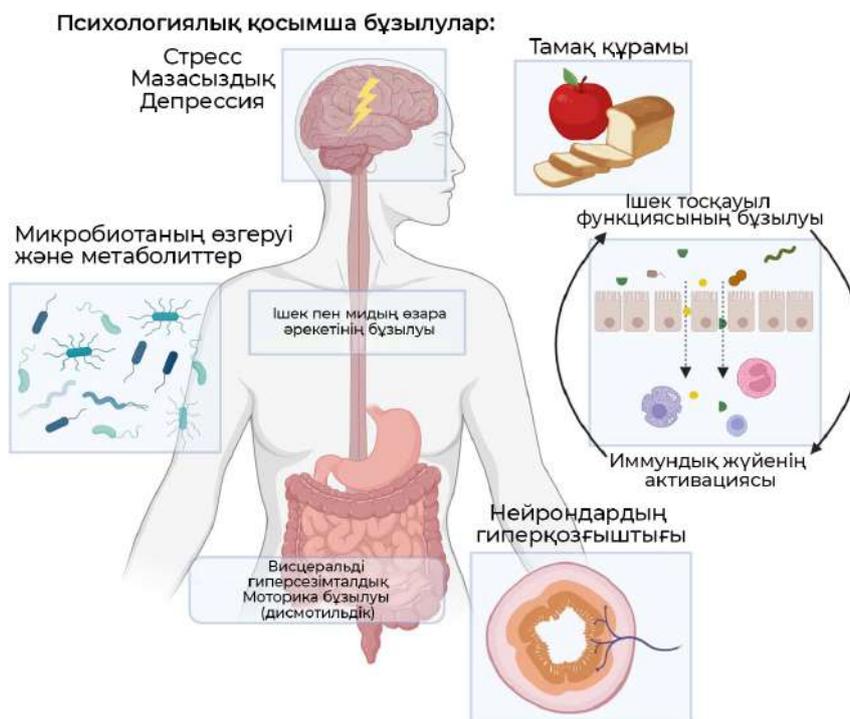
Тағы бір маңызды мәселе — кенеттен балалар өлімі көрсеткішінің өсуі. Тек АҚШ-та бұл синдромның көрсеткіші 2019 жылдан 2020 жылға дейін 15 % өсті, балалар өлімінің себептері арасында төртінші орыннан үшінші орынға көтерілді<sup>263</sup>. Оның себептері әлі толық анықталмағанына қарамастан, көптеген ғалымдар жүрек ритмі мен тамыр тонусын реттеуді бұзатын факторлар маңызды рөл атқаруы мүмкін деп болжайды. Плацента арқылы өтіп, дамып келе жатқан организмнің тіндерінде жиналуға қабілетті нанопластик — ықтимал қауіп факторларының бірі болып табылады. Көптеген ғалымдар пікірінше, нанопластик «көрінбейтін өлтіруші» рөлін атқаратын негізгі кандидаттардың бірі.

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

Жүрек — ең көп энергия тұтынатын органдардың бірі ретінде, оның жұмысы митохондриялардың тиімділігінен тікелей тәуелді. Микропластик бөлшектерінің әсері митохондриялық процестерді бұзып, миокардта энергия тапшылығын әкелуі мүмкін, нәтижесінде жүрек функциясының бұзылуына себеп болады.

## МНП туындатқан асқазан-ішек жолдарының бұзылуы

Ішек — адамның ең ірі иммундық органы. Онда барлық иммундық жасушалардың шамамен 70 % шоғырланған, шамамен 500 миллион нейрон және 100 триллионнан астам микроорганизм бар<sup>264</sup>. Ішектің микробиотасы иммундық жүйені қолдауда негізгі рөл атқарады. Микробиотаның тепе-теңдігінің бұзылуы иммунитеттің әлсіреуіне және әртүрлі аурулардың пайда болуына әкелуі мүмкін. Ішек жиі «екінші ми» деп аталады, себебі онда тығыз нейрондық желі бар және ол орталық жүйке жүйесімен өзара әрекеттесе алады<sup>265</sup>. Ми мен ішек арасындағы күрделі биохимиялық сигналдардың алмасуы «ми-ішек осі» деп аталады және ол физикалық әрі психоэмоционалдық күйді реттеуде маңызды рөл атқарады (100-сурет).



**100-сурет.** Ішек пен ми арасындағы өзара әрекеттестіктің бұзылуы кезіндегі патофизиологиялық механизмдер

Дереккөз: 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).

<sup>264</sup>Yu, 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>

<sup>265</sup>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>

Сау ішек тосқауылы микробтар мен бөтен бөлшектердің ішек қуысынан қан айналымына етуін болдырмайды<sup>265</sup>. Микро- және нанопластик бұл қорғанысты бұзып, ішек қабырғасының өткізгіштігін арттырады. Нәтижесінде ішекте де, басқа ағзаларда да қабыну дамып, иммунитеттің әлсіреуіне әкеледі<sup>266</sup>. Сол уақытта МНП ішектің микробиота құрамына әсер етіп, пайдалы және патогенді микроорганизмдер арасындағы тепе-теңдікті бұзады. Бұл ас қорыту процестерін бұзып, ағзаның тағамдық аллергияларды ыдырату қабілетін төмендетеді және тағамдық аллергияның даму қаупін арттырады<sup>267</sup>.

Осылайша, зиянды шеңбер қалыптасады: пластик микробиотаны бұзып, қабынуды және ішек қабырғасының өткізгіштігін күшейтеді, нәтижесінде токсиндер, бактериялар және пластик қанға ене бастайды. Бұл заттардың қанға түсуі иммундық жауапты іске қосып, бүкіл ағзада созылмалы қабынуға әкеледі. Қан арқылы токсиндер, бактериялар және нанопластик гематоэнцефалиялық тосқауылдан өтіп, миға жетіп, бас миында қабыну реакцияларын тудырады. Бұл процестер өз кезегінде иммундық жауапты реттеуді одан әрі бұзып, ағзаның стресс реакциясын күшейтіп, нейроэндокриндік механизмдер арқылы микробиота күйіне теріс әсер етуі мүмкін, осылайша «ішек–ми» осінде зиянды шеңберді қалыптастырады.

Ішектің микробиомымен орталық жүйке жүйесінің өзара әрекеттесуінің бұзылуы тікелей неврологиялық бұзылыстармен байланысты. Мысалы, аутизм спектрлі бұзылыстары бар балаларда микробиотаның айқын тепе-теңсіздігі анықталған, бұл микробиологиялық талдау мен ас қорыту жүйесінің функцияларын бағалау арқылы расталады<sup>268</sup>.

Ішектің қабыну аурулары бар науқастарды зерттеу көрсеткендей, аурудың ауырлығы мен нәжістегі микропластик концентрациясы арасында оң корреляция бар. Қабыну аурулары бар науқастарда бұл көрсеткіш сау адамдармен салыстырғанда жоғары (41,8 дана/г қарсы 28,0 дана/г). Сонымен қатар, мұндай науқастарда тік ішектің шырышты қабатының жаралы зақымдарында микропластиктің айтарлықтай жиналуы анықталды<sup>269</sup>.

Сонымен қатар, ішекте қалған микропластик организмге алғашқы түскеннен кейін де ұзақ уақыт бойы зиянды әсерін жалғастыра береді.

<sup>265</sup>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>

<sup>266</sup>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>

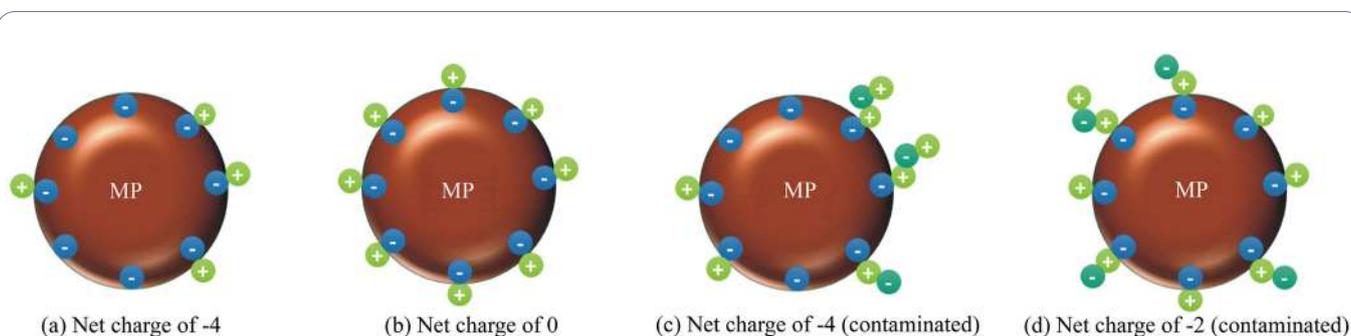
<sup>267</sup>ScienceDirect. Food allergy. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/food-allergy> (Accessed May 1, 2025).

<sup>268</sup>Su, 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>

<sup>269</sup>ScienceDirect. Inflammatory bowel disease. ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/inflammatory-bowel-disease> (Accessed May 1, 2025).

## МНП-тің иммундық жүйеге әсері

МНП ағзадағы иммундық жауапты бұзып, патогендердің көбеюіне жағдай жасайды. Зарядталған МНП бөлшектері басқа молекулаларды — мысалы, токсиндер, ауыр металдар тұздары, бактериялар мен вирустарды — өзіне оңай тартады (101-сурет). Бұл оларды токсикалық қосылыстардың «тасымалдау платформасына» айналдырып, олардың биологиялық белсенділігін және уыттылығын күшейтеді. Нанопластиктің электростатикалық заряды бактериялар мен вирустардың өміршеңдігін ұзақ уақыт сақтауына мүмкіндік беретін қосымша энергия немесе «қосымша заряд» қызметін атқарады.



**101-сурет.** Суды ластаушы заттардан туындайтын микропластиктің беттік зарядтарының әсерін көрсету иллюстрациясы

Дереккөз: 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>

Сондай-ақ, зарядталған микро- және нанопластик бөлшектері суда және ауада ұзақ уақыт сақталып, аэрозольдерге оңай көтерілуі және тыныс алу жолдарына енуі мүмкін, бұл олардың адам организміне түсу қаупін арттырады.

МНП-тің микробиотаға, патогендерге және иммундық жүйеге әсерінің қосындысы денсаулыққа кешенді қауіптер тудырады.

Микропластикпен байланысатын иммундық жасушалар олармен кездеспейтіндерге қарағанда шамамен үш есе тез өледі<sup>270</sup>.

Микропластик бөлшектері электростатикалық және гидрофобтық әрекеттесу арқылы вирустарды өз бетіне адсорбциялай алады, осылайша олардың өміршеңдігін ұзартуға мүмкіндік береді<sup>271</sup>.

<sup>270</sup>Plastics News. Study highlights health hazards of microplastics. (2019) <https://www.plasticsnews.com/news/study-highlights-health-hazards-microplastics> (Accessed May 1, 2025).

<sup>271</sup>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>

Микропластиктің бетінде орналасқан вирустар үш күнге дейін белсенді күйінде сақталады — бұл, мысалы, тазарту қондырғыларынан жағажайларға дейін жету үшін жеткілікті уақыт<sup>272</sup>.

Микропластик патогендердің таралуын жеңілдетеді және олардың генетикалық рекомбинациясына ықпал етуі мүмкін. Зерттеулер көрсеткендей, пластик бөлшектері дәрілердің әсерін әлсіретіп қана қоймай, антибиотиктерге төзімді бактериялардың дамуына да ықпал ете алады<sup>273</sup>.

Зарядталған МНП бөлшектері микроорганизмдердің колониялануы үшін платформа қызметін атқарады<sup>274</sup>. Бактериялар мен саңырауқұлақтар микропластиктің электростатикалық өрістерін пайдалана отырып, жеделдетілген өсу көрсетеді. Дафнияларға жүргізілген зерттеулер микропластиктің әсері тотығу стрессін тудыратынын және саңырауқұлақтық инфекциялардың (*Metschnikowia* түрі) деңгейін 11 есе арттыратынын анықтады<sup>275</sup>. Бұл құбылыс саңырауқұлақ ауруларының таралу аймағы мен тұрақтылығының жаһандық кеңеюімен сәйкес келеді, әрі ДДСҰ мұны қоғамдық денсаулыққа төнетін өсіп келе жатқан қауіп ретінде атап өткен.



**«Бактериялардың антимиқробтық препараттарға төзімділігі пандемиясының көлеңкесінен шыға отырып, саңырауқұлақтық инфекциялар таралып, емдеуге барған сайын төзімді бола түсуде және бүкіл әлем бойынша қоғамдық денсаулық сақтау мәселесіне айналу», — деді ДДСҰ-ның антимиқробтық төзімділік жөніндегі Бас директордың көмекшісі доктор Ханан Балхи<sup>276</sup>.**

МНП бар жағдайда бөлінетін саңырауқұлақ метаболиттері ісіктердің<sup>277</sup> өсуімен және созылмалы қабынумен байланысты. Кейбір қатерлі ісік түрлерінде саңырауқұлақ ДНҚ-сы анықталған, бұл МНП-тің онкогенездегі ықтимал рөлін көрсетеді<sup>278</sup>.

<sup>272</sup>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).

<sup>273</sup>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>

<sup>274</sup>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>

<sup>275</sup>Manzi, F., Schlösser, P., Owczar, 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>

<sup>276</sup>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).

<sup>277</sup>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>

<sup>278</sup>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>

## МНП-тің онкогенді әсері.

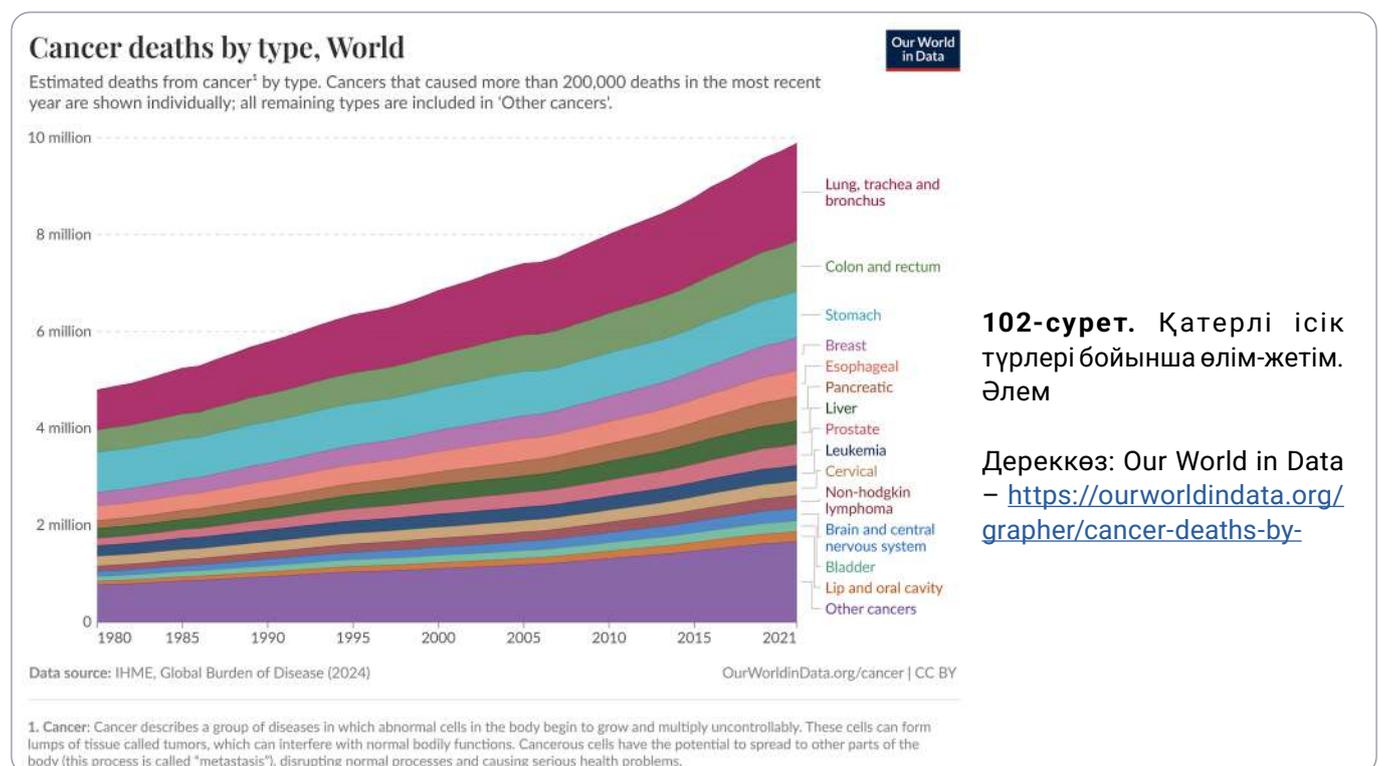
### Мутациялар мен метастаздардың даму механизмдері

Жоғарыда келтірілген ақпаратқа сәйкес, микро- және нанопластик жасушалық және жүйелік деңгейдегі теріс әсерлерін ескере отырып, қатерлі ісіктердің дамуында маңызды фактор болып табылады.

Зерттеулер көрсеткендей, микропластик пен нанопластик қатерлі ісіктің дамуында жасырын катализатор рөлін атқара алады, жасушалардың миграциясын күшейтіп, метастаз процесін қолдайды<sup>279</sup>. Сонымен қатар, МНП бөлшектері жасушалардың ішінде ұзақ уақыт сақталып, бөліну кезінде ұрпақ жасушаларына берілуі мүмкін екені анықталды.

Қазіргі уақытта әлемде қатерлі ісік ауруларынан болатын өлім-жетім әлі де өсіп келеді (102-бет).

2050 жылға қарай жаңа қатерлі ісік жағдайларының саны 77% артады деп болжануда<sup>280</sup>.



<sup>279</sup>Bryszak-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>

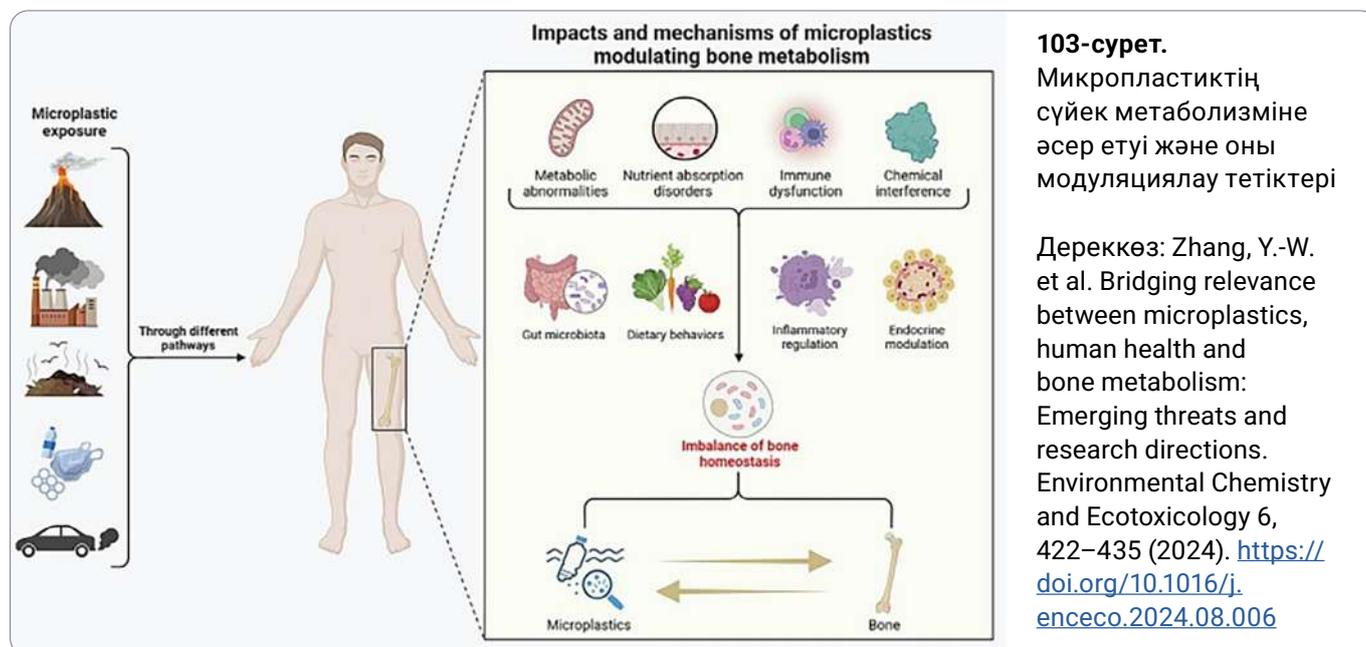
<sup>280</sup>World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024) <https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services> (Accessed May 1, 2025).

## МНП-тің кальций алмасуына және сүйек құрылымына әсері

Пластик бөлшектері адамның физикалық қызметінің негізі болып табылатын тірек-қимыл аппаратына да ене алады (103-сурет). Қай жерде бұзу мен қайта қалпына келтіру арасындағы нәзік тепе-теңдік сақталып, сүйектер күн сайын жаңарып, буындар үйкелісті бәсеңдетіп, бұлшықеттер қозғалыс пен жылуды қамтамасыз етіп тұрса, сол жерде микропластик — оның ішінде электростатикалық зарядының арқасында — құрылыс молекулаларын алмастырып, баяу әрі зиянды процестерді іске қоса алады.

Зерттеулер микропластиктің сүйек тініне ене алатынын көрсетеді, ал оның молекулалық құрылымы сүйек метаболизмі үшін қажет кальций мен басқа да минералдарды еліктеуге мүмкіндік береді. Соның салдарынан пластик ағза тарапынан сүйекке қажет құрылыс материалы ретінде қате қабылдануы мүмкін. Ағза сүйектерді сөздің тура мағынасында «пластиктен» құра бастайды.

Бұл молекулалық танудың бұзылуы бірқатар жағымсыз салдарға алып келеді: микропластик остеобластар мен остеокластардың қызметін бұзып, кальций мен фосфор алмасуын өзгертіп, остеопороздың дамуына ықпал етуі мүмкін. Қабыну каскадтары іске қосылады, гендердің экспрессиясы бұзылады, ал сүйек тіні тығыздығы мен беріктігін жоғалтады. Сонымен қатар, нанопластиктің болуы созылмалы қабынуды туындатып, буын шеміршегі мен сүйек тінін зақымдауы мүмкін, бұл остеоартриттің, ауырсыну синдромының және қозғалыс шектеулігінің қаупін арттырады<sup>281, 282</sup>.



<sup>281</sup>Zhang, Y.-W. et al. Bridging relevance between microplastics, human health and bone metabolism: Emerging threats and research directions. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 6, 422–435 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.08.006>

<sup>282</sup>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).

Тышқандарға жүргізілген зерттеу полистирол микропластикін алған жануарларда остеобластар санының айтарлықтай азайғанын дәлелдеді<sup>280</sup>.

Пластик қаңқа бұлшықетіне де кем түспейтін қауіп төндіреді. Зерттеулер нанопластиктердің бұлшықет жасушаларына еніп, митохондриялардың жұмысын бұза алатынын көрсетеді. Энергия тапшылығы пайда болып, белсенді оттегінің агрессивті түрлері көбейеді, бұл жасушалардың қартаюын жеделдетеді, бұлшықеттердің жүктемеден кейін қалпына келуін бұзады және олардың атрофиясына ықпал етеді. Әсіресе егде жастағы адамдар мен созылмалы аурулары бар науқастар өте осал келеді.

Микро және нанопластик сүйек кемігінде жиналып<sup>283</sup>, одан эритроциттер, лейкоциттер, тромбоциттер, остециттер, хондроциттер және адипоциттер түзілетін бағаналы жасушалардың (гемопоэтикалық және мезенхималық)<sup>284</sup> түзілуін бұзады. Олардың дисфункциясы ағзаның жүйелік зақымдануына әкеледі.

## МНП әсеріне байланысты репродуктивті бұзылулар.

### Бедеулік және эректильді дисфункция

#### Ұрықталу қабілетінің төмендеуі

Болжамдарға қарағанда, 2045 жылға қарай әлем толықтай бедеулікке ұшырайды<sup>285</sup>.

2018 жылы **XIII Халықаралық сперматология симпозиумында** Стокгольмде жетекші дәрігерлер мен ғалымдар тобы үкіметтерді ерлердің ұрықтылығының төмендеуі қоғамдық денсаулық сақтау үшін маңызды мәселе ретінде мойындауға және адамзаттың тіршілігі үшін ерлердің репродуктивтік денсаулығының маңыздылығын тануға шақырды<sup>286</sup>.

Репродуктивтік денсаулық, кең тараған пікірге қарамастан, тек гормондық теңгеріммен, тұқым қуалаушылықпен және өмір салтымен анықталмайды. Ғылыми зерттеулердің саны артқан сайын митохондриялардың ұрықтану және эмбрионның дамуы процесіндегі шешуші рөлі көрсетіліп отыр. Бұл ең кішкентай органеллалар, барлық өмірлік процестер үшін қажетті энергияны өндіруге жауапты, ерлер мен әйелдердің ұрықтылығында шешуші рөл атқарады, ал олардың адам репродуктивтік функциясы үшін мәні әлдеқайда терең екенін көрсетеді.

Митохондриялардың қызметіндегі бұзылыстар әйелдер мен ерлердегі бедеулікке себеп болуы мүмкін. Ерлерде сперматозоидтің құйрық бөлігінде орналасқан митохондриялар ұрықтандыру үшін қажетті қозғалғыштыққа жауап береді. Олардың қызметіндегі ақаулар сперматозоидтердің қозғалғыштығын төмендетіп, аномалияларға әкелуі мүмкін.

<sup>280</sup>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).

<sup>283</sup>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>

<sup>284</sup>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>

<sup>285</sup>The Guardian. Shanna Swan: 'Most couples may have to use assisted reproduction by 2045'. (2021)

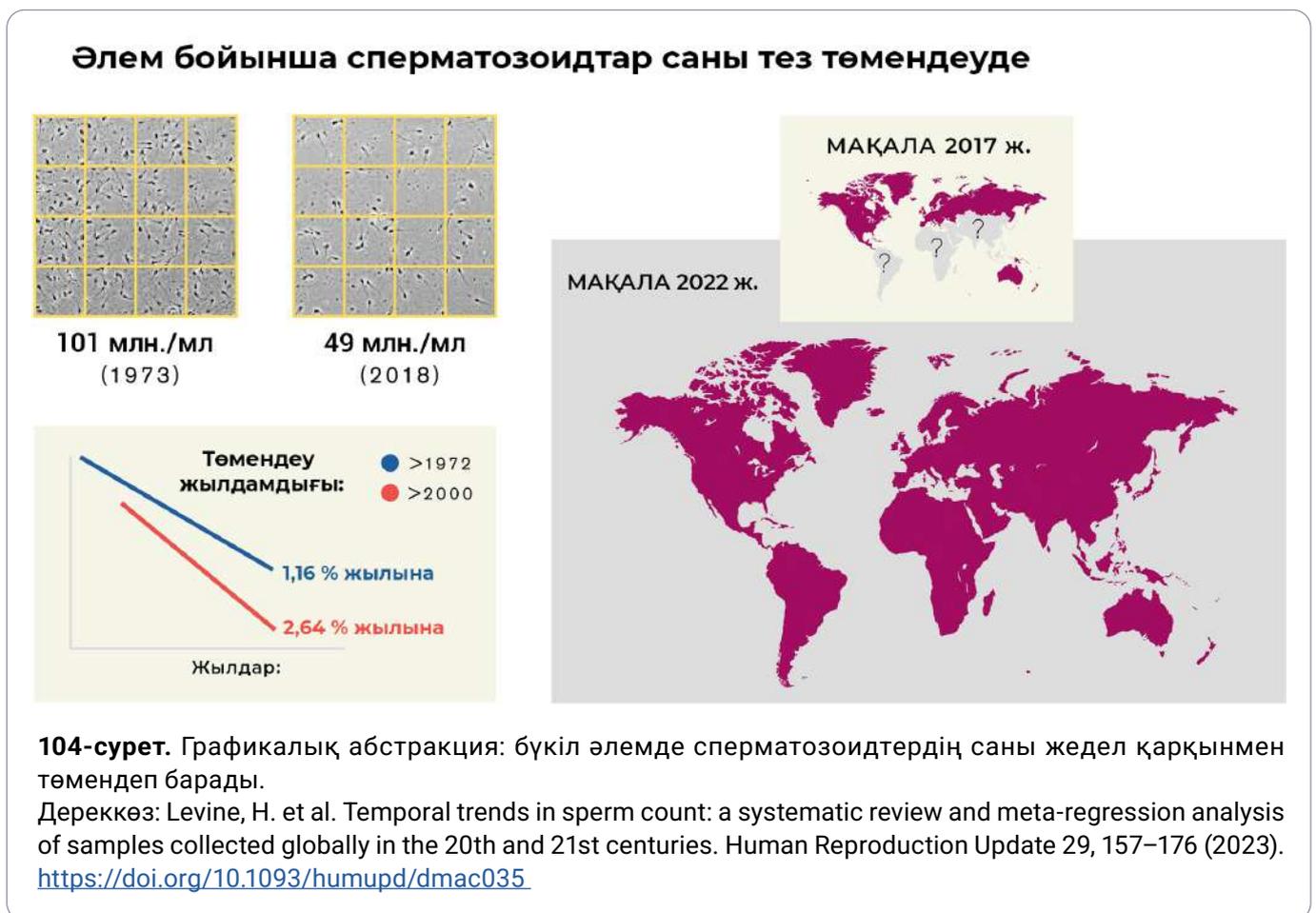
<https://www.theguardian.com/society/2021/mar/28/shanna-swan-fertility-reproduction-count-down> (Accessed May 1, 2025).

<sup>286</sup>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>

Қытай ғалымдарының жүргізген зерттеулерінде барлық сперма үлгілерінен микропластик анықталды – орташа есеппен 7 мкм дейінгі екі бөлшек, көбінесе полистирол<sup>287</sup>. Оның болуы сперматозоидтердің морфологиялық бұзылыстарымен және теломерлердің қысқаруымен байланысты.

Микроскопиялық өлшемдері мен зарядының арқасында микропластик гематотестикалық тосқауылдан өтіп, жыныс мүшелеріне ене алады және олардың қызметін бұзады.

Арнайы алаңдаушылық тудыратын жайт – 1973 жылдан 2018 жылға дейін ерлердегі сперматозоидтердің жалпы саны 62,3% төмендегені байқалған тенденция<sup>288</sup> (104-сурет).

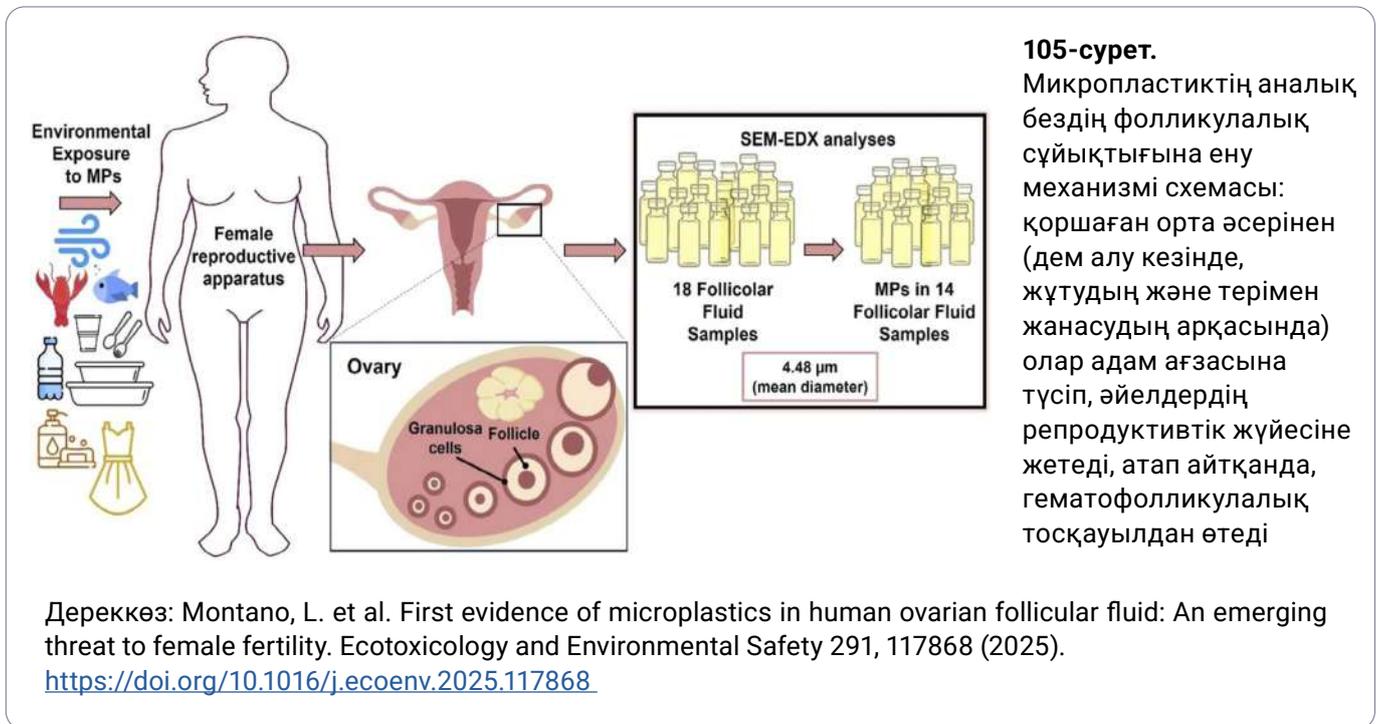


Фертильдікке көптеген факторлар әсер етсе де, ғалымдардың көбі пластикте кездесетін химиялық қосылыстардың осы үдерісте шешуші рөл атқаратынына бейім келеді. Пластикке икемділік беру үшін қолданылатын фталаттар гормондық фонды бұзып, либидоны төмендетіп, ерте жыныстық жетілуге және ұрық бездерінің қызметінің бұзылуына ықпал етуі мүмкін.

<sup>287</sup>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>

<sup>288</sup>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>

Әйелдердің фертильдігіне қатысты жағдай да алаңдаушылық тудырады. 2025 жылғы зерттеу 18 әйелдің 14-інде аналық бездің фолликулалық сұйықтығында микропластик бөлшектерін анықтады, орташа есеппен миллилитрге 2 000-нан астам бөлшек, олардың көпшілігінің диаметрі 5 мкм-ден аз болды<sup>289</sup> (105-сурет).



Бұл деректер пластик бөлшектерінің аналық бездегі гематофолликулалық тосқауылдан өту қабілетін көрсетеді. Жасушалық деңгейде микро- және нанопластик ДНҚ-ны зақымдауы, жасушалардың бөлінуін бұзуы және қабынуды туындатуы мүмкін. Олар гормондық реттеуге араласады, плацента қызметін бұзады, ангиогенезге әсер етеді және жатыр миомасының дамуына байланысты болуы мүмкін.

### Эректильдік дисфункция

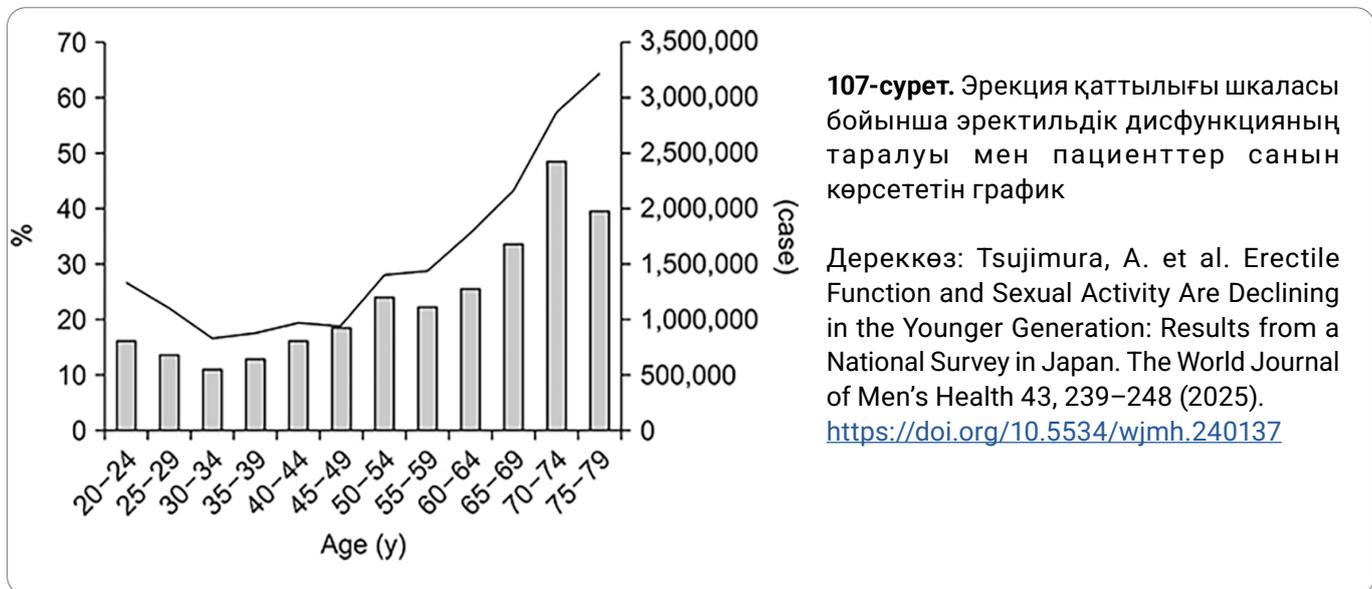
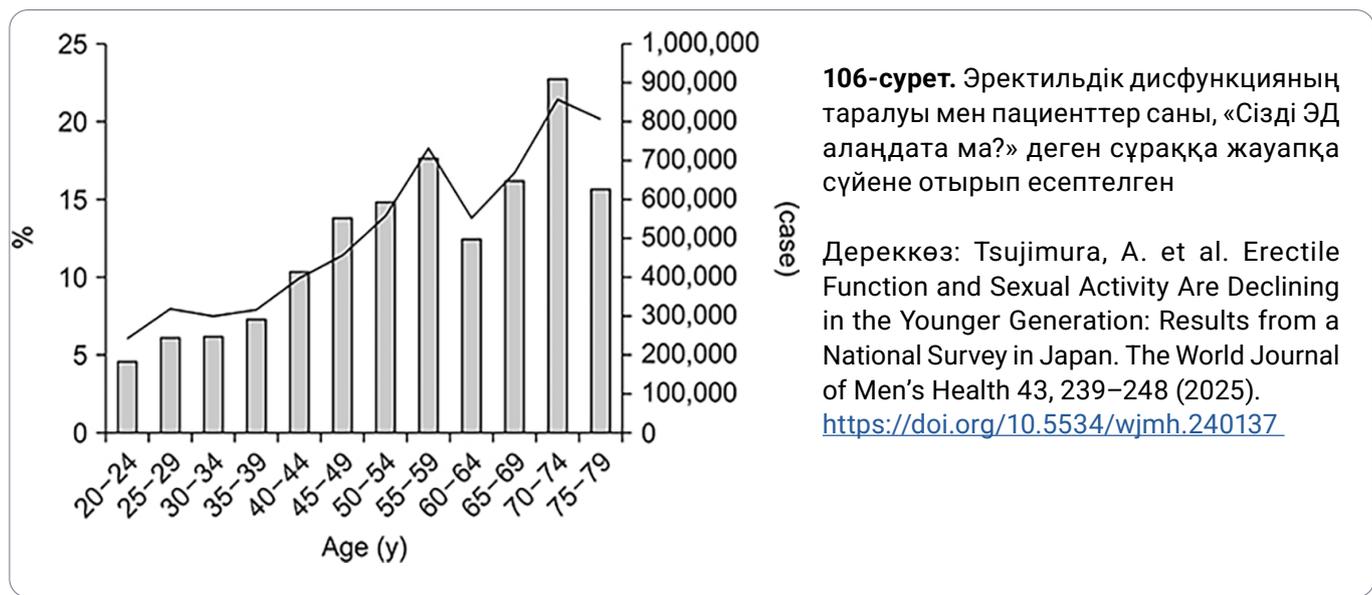
Жапонияда жүргізілген ұлттық зерттеу нәтижелері жас буында эректильдік функция мен сексуалдық белсенділіктің төмендейтінін көрсетті<sup>290</sup>. EHS негізіндегі бағалау ЭД-нің 30,9% таралуын анықтады, бұл шамамен 14 миллион ер адамға әсер етті және жыныстық құмарлық, эрекцияның қаттылығы, оргазмдар мен қанағаттану жапондық жас еркектерде, әсіресе 20 мен 24 жас аралығында күтілгеннен төмен болды, дегенмен бұл факторлар қартайған сайын нашарлауға бейім болды. Нақты айтқанда, 20–24 жас аралығындағы таралу деңгейі 26,6% құрады, бұл 50–54 жас аралығындағы көрсеткішпен (27,8%) дерлік тең болды (106, 107-суреттер).

<sup>289</sup>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>

<sup>290</sup>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>

Сонымен қатар, әлем бойынша жүргізілген басқа зерттеуде ерлердің үштен бірінде эректильдік дисфункция белгілері байқалатыны хабарланған, бұл ЭД сирек жағдай емес екенін және кез келген ер адамға әсер етуі мүмкін екенін көрсетеді. Жапонияда 1998 жылы жүргізілген алғашқы ресми ұлттық сексуалдық функцияны зерттеу нәтижелері бойынша шамамен 11,3 миллион адамда орташа немесе толық эректильдік дисфункция анықталған. Сонымен қатар, Жапонияда 1996 және 2015 жылдары жүргізілген ерлер бедеулігін зерттеулер таңқаларлық деректерді көрсетті. 2015 жылғы зерттеуде ерлердің 13,5% ЭД-ні негізгі себеп ретінде көрсетіп, ерлер бедеулігімен бетпе-бет келген, бұл 1996 жылға қарағанда төрт есеге жуық көп.

Қазіргі ғылыми деректер жиынтығы микропластик пен нанопластиктің ағзада репродуктивтік денсаулықтың нашарлауына жасырын, бірақ маңызды себептерінің бірі екенін көрсетеді. Бұл бөлшектер жыныс мүшелеріне еніп, митохондриялардың қызметін бұзып, қабынуды, гормондық бұзылыстарды және ДНҚ зақымдануын тудырады, сперматозоидтердің қозғалғыштығын және морфологиялық сапасын төмендетеді. Олар сперма мен фолликулалық сұйықтықта анықталады, бұл биологиялық тосқауылдарды жеңу және терең жүйелік әсердің бар екенін көрсетеді. Барлығы бұл тек жеке адамның денсаулығына ғана емес, адамзаттың репродуктивтік қабілетінің болашағына да қауіп төндіреді.



## МНП-тің плацентарлық тосқауылдан өтуі және дамушы ағзаға әсері

### Микро- және нанопластиктің ұрыққа пренатальды әсері

Жүкті әйелдер микропластиктің әсеріне ерекше осал екенін көрсетеді<sup>291</sup>. Ана ағзасына еніп, пластик бөлшектері плацента арқылы ұрыққа жетіп, жүктілікті реттейтін гормондардың секрециясына араласып, ерте босану, түсік тастау және ұрықтың дамуының бұзылу қаупін арттыра алады (108-бет). Бағалаулар бойынша, 2020 жылы 13,4 миллион бала (әр 10 баладан 1-еуі) ерте туылған (<37 апта), бұл балалар өлімінің негізгі себептерінің бірі болып қала береді. Аман қалған балаларда ауыр аурулар мен созылмалы жағдайлардың қаупі жоғары болады<sup>292</sup>.

Балалардың дамып келе жатқан эндокриндік жүйесі де гормондарды имитациялайтын немесе блоктайтын пластиктегі химиялық заттарға өте сезімтал<sup>293</sup> (109-сурет). Емшек сүті арқылы да нәрестелерге әсер ету мүмкін. Сонымен қатар, нанопластик кеш пайда болатын әсер көрсетуі мүмкін, балалар мен жасөспірімдердегі жыныстық жасушалардың түзілуін бұзып, ересек кезеңде фертильділікті төмендетеді.

Гематоплаценталық тосқауыл (ГПБ) ана мен ұрық арасындағы зат алмасуды реттеуде шешуші рөл атқарып, оны зиянды заттардан қорғайды. Алайда зерттеулер микро- және нанопластиктің ГПБ арқылы ене алатынын көрсетеді.

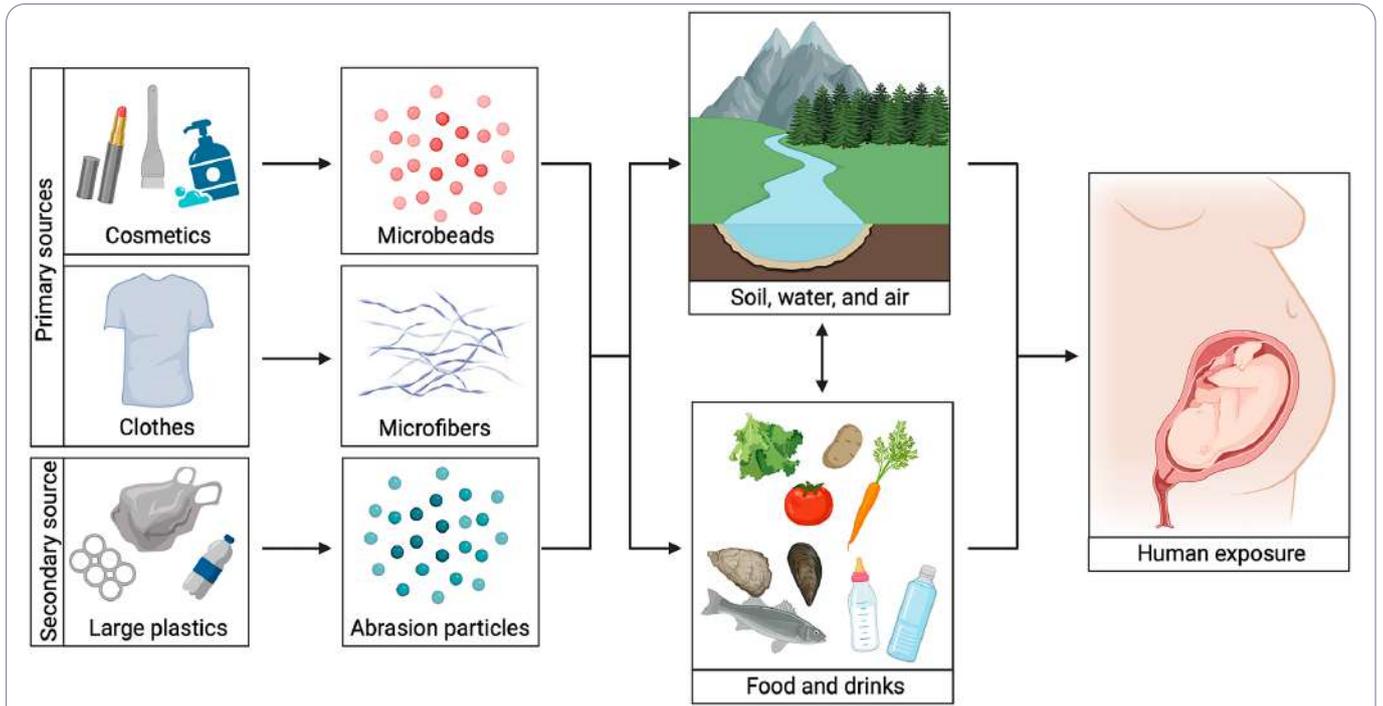
2020 жылы Антонио Рагуза жетекшілігімен жүргізілген зерттеу, рамандық микроспектроскопия әдісін (заттардың химиялық құрамын анықтау үшін жарық шашырауын талдауға негізделген әдіс) қолдана отырып, қалыпты жүкті әйелдердің алты плацентасының төртінде микропластиктің бар екенін анықтады. Үлгілерде 5–10 мкм өлшемді 12 бөлшек табылған, олардың құрамында полипропилен және косметика, бояулар, желімдер және гигиеналық құралдарда қолданылатын пигменттер бар<sup>294</sup>.

<sup>291</sup>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>

<sup>292</sup>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).

<sup>293</sup>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>

<sup>294</sup>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>



**108-сурет.** Микропластиктің ана ағзасына енуі

Дереккөз: 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>

**Плацента:**

- Тамырланудың төмендеуі (қанмен қамтамасыз етілуінің азаюы)
- Преэклампсия қаупінің жоғарылауы
- Өмірлік маңызды қоректік заттардың жетіспеушілігі
- Имундық микроорта бұзылуы

**Орталық жүйке жүйесі:**

- Тотығу стрессі
- Ұяшықтардың өміршеңдігінің төмендеуі
- Аздаған жетілген нейрондық жасушалар
- Мазасыздық және депрессияға ұқсас мінез-құлық

**Бауыр:**

- Бауырдың салыстырмалы массасының жоғарылауы
- Тотығу стрессі
- Қабыну
- Метаболизмнің бұзылуы

**Ішек:**

- Ішек дің жасушаларының көбірек саны
- Эндотелий және бокал тәрізді жасушаларының азаюы
- Микробиомның өзгеруі

**Өкпе:**

- Органоидтардың азаюы
- Органоидтардың кішіреюі
- Тыныс алу жолдарының эпителийінің дифференциациясының төмендеуі
- Микроталшықтардың енуі

**Репродуктивтік жүйе:**

- Тотығу стрессі
- Анус пен жыныс мүшелері арасындағы қышқтықтың қысқаруы
- Ұрық бездерінің массасының төмендеуі
- Сперматозоидтар санының азаюы
- Сперматозоид морфологиясының бұзылуы
- Фолликул санының азаюы
- Фолликул морфологиясының бұзылуы

**Дің жасушалары:**

- Жетілген жасушаларға дифференциацияның төмендеуі
- Адипоциттерге (май жасушаларына) дифференциацияның артуы

**109-сурет.** Микропластиктің дамушы ұрықтың әртүрлі органдары мен тіндеріне әсері

Дереккөз: 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>

Нью-Мексико университеті жүргізген зерттеу шала туған балалардың плаценталарындағы микропластик пен нанопластиктің концентрациясы мерзімінде туған балаларға қарағанда жоғары екенін көрсетті. Масс-спектрометрия әдісі қолданылған 158 плацентаны талдау мерзімінен бұрын босанған әйелдерде пластик бөлшектерінің жиналуы айтарлықтай көп болғанын анықтады<sup>295</sup>.



**«Нанобөлшектер ананың құрсағындағы балаға жанама әсер ететін сияқты, олар делдал заттар арқылы қан тамырларының түзілуін тежейді», — дейді биолог Тина Бюрки<sup>296</sup>.**

Полистиролдың наноөлшемді бөлшектері ұрықта, әсіресе когнитивтік жетіспеушіліктерге байланысты ми дамуының бұзылуын тудыруы мүмкін<sup>297</sup>.

Зерттеулерге сәйкес, жүктілік кезінде және өмірдің алғашқы айларында микропластиктің әсері әртүрлі түрлердің ұрпағында репродуктивтік және орталық жүйке жүйесінде қайтымсыз өзгерістерге әкелуі мүмкін<sup>298</sup>.

## Микро- және нанопластиктің нәрестелерге постнатальды әсері

Жаңа туған нәрестелер қоршаған ортадан келетін микро- және нанопластиктің тұрақты әсеріне ұшырайды.

2020 жылғы зерттеуге сәйкес<sup>299</sup>, сәбилер полипропилен бөтелкелерінен тамақтандыру кезінде күніне 4,5 миллионға дейін пластик бөлшектерін жұтуы мүмкін. Ал бұл — әлемде қолданылатын нәрестелерге арналған бөтелкелердің басым бөлігі.

Нәрестелер ана сүті арқылы да микропластикті жұтуы мүмкін. 2022 жылы 34 сау әйелдің емшек сүтін талдау үлгілердің 76%-ында микропластиктің бар екенін анықтады<sup>300</sup> (110-сурет). Микро- және нанопластик кеш әсерін көрсетіп, бала және жасөспірім кезеңінде жыныс жасушаларының қалыптасу үдерістерін бұзуы және ересек жаста ұрықтылықты(фертильность) төмендетуі мүмкін.

<sup>295</sup>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>

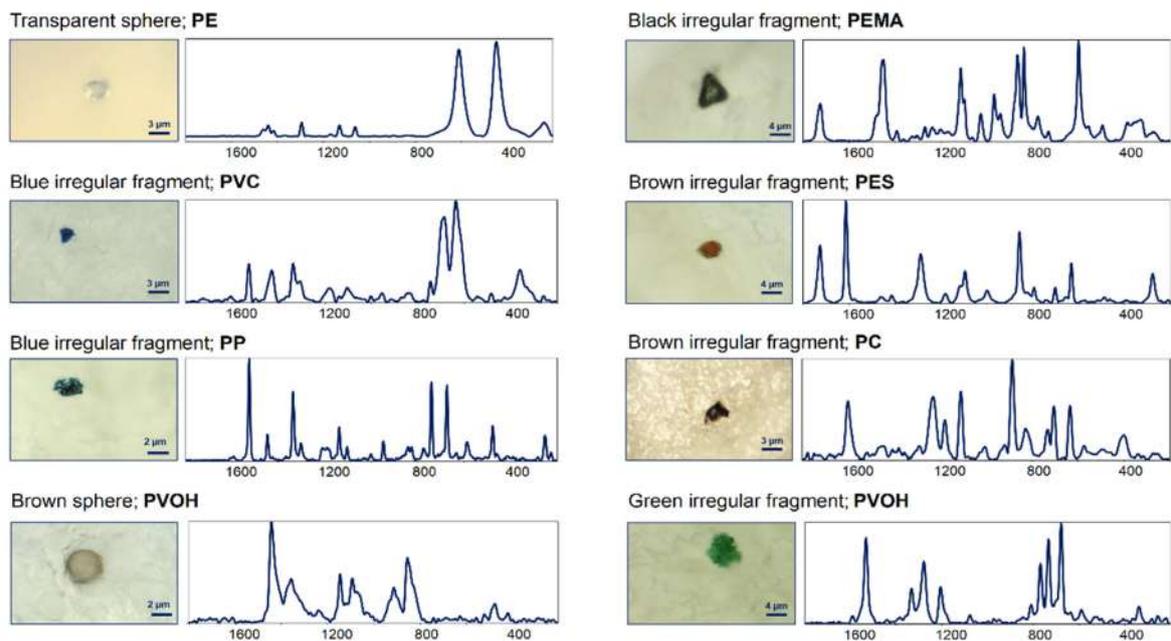
<sup>296</sup>Federal Office of Public Health. Impact of pollution on embryonic development - Nanoparticles: Risk for babies in the womb. FOPH. (2024) <https://www.bit.admin.ch/en/nsb?id=101285> (Accessed May 1, 2025).

<sup>297</sup>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>

<sup>298</sup>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>

<sup>299</sup>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>

<sup>300</sup>Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. Polymers 14, 2700 (2022). <https://doi.org/10.3390/polym14132700>



**110-сурет.** Талдаудан өткен емшек сүтінің үлгілерінде анықталған кейбір таңдалған микропластиктердің микрофотосуреттері мен комбинациялық шашырау спектрлері (толқын сандары, см<sup>-1</sup>). ПЭ: полиэтилен; ПВХ: поливинилхлорид; ПП: полипропилен; ПВС: поливинил спирті; ПЭВА: поли(этилен-ко-винилацетат); ПЭМА: поли(этилметакрилат); ПЭС: полиэстер және ПК: поликарбонат.

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

Қосымша деректер нәрестелердің нәжісіндегі микро- және нанопластик деңгейі ересектерге қарағанда 14 есе жоғары екенін көрсетеді<sup>301</sup>.

Нанопластиктер және онымен байланысты химиялық заттар емшек сүтінің молекулалық құрылымдарын және функционалдылығын бұзады. Бұл қосылыстар адам емшек сүтінде және балалар қоспаларында болатын ақуыздарды өзгертіп, кейінгі дамуында түрлі проблемаларға әкелуі мүмкін<sup>302, 303</sup>.

Микро- және нанопластиктің жоғары концентрациялары дамушы ағзаға жинақтық токсикалық әсерін тигізеді. Нанопластик жасушаларға еніп, ДНҚ-ның құрылымдық зақымдануын тудыруы және метаболикалық процестерді бұзуы мүмкін. Бұл әсерлер генетикалық мутациялар мен ұзақ мерзімді патологиялардың қаупін арттырады, болашақ ұрпақтың денсаулығына қауіп төндіреді.

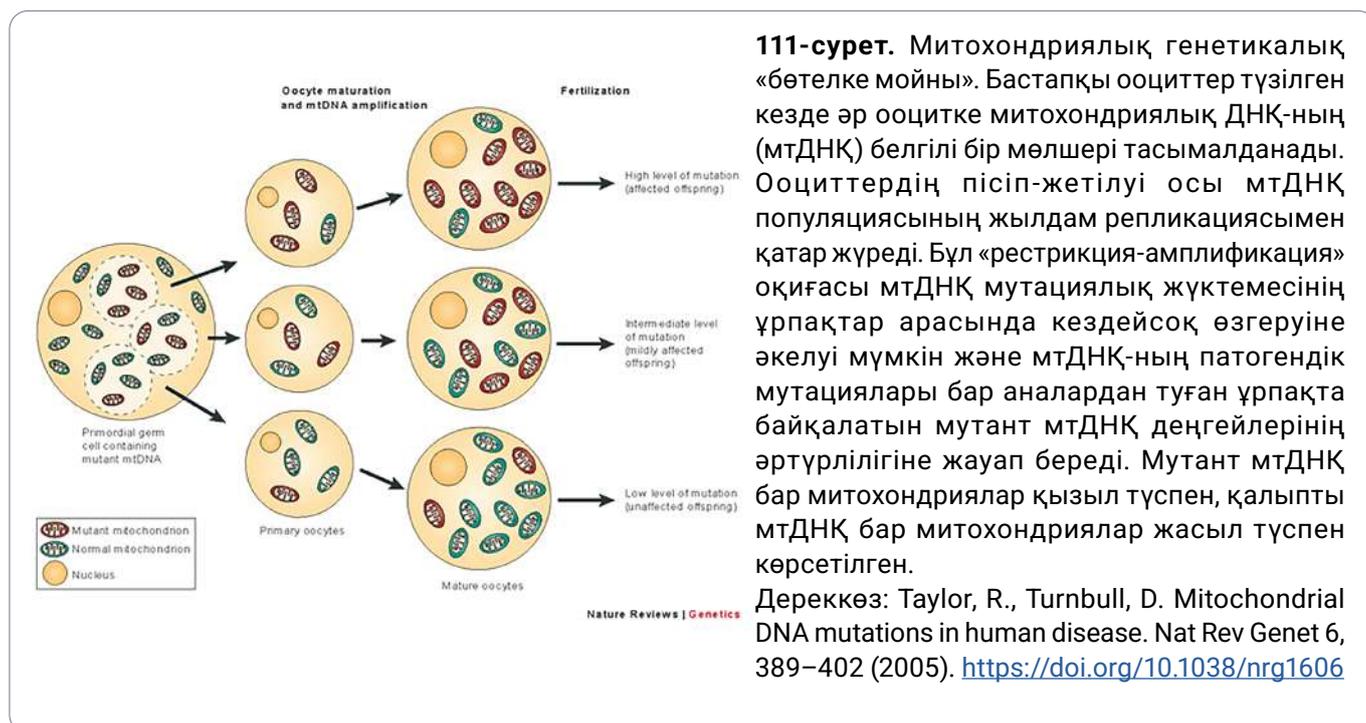
<sup>301</sup>Zhang, J., Wang, L., Trasande, L. & Kannan, K. Occurrence of Polyethylene Terephthalate and Polycarbonate Microplastics in Infant and Adult Feces. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 8, 989–994 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00559>

<sup>302</sup>Yadav, A., Vuković, L. & Narayan, M. An Atomic and Molecular Insight into How PFOA Reduces  $\alpha$ -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>

<sup>303</sup>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>

## Микро- және нанопластиктің әсерінің салдары мен туа біткен аномалиялармен байланысы

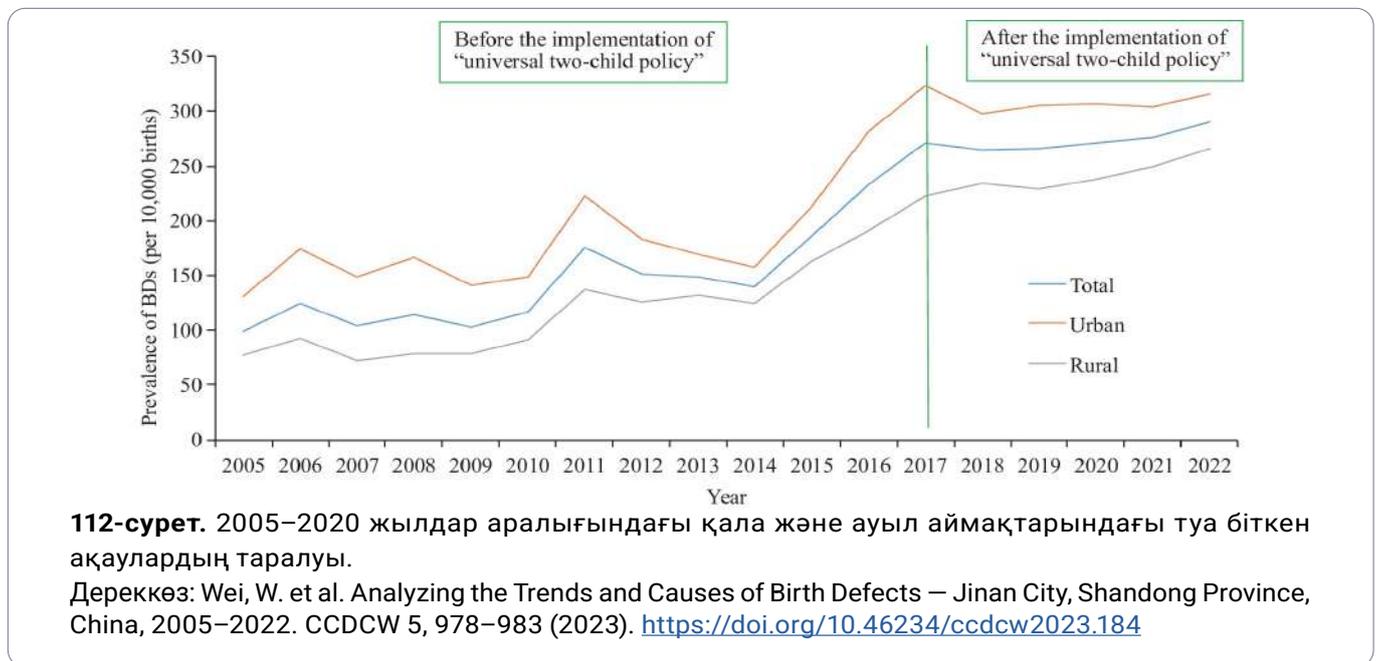
Ұлпа мен жасушаларға еркін ену қабілетінен бөлек, микро- және нанопластиктің тағы бір қауіпті қасиеті бар — ол болашақ ұрпаққа «мұра» ретінде берілуі мүмкін. Жасуша бөлінген кезде микро- және нанопластиктің фрагменттері бір жасушадан екіншісіне өтеді. Бұған қоса, олардың өте кішкентай өлшемдері мен статикалық электр зарядының болуы гемато-плацентарлық тосқауылды оңай еңсеруге мүмкіндік береді және олар ұрықтың тіндері мен жасушаларына еніп, дамушы ағзаға өзінің зиянды әсерін тигізеді. Ең алдымен, бұл баяндамада бірнеше рет атап өтілгендей, микро- және нанопластик митохондриялық дисфункцияға әкеледі. Жуырдағы Мендельдік рандомизация әдісі қолданылған зерттеу митохондриялық ақуыздардың экспрессиясы мен туа біткен аномалиялар қаупі арасындағы себептік байланыстың сенімді дәлелдерін ұсынды. Зерттеуде бақылаулық деректерге тән жүйелі қателіктерді азайту үшін генетикалық варианттар аспаптық айнымалылар ретінде пайдаланылды. Митохондриялық ақуыздардың 66 көрсеткішінің ішінде жүрек, құлақ, жүйке жүйесі, несеп-жыныс жүйесі және аяқ-қол аномалияларымен маңызды байланыстар анықталды. Бұл эмбрионалдық морфогенездегі митохондриялық белсенділіктің шешуші рөл атқаратыны туралы гипотезаны растайды<sup>304</sup>. Митохондриялық ДНҚ-ның (мтДНҚ) мутациялары — тұқым қуалайтын да, *de novo* түрлері де — MELAS, MERRF, NARP, Ли синдромы және т.б. сияқты клиникалық синдромдардың кең спектрін тудырады. Олар негізінен энергия тұтынуы жоғары ағзаларды зақымдайды: жүрек, ми, бұлшықет, көз. Митохондриялық шығу тегі бар ооцитке байланысты бұл мутациялар тек аналық жол арқылы беріледі (111-сурет). Мұндай бұзылыстар жиі ерте жаста байқалып, ауыр неврологиялық және метаболикалық ауытқулармен сипатталады.



<sup>304</sup>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>

Митохондриялық бұзылыстары бар балалар жиі дамудың кешеуілдеуімен, бұлшықет әлсіздігімен, когнитивтік ауытқулармен және қозғалыс координациясының бұзылуымен бетпе-бет келеді. Кернс–Сейр синдромы, Барт синдромы, Альперс ауруы және басқа да патологиялар ауыр салдарға — мүгедектікке немесе өлімге дейін әкелуі мүмкін.

Соңғы екі онжылдықта жаңа туған нәрестелердегі туа біткен даму ақауларының алаңдатарлық өсімі байқалып отыр. Тек Қытайдың өзінде мұндай кемістіктердің жиілігі 2005 жылы 10 000 тууға шаққанда 99,15 жағдайдан 2022 жылы 10 000 тууға 290,27 жағдайға дейін, яғни үшесеге жуық артты<sup>305</sup> (112-сурет). Осындай динамика басқа елдерде де байқалады. Бұл өсімнің себептері көп факторлы, алайда ғылыми деректердің көбейіп келе жатқан бөлігі жаңа әрі жылдам күшейіп жатқан қатерге — микропластикке және әсіресе нанопластикке назар аударады. Олар эмбрион тіндеріне еніп, ағзалар мен жүйелердің қалыптасу процестеріне араласа алады.



Нанопластиктің алып жүретін электростатикалық заряды эмбрион тіндерінде ерекше қауіпті, өйткені кез келген қателік — ықтимал аномалия. Мұндай бөлшектер жасуша беттеріне, соның ішінде жүрек, қантамырлар және бассүйек-бет құрылымдарының түзілуіне қатысатын жүйкелік қыр жасушаларына жоғары адгезия көрсетеді. Тауық эмбриондарына жүргізілген экспериментте нанопластик жүрек пен ірі тамырлардың ақауларын қоса, ауыр кемістіктер туындатты. Соңғы жылдары ең жылдам таралатын аномалиялардың бірі — гастрозиозис, алдыңғы құрсақ қабырғасының даму кемістігі, онда ұрықтың ағзалары тері мен бұлшықеттегі ақау арқылы сыртқа шығып тұрады (113,114,115-суреттер). Халықаралық деректерге сәйкес, оның таралуы соңғы отыз жылда 161%-ға өскен, ал 20 жасқа дейінгі аналар арасында бірнеше есе артқан<sup>306</sup>. Болжам бойынша, нанопластик жүктіліктің ерте кезеңінде (4–8 апта) құрсақ қабырғасының дамуына араласып, қабынуды және дененің алдыңғы бөлігінің жабылуындағы ақауды тудырады.

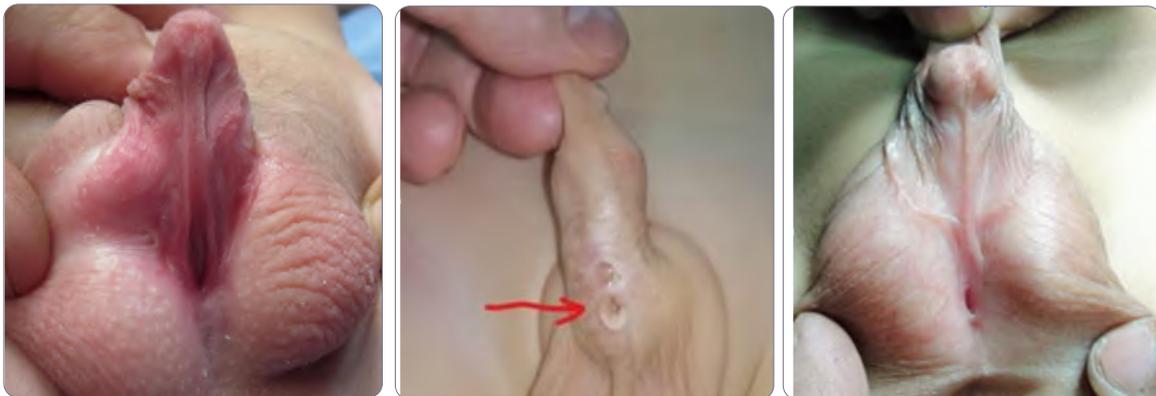
<sup>305</sup>Wei, W. et al. Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects — Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022. CCDCW 5, 978–983 (2023). <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184>

<sup>306</sup>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>



### 113-115-суреттер. Гастрошизис

Тағы бір кемістік — гипоспадия, бұл ұл балаларда зәр шығару өзегінің қалыпты емес жерде ашылуы<sup>307</sup>, — бұл да тұрақты өсу тенденциясын көрсетеді (116, 117, 118-суреттер). Мысалы, АҚШ-та 1997–2018 жылдар аралығында тірі туған ұл балалар арасындағы жағдайлар саны 1000 балаға шаққанда шамамен 1,06-ға артқан (1000 балаға шаққанда 6,1-ден 7,16-ға дейін), ал пайыздық өсім шамамен 17%-ды құрады<sup>308</sup>. Жануарлар модельдерінде жүргізілген зерттеулер көрсеткендей, микропластикте жиі кездесетін фталаттардың әсері ұл жынысты ұрықтарда тестостерон синтезін бұзады.



### 116-118-суреттер. Гипоспадия

Нанопластиктің зарядталған бетіне бекітілген бұл заттар қан ағысы мен плацентаның ішіне оңай өтеді, жыныстық дифференциацияның маңызды кезеңдерінде гормоналды ауытқуларды күшейтеді. Осыған байланысты Даун синдромының, трисомияның, атриовентрикулярлық жүрек ақауларының және басқа да ауыр бұзылыстардың жиілігі 1999–2001 жылдары тірі туған әр 10 000 баладан 12,78-ден 2016–2020 жылдары 15,55-ке дейін өскені тіркелді<sup>309</sup>.

Сонымен қатар, балаларда психоневрологиялық мәселелер, оның ішінде алаңдаушылық бұзылыстары мен когнитивтік жетіспеушіліктердің өсуі байқалады. Микропластикпен тікелей себеп-салдар байланысы әлі зерттелуде, алайда белгілі механизмдер — қабыну, эпигенетикалық модуляция, митохондриялық дисфункциялар — оны факторлардың бірі деп қарастыруға негіз береді<sup>307, 310</sup>.

<sup>307</sup>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.jpuro.2018.08.024>

<sup>308</sup>Lavoie, 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.jpuro.2025.01.002>

<sup>309</sup>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>

<sup>310</sup>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>

## Қорытындылар мен перспективалар.

### МНП-тің адам денсаулығына әсерін азайту мүмкін бе?

Жиынтық деректерді талдау микро- және нанопластиктің адам денсаулығы үшін маңызды әрі жеткілікті бағаланбаған қауіп факторы екенін көрсетеді. Қазіргі ғылыми деректер микро- және нанопластиктің адам ағзасына жаһандық уыттық қысымның ажырамас бөлігі екенін сенімді түрде дәлелдейді. Биологиялық тосқауылдарды еңсеріп, миды, жүректі, өкпені және плацентаны қоса алғанда әртүрлі ұлпаларда жинала алу қабілетіне байланысты микро- және нанопластик молекулалық, жасушалық және жүйелік деңгейде уытты әсер көрсетеді. Химиялық қоспалар мен қоршаған ортадан сіңген ластаушылармен бірге пластик созылмалы қабынуды, тотығу стрессін, митохондриялық дисфункцияларды және ДНҚ мутацияларын тудыруға қабілетті факторға айналады – бұл нейродегенеративтік, онкологиялық, жүрек-қантамырлық, эндокриндік және аутоиммундық бұзылыстарды қамтитын аурулардың кең спектрінің негізінде жатқан процестер. Ең алаңдататыны – микро- және нанопластик бөлшектерінің ағзадан іс жүзінде шығарылмай, жас ұлғайған сайын жиналып, олардың әсерінің жинақтық эффектіні күшейтуі.

Қазіргі деректер микро- және нанопластикпен (МНП) байланыстан толықтай аулақ болу мүмкін еместігін растайды: ол ауада, суда, тағамда және біз тұтынатын жануарлар мен өсімдіктердің жасушаларында да бар. Осылайша, пластик бөлшектеріне әсер кеңінен және үздіксіз – жатырішілік дамудан бастап өмірдің соңғы кезеңдеріне дейін болады. Әсіресе ингаляциялық жол арқылы түсу қауіпті, өйткені нанобөлшектер гематоэнцефаликалық тосқауылдан өтіп, тікелей мидың ұлпаларына енеді, орталық нерв жүйесін ең осал мақсаттардың біріне айналдырады.

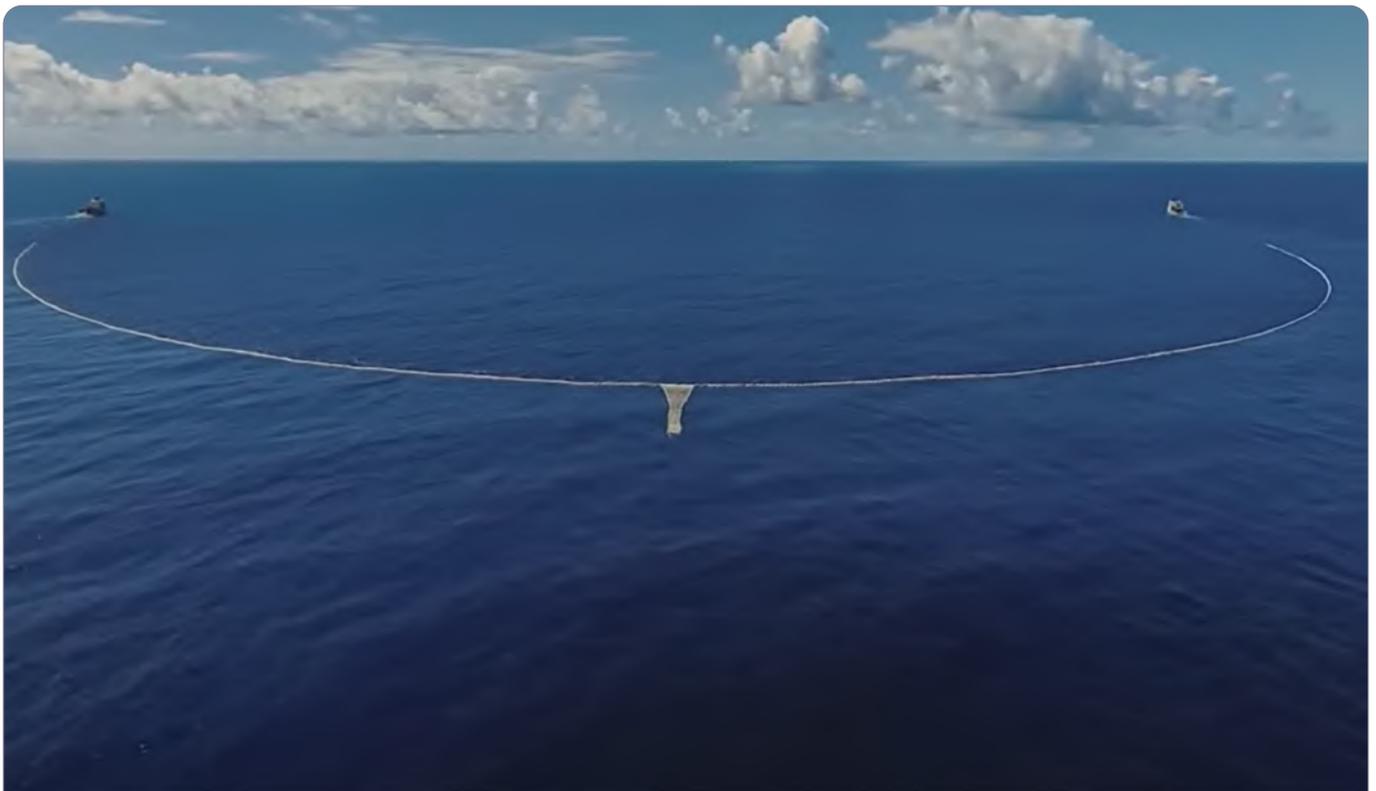
Қосымша биологиялық қауіп МНП бөлшектерінің электростатикалық белсенділігімен түсіндіріледі, ол олардың биологиялық құрылымдармен өзара әрекеттесуін күшейтіп, гомеостаздың бұзылуына ықпал етеді. Сондай-ақ олардың патогендер мен антибиотикке төзімді микроорганизмдерді тасымалдаудағы ықтимал рөлі атап өтіледі, бұл микро- және нанопластикпен ластану мәселесін экология, токсикология, иммунология, неврология және репродуктивті медицина салаларын қамтитын пәнаралық сипатқа ие етеді. Осыған байланысты МНП қатеріне қарсы стратегия аясында «АЛЛАТРА» ұсынған стратегиялық бағыттардың бірі – нанопластиктің электростатикалық зарядын бейтараптау немесе экрандау әдістерін әзірлеу болып табылады. Мұндай бөлшектердің электростатикалық белсенділігін азайту олардың зияндылығын едәуір төмендетіп, ағзада жиналудың қарқынын бәсеңдетуі мүмкін. Есептеу бойынша, зарядты экрандау немесе бейтараптау әдістері МНП-ке байланысты потенциалды қауіпті кемінде 50%-ға азайтуға қабілетті. Бұл МНП-ты ағзадан шығару, диагностикалау және алдын алу бойынша күрделі стратегияларды әзірлеуге қажетті уақытты ұтып алуға мүмкіндік береді. Осы контексте биофизика, нанотехнологиялар және молекулалық токсикология салаларындағы одан әрі зерттеулер ерекше мәнге ие болады.

Бұл тақырып бойынша ғылыми жарияланымдардың саны артқанына қарамастан, МНП-тің адам денсаулығына әсері әлі де жеткілікті зерттелмеген және денсаулық пен қоршаған ортаны қорғау стратегияларын әзірлеуде әлсіз ескерілуде. Пластикпен ластанудың көлемін, бөлшектердің биологиялық белсенділігін және олардың ықтимал кері қайтарылмайтын салдарын ескере отырып, бұл бағыт ғылыми қауымдастық пен денсаулық сақтау органдарының ерекше назарын, деректерді жүйелеуді, қауіптерді бағалау стандарттарын әзірлеуді, сондай-ақ мемлекетаралық және халықаралық ғылыми ынтымақтастықты кеңейтуді талап етеді.

## ПЛАСТИКАЛЫҚ ЛАСТАНУДЫ АЗАЙТУДЫҢ ЗАМАНАУИ ТӘСІЛДЕРІН ТАЛДАУ

### Су экожүйелерінен үлкен пластикті жою технологиялары

Мұхиттың ластануын азайтуға бағытталған бастамалар, ең алдымен, су бетінен көрінетін, үлкен қоқыстарды жоюға бағытталған. Бүгінгі күні пластмассалар мен басқа да қалқымалы қалдықтарды жинауға бағытталған ең ауқымды жобалардың бірі — The Ocean Cleanup бастамасы. Олардың қалқымалы жүйелері жер бетіндегі қоқыстарды ұстайды (119-сурет), олар кейін қайта өңдеу немесе кәдеге жарату үшін сұрыпталады және оралады.



**119-сурет.** Суретте Ocean Cleanup технологиясының жұмыс істеу процесі көрсетілген. Берік материалдан жасалған ұзын U-тәрізді қалқымалы бөгет мұхит бетінде қалқып жүрген пластик қоқысты жинайды

Дереккөз: The Ocean Cleanup. Cleaning up plastic pollution from the oceans.  
<https://theoceancleanup.com> (Қол жеткізу күні: 01.05.2025).

Бұл әдіс перспективалы болып көрінгенімен, назар аударуды қажет ететін кейбір аспектілері бар:

**1. Қоқыс жинау үдерісі таңдамалы емес,** сондықтан пластикпен бірге тұзаққа микроскопиялық балдырлар, балық шабақтарының дернәсілдері және медузалар сияқты тірі ағзалар да түседі. Қазіргі уақытта қосалқы аулаудың көлеміне қатысты сандық бағалар жоқ, алайда осы ағзаларды ауқымды мөлшерде алып тастау теңіз экожүйелеріне теріс әсер етуі мүмкін, табиғи қоректік тізбектердің бұзылуына әкеледі. Теңіз тіршілігін қорғау шаралары қолданылып жатқанымен, мәселе әлі де шешімін таппаған.

**2. Белсенділер мұхитты тазартуға шын жүректен ұмтылады, бірақ атқарылған күш-жігер айтарлықтай нәтижеге жету үшін жеткіліксіз.**

2024 жылдың қараша айындағы жағдай бойынша «Мұхитты тазалау» (The Ocean Cleanup) бастамасы әлемдік мұхиттардан шамамен 20 000 тонна пластик қалдықтарын алып тастады. Бұл, әрине, айтарлықтай нәтиже. Дегенмен, жаһандық проблема контекстінде ол мұхиттағы пластикалық қалдықтардың жалпы көлемінің тек 0,01% құрайды, бұл шамамен 200 миллион тоннаға бағаланады. Бұл жағдайда жыл сайын шамамен 11 миллион тоннаны құрайтын жаңа қалдықтардың келуін де ескеру қажет (120-сурет). Бұл деректер мәселенің ауқымына тазалау әрекеттерінің пропорционалды емес сипатын көрсетеді.



**120-сурет.** График мұхиттың пластикалық ластануына қатысты үш негізгі көрсеткішті салыстырады: жыл сайын мұхитқа төгілетін қалқымалы пластик қалдықтарының мөлшері және Мұхитты тазалау нәтижесінде қалпына келтірілген пластиктің мөлшері

Дереккөз: The Ocean Cleanup. <https://theoceancleanup.com> (Қол жеткізу күні: 01.05.2025).

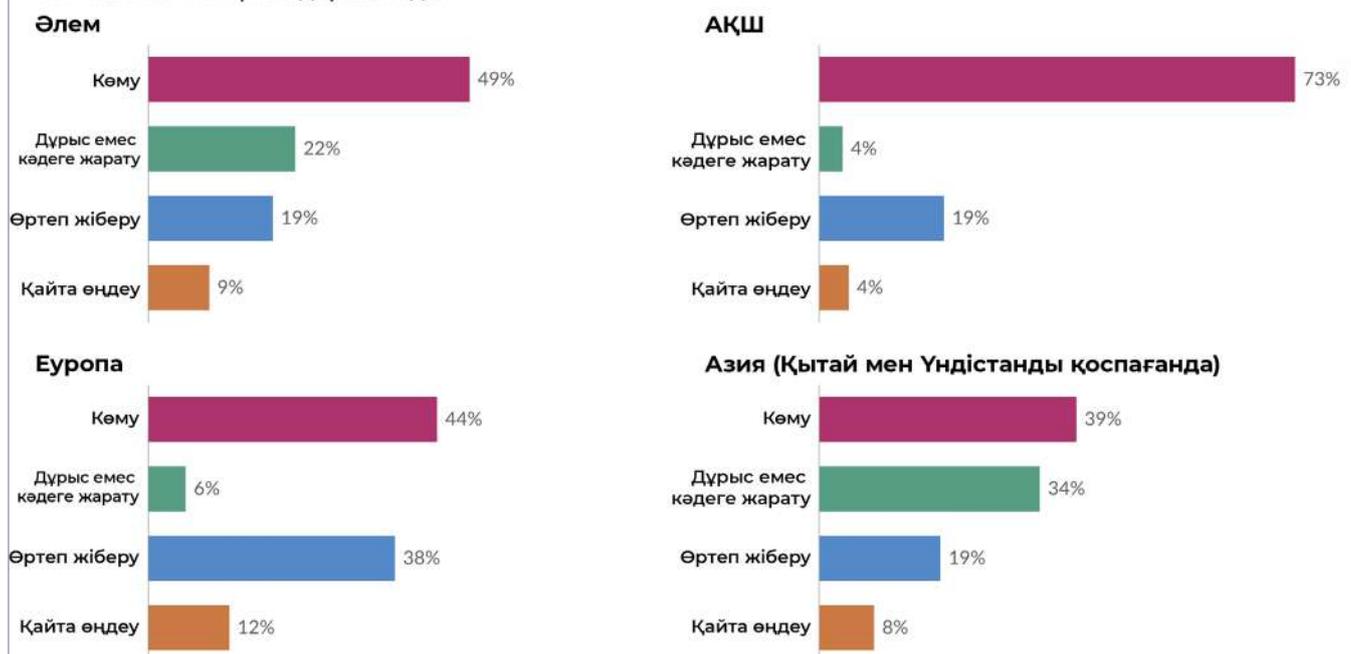
### 3. Негізгі мәселе қалпына келтірілген пластиктің тағдыры болып қала береді.

Пластикалық қалдықтарды қайта өңдеудің қазіргі әлемдік деңгейі 9%-дан аспайды (121-сурет). Осыған байланысты жиналған пластиктің едәуір бөлігін полигондарға жіберу мүмкіндігі бар, бұл ұзақ мерзімді перспективада ластану мәселесін шешпейді

#### 2019 жылғы мәліметтер бойынша пластикалық қалдықтардың үлесі: қайта өңделетіндер, көмілетіндер, өртенетіндер және дұрыс өңделмейтіндер.

Our World  
in Data

Дұрыс өңделмейтін пластикалық қалдықтарға ашық карьерлерде өртенетін, теңіздер мен ашық су айдындарына тасталатын немесе санитарлық талаптарға сай емес қоқыс алаңдары мен полигондарға тасталатын материалдар жатады.



Дереккөз: OECD (2023)

OurWorldinData.org/plastic-pollution | CC BY

Ескертпе: Аймақтар бойынша жиынтық мәндер «Our World in Data» жобасы арқылы есептелген, OECD<sup>1</sup> ұсынған деректер негізінде.

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

**121-сурет.** 2019 жылдағы пластикалық қалдықтардың үлесі: қайта өңделген, көміліп тасталған, өртелген және дұрыс емес түрде кәдеге жаратылған. Дұрыс емес түрде кәдеге жаратылған пластикалық қалдықтарға ашық алаңдарда жағылған, теңіздерге немесе ашық су айдындарына тасталған, сондай-ақ санитарлық талаптарға сай емес қоқыс орындары мен полигондарға шығарылған материалдар жатады.

Дереккөз: өңірлік жиынтық деректер Our World in Data компаниясы тарапынан есептелген және ЭЫДҰ (OECD) ұсынған деректерге негізделген. [OurWorldinData.org/plastic-pollution](https://ourworldindata.org/plastic-pollution) | CC BY

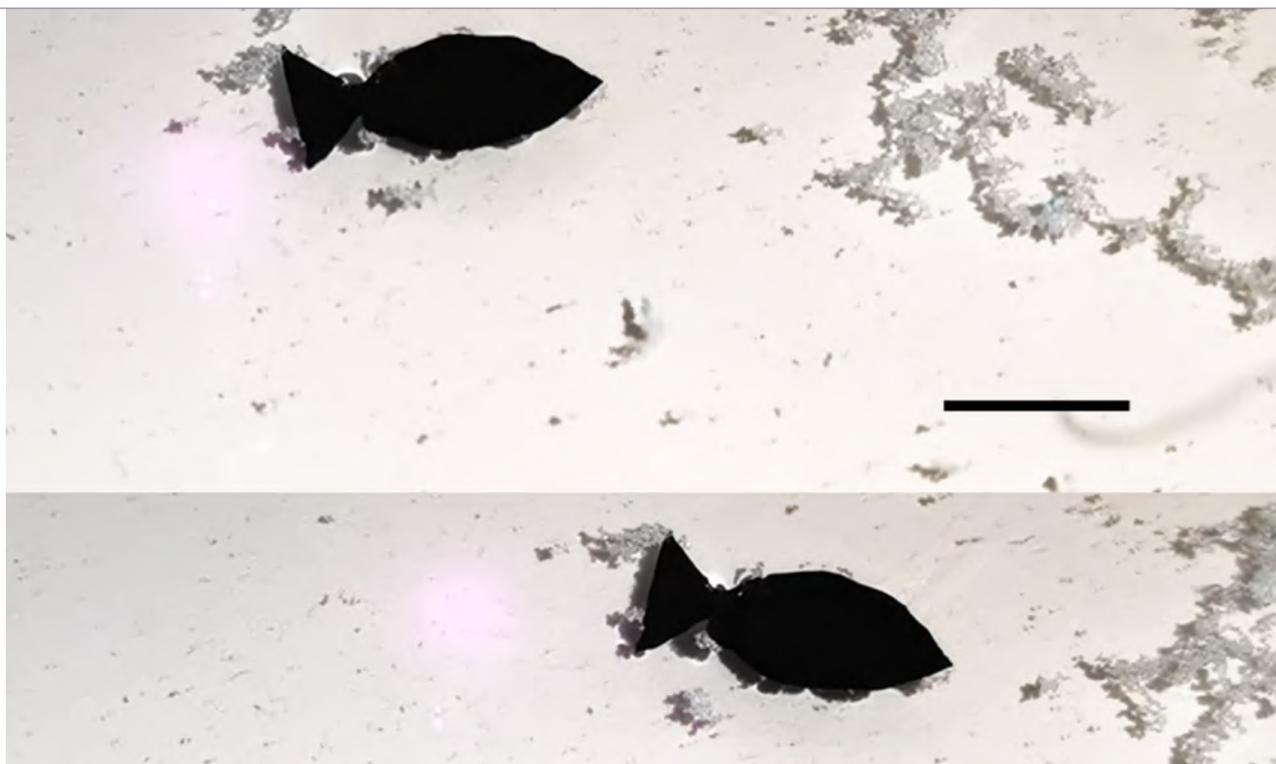
Бұдан бөлек, мұхитты тазарту операциялары елеулі қаржылық шығындарды талап етеді. Мысалы, Үлкен Тынық мұхиты қоқыс дағының кез келген мемлекеттің аумақтық суларынан алыс орналасуы тазарту жұмыстарының қаржыландырылуы мен жүзеге асырылуына жауапты тарапты анықтауды қиындатады. Осы ластану аймағын алғаш ашқан океанограф және зерттеуші Чарльз Мурдың бағалауынша, Үлкен Тынық мұхиты қоқыс дағын толық көлемде тазарту «осындай әрекетке баратын кез келген елді банкротқа ұшыратады». Айта кету керек, Әлемдік мұхитта осындай бес қоқыс жиналу аймағы анықталған (122-сурет), бұл мәселені одан әрі күрделендіреді.



**122-сурет.** Дүниежүзілік мұхиттағы бес негізгі қоқыс жинақтарының орналасуының схемалық көрінісі

Көрінетін үлкен қоқыс мұхиттың пластикалық ластануының жалпы проблемасының бір бөлігі ғана екенін атап өткен жөн. Альфред Вегенер институтының теңіз биологы Мелани Бергманның айтуынша, «Біз тек мұхит бетіндегі пластик туралы айтып отырмыз және бұл мұхиттағы қоқыстардың 1%-дан аз ғана бөлігі».

Пластикалық фрагменттердің микро және нанобөлшектерге айналуымен мұхитты тазарту міндеті әлдеқайда қиындай түседі. Судан микропластиктерді кетіруге арналған кейбір тәжірибелік технологиялар бұрыннан бар. Мысалы, Сычуань университетінің зерттеушілері су ортасы арқылы жүзе алатын және жақын маңдағы еркін жүзетін микропластик бөліктерін сіңіре алатын миниатюралық роботтық балықты (123-сурет) жасап шығарды<sup>311</sup>. Ұзындығы 13 мм болатын бұл бионикалық робот өз корпусындағы материалдар мен микропластик құрамындағы органикалық бояғыштар, антибиотиктер мен ауыр металдар сияқты компоненттер арасындағы берік химиялық байланыстар мен электростатикалық әрекеттесулердің арқасында микропластик бөлшектерін тиімді жинайды.



**123-сурет.** Суретте Сычуань университетінің зерттеушілері жасаған миниатюралық робот балық көрсетілген. Нағыз балыққа ұқсайтын ықшам құрылғы микропластиктердің еркін жүзетін бөліктерін белсенді түрде сіңіре отырып, су ортасында жүзеді.

<https://www.theguardian.com/environment/2022/jun/22/scientists-unveil-bionic-robo-fish-to-remove-microplastics-from-seas>

Алайда мұндай инновацияларға қарамастан, осындай технологияларды жаһандық деңгейде практикалық қолдану қазіргі уақытта шектеулі. Миниатюралық роботтар микропластикті өздеріне тікелей жақын аймақтан адсорбциялайды, сондықтан үдеріс жергілікті сипатта қалады, ал олардың көп мөлшерде болуының өзі Әлемдік мұхиттың көлемін қамтуға мүмкіндік бермейді. Бұдан бөлек, олар өздері де қоректік тізбектің бөлігіне айналуы мүмкін. Сондай-ақ роботтардың мұхиттың күрделі жағдайларында (ағыстар, қысым, тұздық) тұрақты жұмыс істей алу қабілетіне қатысты белгісіздіктер бар. Сондықтан қазіргі шешімдер әлі де жеткіліксіз тиімді және оларды ауқымдандыруда қиындықтар туындайды.

<sup>311</sup>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>

## Микро- және нанопластиктерді тазалаудың қазіргі әдістері

Синтетикалық полимерлердің, ең алдымен полиэтилентерефталаттың (ПЭТ) ферментативті ыдырауы үшін микроорганизмдерді, әсіресе бактерияларды пайдалану мүмкіндігі барған сайын қарастырылуда. Бұл технология пластикалық қалдықтарды қайта өңдеудің дәстүрлі әдісі – өртеу әдісіне әлеуетті экологиялық таза балама ретінде орналастырылған. Дегенмен, осы уақытқа дейін жинақталған эмпирикалық деректер оның тиімділігіне, қауіпсіздігіне және өнеркәсіптік ауқымда қолданылуына күмән тудырады.

2016 жылы Шосукэ Ода бастаған жапондық ғалымдар тобы екі фермент – ПЭТаза және МЭТаза шығару арқылы полиэтилентерефталатты ыдыратуға қабілетті *Ideonella sakaiensis* бактериясын ашты. Бұл микробиологиядағы маңызды оқиға болды<sup>312</sup>. Дегенмен, зертханалық зерттеулер ыдырау процессі өте баяу жүретінін көрсетті: 20 г пластикалық пленканы ыдырату үшін оңтайлы жағдайларда бактерияларға шамамен жеті апта қажет болды. Әлбетте, мұндай қайта өңдеу қарқынын пластикті ластау мәселесін шешу үшін қанағаттанарлық деп санауға болмайды. Жыл сайын миллиондаған тонна пластмасса қоршаған ортаға енетін жаһандық ластану ауқымында бұл көрсеткіш мұхитты шай қасықпен шығару әрекетімен салыстыруға болады.

Ғылыми зерттеулер пластикті ыдырату үшін бактерия қолданатын ПЭТаза ферментін түрлендіруге бағытталды. Алайда зерттеушілердің өздері мойындағандай, *Ideonella sakaiensis* ферменті эволюцияның бастапқы кезеңінде тұр. Оның тиімділігі төмен, тұрақтылығы шектеулі, ал реакцияны жеделдету табиғи ортаға тән емес температураны қажет етеді. Тіпті гендік инженерия да қай мутациялардың нақты жақсару әкелетінін алдын ала болжай алмайды. АҚШ-тың Ұлттық жаңартылатын энергия зертханасының қызметкері Элизабет Белл айтқандай, бұл «екі қадам алға, бір қадам артқа» жүретін процесс.

Бұдан бөлек, ферменттік ыдырату әмбебап емес. Тек кейбір пластик түрлері (мысалы, ПЭТ) теориялық тұрғыда мұндай ыдырауға бейім. Полиэтилен, полипропилен және кеңінен қолданылатын басқа материалдар микроағзалар үшін іс жүзінде ыдырамайтын болып қала береді. Ал *Nature* журналының ғалымдары көпшілік пластиктің биохимиялық жолмен тиімді ыдырауы үшін тым энергия сыйымды екенін атап өтеді.

Мұндай жоғары тиімді микроб пайда болғанның өзінде, әлдеқайда алаңдатарлық сұрақ туындайды: оны қоршаған ортаға қауіпсіз түрде жіберуге бола ма? **Кез келген генетикалық түрлендірілген бактериялар экологиялық апаттың ықтимал көзі болып табылады. Қазіргі уақытта барлық дерлік елдер мұндай ағзаларды табиғатқа шығаруды қатаң түрде реттейді немесе толығымен тыйым салады.**

<sup>312</sup>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>

Себептері түсінікті: бактериялардың «миссиясын орындағаннан» кейін қалай әрекет ететіні белгісіз. Ол басқа маңызды органикалық қосылыстарды жоя бастайды ма? Ол басқа микробтарды ығыстыра ма? Бұл одан да күтпеген салдары бар мутацияларға әкеледі ме?

Осылайша, бір экологиялық проблеманы басқасымен оңай ауыстыруға болады - әлдеқайда күтпеген және жойқын.

Пластмассаларды бактериялық қайта өңдеу саласындағы іргелі зерттеулердің сөзсіз маңыздылығына қарамастан, қазіргі кезеңде бұл технологияны пластикалық ластану проблемасының тиімді, ауқымды және қауіпсіз шешімі ретінде қарастыруға болмайды.

## Суды қайнатудың микропластикті жоюға әсерін зерттеу: тиімділік пен қауіптер

Гуанчжоу медициналық университеті мен Цзинань университетінің (Қытай) биомедициналық инженерия және микропластика ғалымдары зерттеу жүргізді<sup>313</sup>. Эксперимент құрамында кальций тұздары (кермек су) жоғары қайнаған судың микропластиктерді кетіруге әсерін зерттеуге бағытталған.

Зерттеу үшін Гуанчжоу қаласынан әртүрлі қаттылықтағы су құбыры суының үлгілері алынды. Су құрамына өлшемі 0,1-ден 150 микрометрге дейінгі пластик бөлшектердің үш түрі – полистирол, полиэтилен және полипропилен – қосылды. Үлгілер 5 минут бойы қайнатылып, содан кейін салқындатылды және микропластиктің қалдық мөлшері өлшенді.

Қайнау кезінде кальций тұздарымен қаныққан кермек суда қақ деп аталатын ерімейтін кальций карбонаты ( $\text{CaCO}_3$ ) түзіледі. Зерттеушілер микропластик бөлшектері кальций карбонатының кристалдарымен байланысып, тұнбаға түсуі мүмкін деп болжады, бұл қайнатылған суда микропластик концентрациясының төмендеуін түсіндіреді.

Тазалау тиімділігі жоғары қаттылығы бар үлгілерде (литріне 300 мг  $\text{CaCO}_3$ ) ең жоғары болды, мұнда қайнау микропластиктердің 90%-на дейін жойылды. Жұмсақ суы бар үлгілерде (литріне 60 мг  $\text{CaCO}_3$  кем) әсер айтарлықтай төмен болды: пластикалық бөлшектердің 25% ғана жойылды.

Дегенмен, қайнаған кермек судың кейбір оң әсеріне қарамастан, маңызды сұрақ туындайды: микро- және нанопластиканың ауаға ену мүмкіндігі. Суды қайнатқанда су буы бөлінеді, оның көмегімен микропластикалық бөлшектер ауаға енеді. Мұндай бөлшектерді ингаляциялау оларды тамақпен немесе сумен тұтынудан гөрі қауіптірек.

<sup>313</sup>Yu, 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>

Зерттеулер көрсеткендей, нанопластик тыныс алу кезінде 2 сағаттың ішінде бас миына ене алады, ал ас қорыту жүйесіне түскен микропластик ағзадан ішінара шығарылады. Пластиктің миға түсуі ұзақ мерзімді қауіптермен байланысты, себебі мұндай бөлшектерді ми тіндерінен шығару мүмкін емес.

Осылайша, суды қайнату әдісі ауаның микропластикпен ластану қаупін арттыруы мүмкін, бұл адам денсаулығы үшін анағұрлым қауіпті болуы ықтимал. Бұл суды тазартудың неғұрлым қауіпсіз әрі тиімді әдістерін әзірлеу қажеттігін көрсетеді.

## Пиролиз пластикті қайта өңдеу әдісі ретінде: тиімділігі мен қауіптері

Пиролиз - оттегі шектеулі ортада жоғары температурада термиялық ыдырауына негізделген пластикті қайта өңдеу технологиясы. Процесс әдетте 300-ден 800 ° C-қа дейінгі температурада жүзеге асырылады және газ тәрізді және сұйық көмірсутек қосылыстарын, сондай-ақ көміртегі түріндегі қатты қалдықты алуға мүмкіндік береді.

Жоғары температурада ыдырау кезінде пластиктің полимерлі тізбектері ыдырап, отын ретінде пайдалануға болатын көмірсутектердің қоспасын құрайды. Дегенмен, бұл әдіс дәстүрлі пластикті өртеумен қатар, нанопластиктердің шығарылуына байланысты маңызды экологиялық тәуекелдермен бірге жүреді.

Жоғары температураның әсерінен пластик ұсақ бөлшектерге, соның ішінде нанопластикке (өлшемі 100 нанометрден аз) дейін жойылады. Бұл бөлшектер соншалықты кішкентай, қазіргі заманғы сүзгілеу жүйелері оларды толығымен сақтай алмайды, нәтижесінде олар атмосфераға түседі.

Пластмассаларды жағу кезінде диоксиндер мен фурандар — жоғары уытты, канцерогендік әсері бар қосылыстар — бөлініп шығады<sup>314</sup>.

Осылайша, отын алу үшін пластиктерді пиролизді пайдалану және жағу қоршаған ортаға ғана емес, сонымен қатар адам денсаулығына қауіп төндіретін атмосфераға шығарындылардың айтарлықтай қаупімен бірге жүреді. Мұндай пластикті кәдеге жарату әдісін қоршаған ортаның ластану мәселесін шешудің қауіпсіз әрі тұрақты жолы деп санауға болмайды. Мұндай отынның бағасы — адам өмірі мен денсаулығына төнетін қауіп.

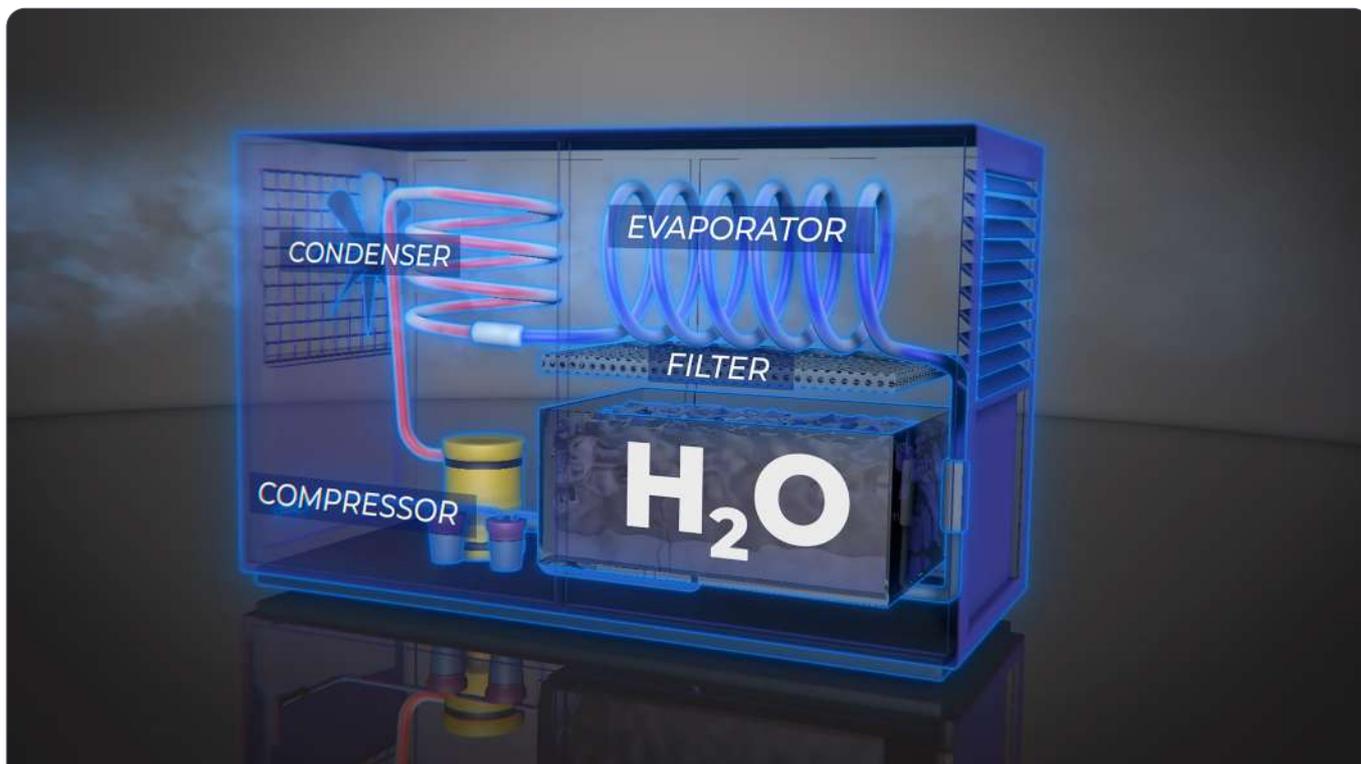
<sup>314</sup>Baca, D. et al. Dioxins and plastic waste: A scientometric analysis and systematic literature review of the detection methods. *Environmental Advances* 13, 100439 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100439>

## «АЛЛАТРА» ҒЫЛЫМИ ҚОҒАМДАСТЫҒЫНЫҢ МИКРО- ЖӘНЕ НАНОПЛАСТИК ЭПИДЕМИЯСЫМЕН КҮРЕСУДЕГІ ТӘСІЛДЕРІ

### Мұхитты МНП-тен тазартуға арналған атмосфералық су генераторларының (АСГ) технологиялары

Экологиялық тепе-теңдікті қалпына келтіру үшін атмосфералық су генераторлары (АСГ) сияқты инновациялық технологияларды жаппай енгізу қажет. Бүгінгі күні мұндай қондырғылар тұрмыстық үлгілерден өнеркәсіптік үлгілерге дейін кең ауқымда ұсынылған. Бұл құрылғылар ауадан ауыз суды өндіруге, ластаушы заттарды, соның ішінде микропластиктерді тиімді жоюға қабілетті (124-сурет). Дәмі мен сапасын жақсарту үшін суды минералдандыруға да болады.

Генераторлардың жұмыс істеу принципі ауа құрамындағы ылғалды конденсациялау негізінде жүзеге асады.



**124-сурет.** Суретте атмосфералық су генераторының схемалық кескіні, оның құрамдас бөліктері мен жұмыс принципі көрсетілген

АСГ жұмыс істейтін екі негізгі технология бар:

**1. Конденсацияға негізделген технология.** Бұл әдіс қоршаған ауаны құрылғының ішіне тартып, оны салқын бетке немесе салқындатқыш спиральға әсер еткізеді, соның нәтижесінде су буы сұйық күйге конденсацияланады. Бұл процесс мұздатқыштан шығарылған суық заттың бетінде ылғалдың жиналуына ұқсас. Конденсациялық АСГ жылы әрі ылғалды ортада ең тиімді жұмыс істейді.

**2. Адсорбцияға негізделген технология.** Ауадан ылғалды ұстау үшін силикагель, цеолиттер немесе металлоорганикалық каркастар сияқты ылғал сіңіргіш материалдар қолданылады. Сіңірілген су кейін материалды қыздыру арқылы босатылады.

Қазіргі таңда мұндай қондырғылар ауыз сумен қамтамасыз ету мақсатында жергілікті деңгейде, соның ішінде климаттық апаттармен байланысты жағдайларда да қолданылып келеді.

АСГ-ын өнеркәсіп пен халықтың қажеттіліктерін өтеу үшін кең ауқымда қолдану бірнеше жыл ішінде мұхиттардың ластану деңгейін едәуір төмендетуге мүмкіндік беруі мүмкін.

Қазіргі уақытта тұрмыстық қажеттіліктерге, соның ішінде тамақ дайындауға пайдаланылатын судың негізгі көзі көбінесе құрамында микро- және нанопластик деңгейі жоғары су айдындары болып табылады. Мұндай су адам ағзасында пластиктің жиналуына ықпал етеді. Ластанған көздерден емес, ауадан су өндіруге көшу тұтынылатын судың сапасын едәуір жақсарты алады.

## Экожүйелерді табиғи сүзу және атмосфералық су генераторлары арқылы қалпына келтіру

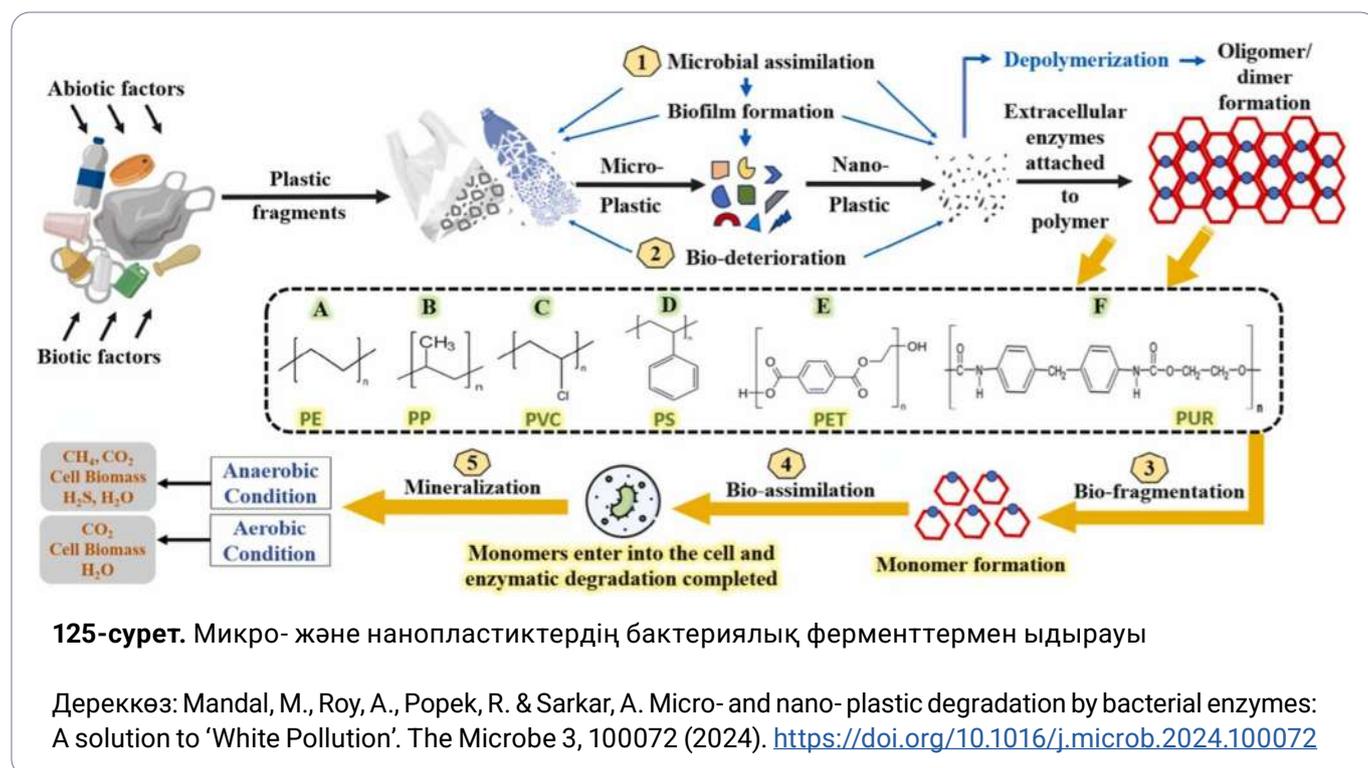
Пайдаланылған судан микропластикті тиімді түрде жою үшін инновациялық технологияларды, заманауи сүзу және ассимиляциялық жүйелерді қолдану қажет. Сонымен қатар тазарту құрылыстарын қайта жабдықтап, тазартылған суды су айдындарына төкпей, топыраққа бағыттау маңызды, себебі топырақта пластикті табиғи жолмен ыдырата алатын микроағзалар тіршілік етеді<sup>315</sup>.

Бұл организмдер зертханалық жағдайларда генетикалық түрлендірілген немесе жасанды түрде жасалған организмдерден айтарлықтай ерекшеленеді. Олардың экожүйелерде болуы табиғи болып қалады және олар белгілі бір ортада инвазивті түрлердің белгілерін көрсетпейді.

<sup>315</sup>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>

Зерттеулер<sup>316</sup> табиғи ортада тіршілік ететін бірқатар топырақ микробтарының<sup>317</sup> полиэтилен<sup>319</sup> және полиэтилентерефталат<sup>320</sup> сияқты полимерлерді<sup>318</sup> ыдыратуда жоғары тиімділік көрсететінін дәлелдейді. Мысалы, саңырауқұлақтық деградацияның ең жоғары белсенділігі — 16 апта ішінде полиэтилен массасының орташа есеппен  $36,4 \pm 5,53$  %-ға төмендеуі — *Aspergillus oryzae* A5,1 штаммында байқалған.

Микробтардың полимерлерді биологиялық ыдырату қабілеті олардың пластиктің күрделі молекулалық құрылымдарын ыдыратуға мүмкіндік беретін ферменттерді өндіруімен түсіндіріледі<sup>317</sup>.



Эксперименттік бақылаулармен расталған бұл деректер табиғи микробтық қауымдастықтарды микро- және нанопластиктің қоршаған ортадағы ластану деңгейін төмендету мақсатында қолдану мүмкіндігін көрсетеді.

**«Бүгінгі таңда қолжетімді бірнеше қалпына келтіру әдістерінің ішінде микробтық қалпына келтіру микропластикті қоршаған ортадан ыдырату немесе тұрақты түрде жою үшін ең перспективалы әдіс ретінде көрсетілуде»,** — деп айтылған шолушы зерттеуде<sup>318</sup>.

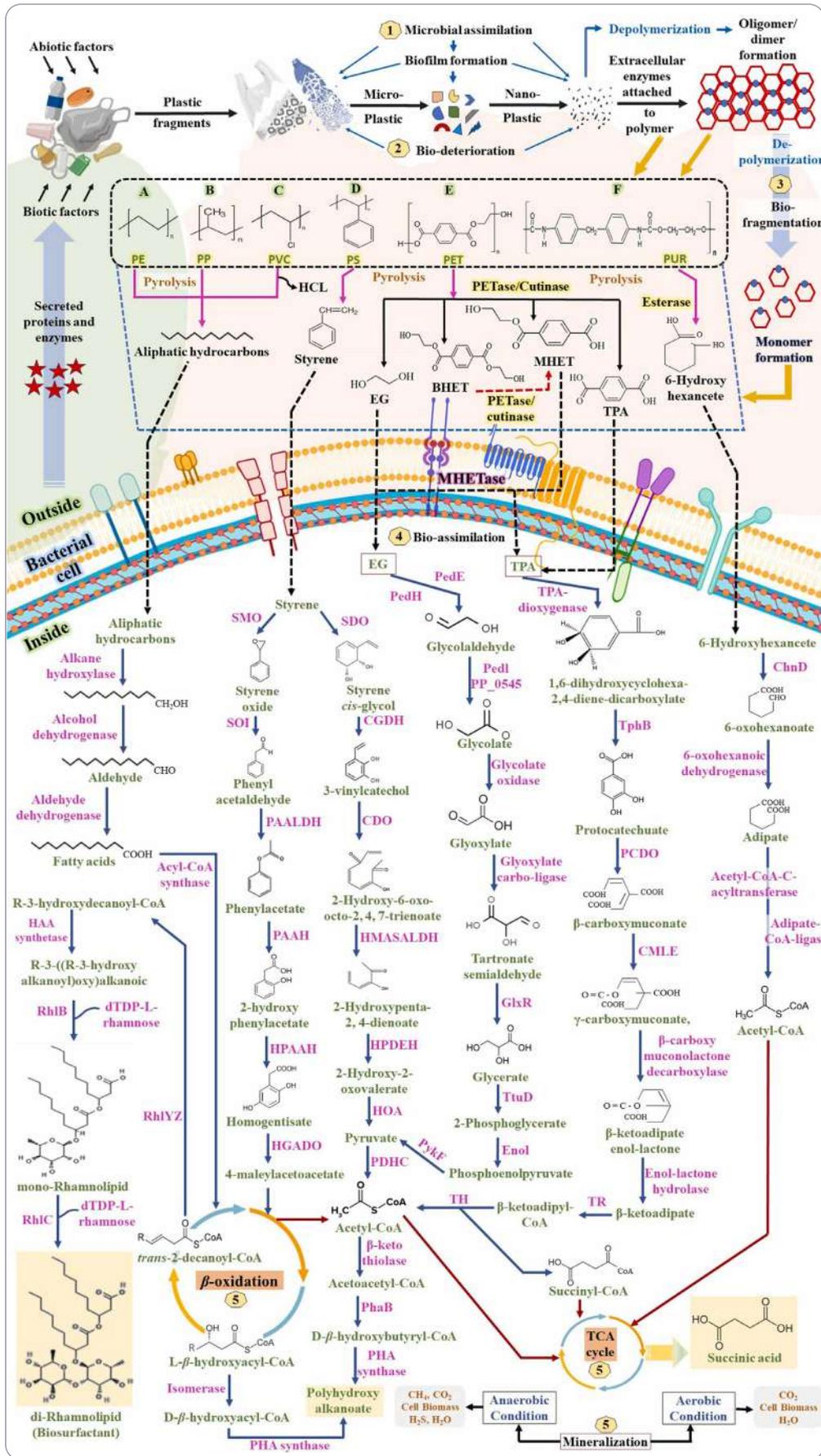
<sup>316</sup>Auta, H. S. et al. Enhanced microbial degradation of PET and PS microplastics under natural conditions in mangrove environment. *Journal of Environmental Management* 304, 114273 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114273>

<sup>317</sup>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>

<sup>318</sup>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>

<sup>319</sup>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>

<sup>320</sup>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>

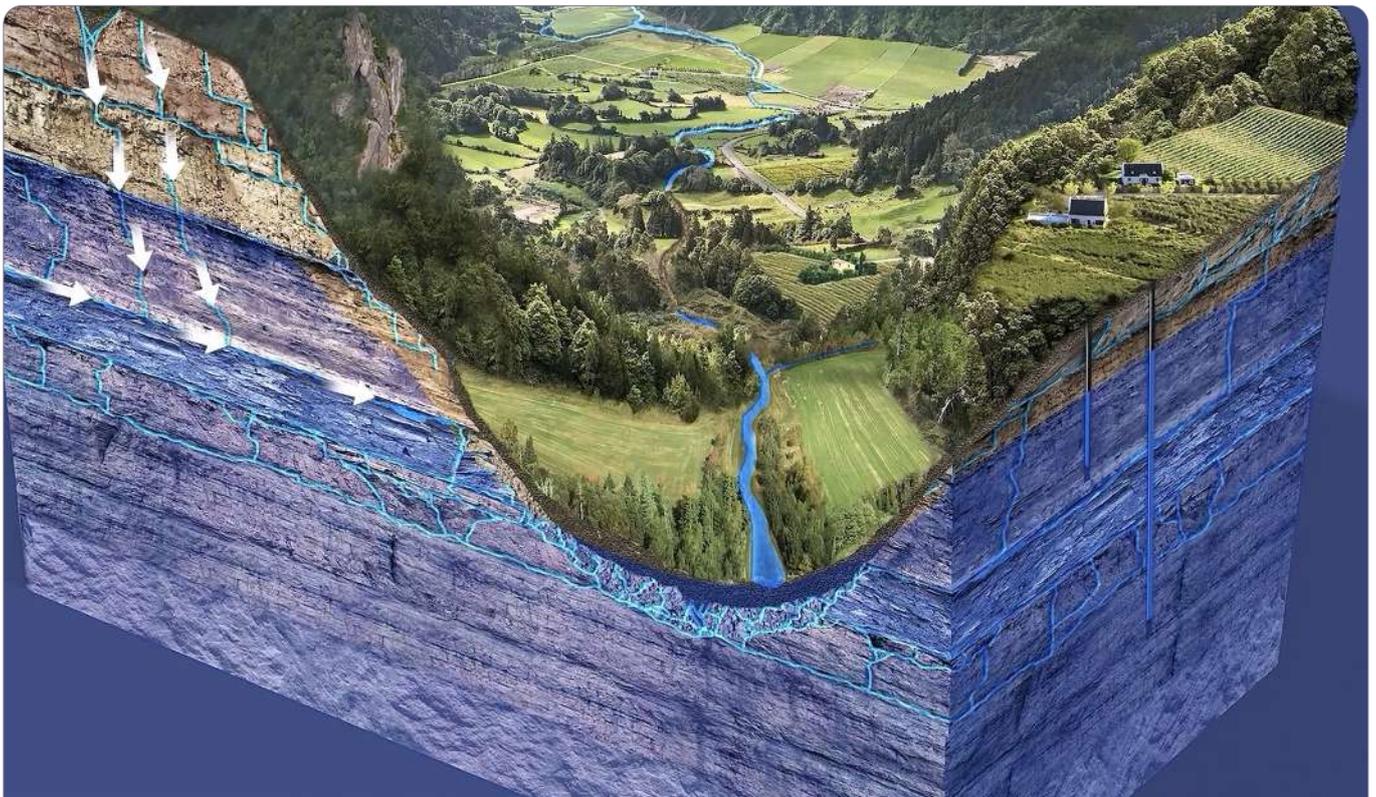


126-сурет. Пластик қалдықтары әртүрлі абиотикалық және биотикалық факторлардың әсерінен МНП-ке ыдырайды.

Дереккөз: 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>

Осылайша, ауадан су өндіру технологиясына көшу тұтынылатын судың сапасын едәуір жақсартады, ал оны микробтық қалпына келтіру технологиясымен үйлестіре қолдану қоршаған ортадағы микро- және нанопластик ластануын едәуір азайтуға ықпал етеді.

Топырақтың жоғарғы қабаттарында, су айдындары сияқты, пластик концентрациясы белгілі бір уақыт бойы жоғары болып қалады. Алайда су тереңірек сіңген сайын табиғи өзін-өзі тазалау процесі жүреді (127-сурет). Топырақта тіршілік ететін микроағзалар нанопластиктің кішкентай бөлшектерін ыдыратуға ықпал етеді.



**127-сурет.** Суретте суды топыраққа төгу арқылы геологиялық қабаттар арқылы биологиялық қосымша тазарту процесі көрсетілген. Жебелер ағынды судың топырақ пен жыныс қабаттары арқылы өту жолын көрсетеді, мұнда микроағзалар мен сүзгілеу материалдары ластағыштарды жояды. Топырақ қабаттары түрлі түстермен белгіленген: қоңыр – топырақ үшін, сұр – құм мен қиыршық тас үшін.

Топыраққа ағызылатын тазарту қондырғыларынан пайдаланылған және сүзілген судың көлемін ұлғайту сау топырақты қалыптастыруда, қоректік заттардың айналымын және экожүйенің тұрақтылығын қамтамасыз етуде іргелі рөл атқаратын микроорганизмдердің, соның ішінде бактериялардың, саңырауқұлақтардың және археялардың көбеюіне ықпал етеді. Содан кейін тазартылған су тереңірек қабаттарға сіңіп, мұхиттарға қайта оралады.

Шөлді аймақтарда атмосфералық су генераторларын орналастыру, сондай-ақ пайдаланылған суды топыраққа қайтару су дағдарысын еңсеру және шөлейттенумен күресу

үшін перспективалы шешім болып көрінеді, өйткені бұл өсімдіктер<sup>321</sup> және экожүйелерді қалпына келтіруге ықпал ететін процестерді белсендіреді. АСГ-ын пайдалану ауыз су тапшылығы мәселесін шеше отырып, жергілікті халықтың өмір сүру сапасын жақсартады.

Микробтық мелиорациямен ұштастыра отырып, АСГ-ын пайдалану суды тұрақты басқаруға және бұзылған жерлерді қалпына келтіруге маңызды қадам бола алады.

АСГ-на толық көшу атмосфералық суды халықтың барлық қажеттіліктеріне, соның ішінде тұрмыстық, өнеркәсіптік және ауылшаруашылық қажеттіліктері үшін пайдалануды қамтиды. Бұл технологияны жаһандық ауқымда енгізу мұхиттың салқындауына әкелетін қарқынды булануға әкеледі, сонымен қатар оның тазартылуын тездетеді. Сонымен қатар, АСГ көмегімен атмосферадағы артық ылғалдылықты азайту табиғи апаттардың жойқын әсерін азайтуға болатын төтенше жауын-шашын мен желдің мөлшерін азайтады (толығырақ «Ауадан алынған су. Адамзатты құтқару жолы» фильмінде).

## Атмосфералық су генераторларын пайдаланумен байланысты қиындықтар мен тәуекелдер

Дегенмен, АСГ-ын жаһандық қолданудың кемшілігі бар. Мәселе мынада, атмосфералық суды өндіру технологияларын пайдалану оның адамға тигізетін әсерін тікелей есепке алмайды. Бұл технологияны пайдалану шынымен де мұхит суларын тазартуға және жылу өткізгіштігін жақсартуға көмектессе де, АСГ-ын ауқымды пайдалану атмосферадағы микро-пластиктердің концентрациясының айтарлықтай өсуіне әкелуі мүмкін. АСГ-ның жұмыс істеу механизмі атмосферадан ылғалды конденсациялауды қамтиды, ол кейін мұхит суларынан булану арқылы толықтырылады. Аталған суларда микро- және нанопластиктің жоғары деңгейі болғандықтан, осы процесс барысында атмосфераға түсетін ылғал ең ұсақ пластик бөлшектерін тасымалдауы мүмкін. Нәтижесінде, осы технологиялар қолданылатын аймақтарда, соның ішінде ірі мегаполистерде, демалатын ауаның құрамындағы нанопластик деңгейі қазіргі уақытта жағалауда байқалатын көрсеткіштерге жетуі мүмкін. Бұл ауадағы нанопластик концентрациясының арту қаупін тудырады және адам денсаулығы үшін қауіп төндіреді. Нанопластиктің тыныс арқылы енуі оның ағзада, соның ішінде бас миында, жиналуына ықпал етеді.

Міне, ең маңызды жайт. АСГ-ын мұхит суларын тазартудың құралы ретінде пайдалану идеясы «АЛЛАТРА» ғалымдары тарапынан 20 жылдан астам бұрын ұсынылғанын түсіну қажет — сол кезде атмосферадағы микропластик концентрациясы өте төмен еді. Сол кезеңде осындай технологияларды енгізу шын мәнінде айтарлықтай экологиялық пайда әкелуі мүмкін еді және адам үшін аса қауіпті болмас еді. Алайда бүгінгі жағдай түбегейлі өзгерді. Қазіргі заманғы жағдайда АСГ-ын кеңінен қолдану, керісінше, ең алдымен ауадағы МНП

<sup>321</sup>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>

концентрациясының артуына әкеледі, себебі атмосферадағы МНП деңгейі бұрыннан жоғары, ал АСГ арқылы қосымша көлемді қосу адам денсаулығы үшін қауіпті болуы мүмкін.

Осылайша, бір кездері перспективалы және инновациялық болған технология өз актуалдылығын жоғалтты. Біз адамзат ретінде АСГ нақты құтқару бола алар еді деген өте маңызды кезеңді өткізіп алдық. Климат және қоршаған ортаның ластануы мәселелерінде уақыт факторы шешуші рөл атқарады. Екі онжылдық бұрын миллиондаған адамдардың денсаулығын сақтап, планетаны шын мәнінде тазартуға мүмкіндік беретін нәрсе бүгінгі таңда потенциалды қауіпті болып отыр.

АСГ — болашақ технология емес, өткізіп алған мүмкіндіктің ескертуі ғана. Қазіргі жағдайларда басты басымдық атмосфера мен адам ағзасынан МНП-ты шығара алатын әзірлемелерге берілуі керек. Ең алдымен, бізге уақыт ұтып алу қажет.

## **Микро- және нанопластик улылығын төмендетуге арналған инновациялық ғылыми көзқарас**

Микропластиктің әсіресе, нанопластиктің адам денсаулығына көп деңгейлі және жинақталған әсері туралы берілген деректерді ескере отырып, қазіргі өркениет экологиялық-биомедициналық қиындыққа тап болып отырғаны анық көрінеді, бұл мәселе қоршаған ортаның ластануы туралы дәстүрлі түсініктерден асып түседі. Бұл проблема тек жеке биосфераларға ғана емес, ұзақ мерзімде *Homo sapiens* популяциясының тұрақтылығына да қатысты.

Қазіргі таңда өндірілген барлық пластиктің, яғни 9 миллиард тоннадан астамы, қоршаған ортада жинақталып келе жатыр және микро- және наноөлшемге дейін ұсақталып, жоғары химиялық және биологиялық белсенділікке ие болады. Микро- және нанопластик топырақта, суда, ауада және барлық негізгі тағамдық өнімдерде — көкөністер мен жемістерден бастап ет, балық, бал, сүт және тұзға дейін — анықталған. Бұл пластикалық бөлшектердің тағамдық тізбектерге толық енуін көрсетеді және дәстүрлі «қауіпсіз» немесе «денсаулыққа пайдалы» тағам түсінігін айтарлықтай өзгертеді.

Бөлшектердің адам ағзасына түсу жолы олардың биологиялық мінез-құлқы мен таралуын айтарлықтай анықтайды. Ас қорыту жолы арқылы түскен пластик ішінара шығарылуы мүмкін болса, ингаляциялық жол әлдеқайда жоғары қауіп деңгейімен сипатталады. Тыныс арқылы енген нанопластик өкпе тінінде тұншығып, гематоэнцефаликалық бөгеттерден өтіп, тікелей бас миына жетуі мүмкін, онда ол ұзақ мерзімге жиналуы ықтимал. Сонымен қатар, ағзаның табиғи детоксикация механизмдері (бауыр, бүйрек) мұндай бөлшектерді тиімді танып, шығару мүмкіндігіне ие емес.

Микропластиктің ең жоғары концентрациясы су айдындарының, жағалаулардың және орман массивтерінің маңында тіркеледі — әсіресе ылғалдылығы мен температурасы жоғары жағдайда.

Мұндай ландшафттарда пластик ұзақ сақталып, аэрозольдік тасымалға қатысады, өсімдіктерде тотығу стрессін туғызады және фотосинтез процестерінің тиімділігін төмендетеді. Бұрын сауықтыру мақсатында жағалауда демалу оң әсер ретінде қарастырылса, бүгінгі таңда бұл қосымша ингаляциялық жүктемемен байланысты: бағалаулар бойынша ашық су айдындарының маңында демалғанда дем алынатын пластик көлемі қалалық ортадағы көрсеткіштерден бірнеше есе жоғары болуы мүмкін.

Эпидемиологиялық зерттеулер МНП ластануының деңгейі мен созылмалы инфекциялық емес аурулардың таралуы — артериялық гипертензия, қант диабеті, инсульт, депрессиялық және когнитивтік бұзылыстар сияқты — арасында тұрақты байланысты көрсетеді. Биологиялық бөгеттерден өтіп, мидың, жүректің, өкпенің және плацентаның тіндерінде жинақталу қабілеті арқылы МНП молекулалық, жасушалық және органдық деңгейде токсикалық әсер көрсетеді. Пластик ағзада жиналып, иммундық жүйені басатын, қабынуға қарсы және генотоксикалық әрекетке ие болады. Қауіптерді анықтау саласында прогресс болғанына қарамастан, қазіргі уақытқа дейін МНП-ты адам ағзасынан бейтараптандыру және шығару үшін тиімді механизмдер әзірленген жоқ.

Нанопластиктің жүйелі биологиялық әсер ететін ең маңызды қасиеттерінің бірі — электростатикалық зарядты сақтай алу қабілеті. Инерттік бөлшектерден айырмашылығы, нанопластик жасуша беттерімен, ақуыздармен, рецепторлармен және тіпті генетикалық материалмен белсенді өзара әрекеттесіп, молекулалық деңгейде тұрақты байланыстар қалыптастырады. Бұл қасиет нанопластик бөлшектерінің гематоэнцефалиялық бөгет сияқты биологиялық тосқауылдардан өтуін күшейтіп қана қоймай, олардың кейінгі шығарылуын қиындатады, тіндерде, әсіресе ми тінде ұзақ уақытқа жинақталуына ықпал етеді. Электростатикалық өзара әрекет жасушалық бұзылыстар каскадын іске қосады, оның ішінде мембрана деполяризациясы, митохондриялық дисфункциялар, тотығу стрессі және апоптоз, бұл нанопластик бөлшектерінің минималды концентрацияларында да токсикалық әсерін айтарлықтай арттырады.

**Бұл баяндаманың авторлары осы мәселені шешудің жолы — микро- және нанопластиктің электростатикалық зарядын бейтараптандыру немесе экрандау — нанопластиктің биологиялық белсенділігін айтарлықтай төмендетіп, оның маңызды органдарда жиналу жылдамдығын баяулатуы мүмкін деген болжам жасайды. Авторлардың бағалауы бойынша, электростатикалық зарядты экрандау немесе бейтараптандыру МНП-тің әлеуетті қауіптілігін кем дегенде 50 % төмендетуге қабілетті, бұл зерттеу бағытын ерекше маңызды етеді. Бұл ғылыми қауымға МНП-тің әсерін диагностикалау, детоксикациялау және алдын алу үшін кешенді әдістерді әзірлеуге қажетті уақыттық буфер береді. Осы тұрғыда биофизика, наноматериалтану және молекулалық токсикология саласындағы зерттеулер басымдыққа ие болып отыр. Бұл мәселені кейінге қалдыру деградациялық процестердің жылдамдауына әкелуі мүмкін.**

Биомедициналық шешімдермен қатар, пластикалық қалдықтарды қауіпсіз өңдеуге ғылыми негізделген стратегия қажет. Қолданыстағы утилизация жүйесі микропластиктің әрі қарай ұсақталуы мен биосфераға түсуін болдырмайды. Глобализация жағдайында пластикті жинау және қайта өңдеудің қауіпсіз әдістерін жасау, енгізу және масштабтау үшін халықаралық технологиялық платформаны әзірлеу қажет. Мұндай шараларды тек институционалды қолдау, шекарааралық реттеу және ғылыми дипломатия жағдайында жүзеге асыруға болады.

Ғылыми қауым, денсаулық сақтау саласының өкілдері және кең қоғамдастық арасында хабардарлықты арттыру ерекше маңызды. Қазіргі таңда көпшілік адамдар МНП әсер ауқымын түсінбейді және оның таралуына бейсаналы түрде ықпал етуді жалғастырып келеді.

Осылайша, микро- және нанопластик мәселесі тек потенциалды қауіптен шығып, жүйелі қауіп факторына айналды. Бұл бағыт ғылыми қауым мен денсаулық сақтау органдарының басымды назарын, деректерді жүйелеуді, тәуекелді бағалау стандарттарын әзірлеуді, сондай-ақ мемлекетаралық және халықаралық ынтымақтастықты кеңейтуді қажет етеді. Биологиялық қауіпсіздікті қысқа және ұзақ мерзімде қамтамасыз ететін тиімді шешімдер қабылдау үшін көпсалалы тәсіл, институционалды мойындау және халықаралық күштерді консолидациялау қажет.

## Х ФАКТОР. ТАБИҒИ АПАТ ЦИКЛІНІҢ ДИНАМИКАСЫНА МИКРО- ЖӘНЕ НАНОПЛАСТИКТІҢ ӘСЕРІ

«Микро- және нанопластиктердің климатқа әсері» тарауында талқыланғандай, микро- және нанопластик бөлшектері мұхит суларының жылу өткізгіштік функциясын төмендетеді, бұл мұхитта жылудың жиналуына және нәтижесінде мұхит температурасының күрт өсуіне әкеледі. Дегенмен, микро- және нанопластиктің өзі мұхитты жылыту көзі болып табылмайды.

2023 жылдың көктемінен бастап және бір жылдан астам уақыт бойы Дүниежүзілік мұхит бетінің орташа температурасы күн сайын тарихи максимумдарды жаңартып келеді, бұл бақылаулар тарихында бұрын-соңды болмаған құбылысқа айналды (128-сурет). Бүкіл әлем ғалымдары бұл қалыпты өсімге қатты алаңдаушылық білдіруде.



Майами университетінің Мұхиттану мектебінің аға ғылыми қызметкері, доктор Брайан МакНолди былай деп атап өтті: **«Бұл тек бір жыл бойы байқалған мұхиттағы рекордтық температуралар туралы ғана емес - бұл жаңа рекордтар бұрынғылардан қаншалықты асып түсетінін атап өту маңызы. Ағымдағы көрсеткіштер тіпті бұрынғы рекордтық мәндерге жақындамайды»**<sup>322</sup>.



Бұл алаңдаушылықты британдық теңіз геофизигі доктор Роб Лартер де бөліседі: **«Бұл шынымен де алаңдатады, соның ішінде мен мұндай айқын ауытқудың не себептен байқалып отырғанын сенімді түрде түсіндіріп бере алатын бірде-бір ғалымды естіп отырған жоқпын. Қазіргі таңда бәрі біз күткеннен әлдеқайда күшті әрі әлдеқайда жылдам дамып жатқандай әсер қалдырады»,** — дейді ол<sup>323</sup>.

Климаттық зерттеулер қазіргі модельдер мұхит бетіндегі температураның біртіндеп жоғарылауын болжайтынын көрсетеді, бірақ байқалған өсу қарқыны болжанғаннан әлдеқайда жоғары. Ғалымдар климаттың антропогендік өзгеруі рөл атқарады деп есептейді, бірақ ол байқалған құбылысты толық түсіндіре алмайды.

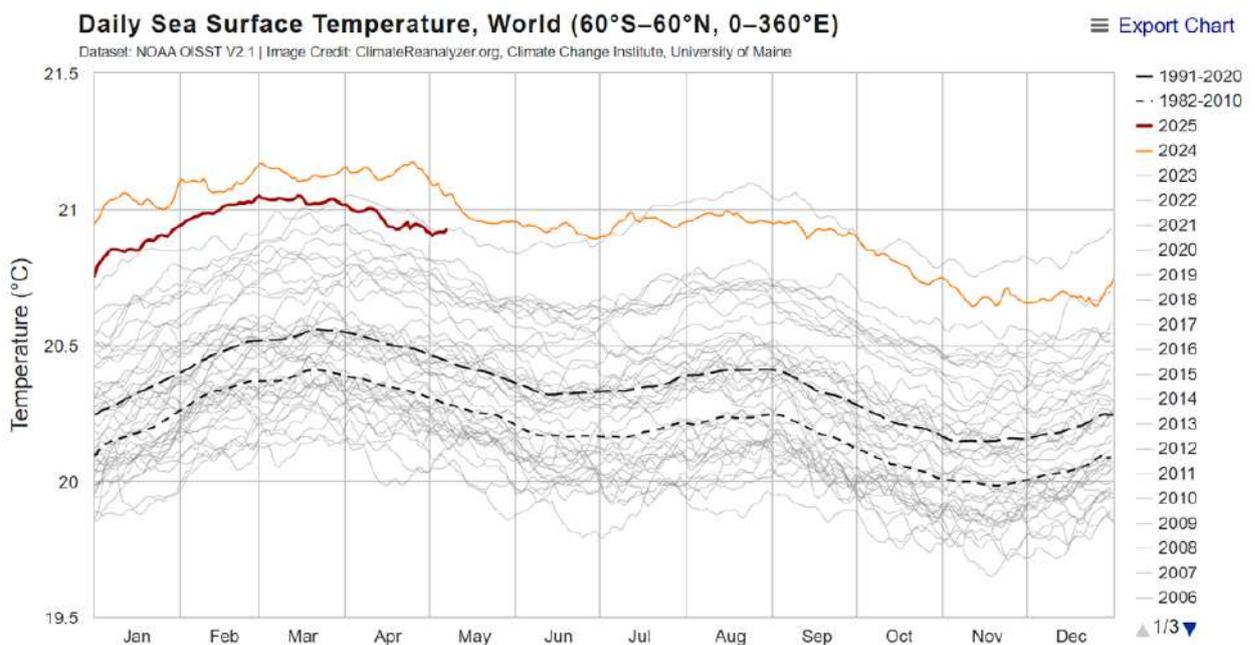
<sup>322</sup>NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024)

<https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179>

<sup>323</sup>The 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).

Сент-Томас университетінің профессоры, мұхит температураларын зерттейтін Джон Абрахам мұхит беті температурасының ұзақ мерзімді өзгерістеріне әсер етуі мүмкін бұрын белгісіз факторлардың бар екенін болжады<sup>322</sup>. Ол бұл факторлар алдыңғы болжамдарда ескерілмегенін атап өтті. Осы баяндаманың авторлары мұхит пен атмосфераның қосымша жылынуына жауапты болуы мүмкін белгілі бір «X факторының» бар екенін алға тартады.



**128-сурет.** Мұхит бетінің тәуліктік орташа температурасы, 1981–2025 жж.

Дереккөз: NOAA OISST V2.1 деректер жинағы | Сурет көзі: [ClimateReanalyzer.org](https://climatereanalyzer.org), Климаттың өзгеруі институты, Мэн университеті, деректер жинағы. NOAA OISST.

[https://climatereanalyzer.org/clim/sst\\_daily/?dm\\_id=world2](https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2)

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

## Мұхиттағы микро- және нанопластик зерттелмеген «Х фактор» болуы мүмкін бе?

Мұхиттардың қазіргі жылынуының басты себебі микро- және нанопластик болуы мүмкін бе деген мүмкіндікті талдау маңызды қайшылықты көрсетеді. Нанопластик шынында да мұхиттың жылуды сыртқа шығару қабілетін төмендетеді. Алайда ол жылу энергиясын өндірмейді — тек оның мұхиттан шығуына кедергі жасайды.

Соңғы 60 жыл ішінде мұхиттың орташа терең қабаттары алдыңғы 10 000 жылмен салыстырғанда<sup>324, 325</sup> 15 есе жылдам жылынды, әрі бұл үдеріс тек жеделдей түсуде. Бұл үдемелі үрдіс жыл сайын күшейіп келеді. Күн сәулесі жетпейтін мұндай тереңдіктердегі температураны көтеру үшін орасан зор энергия мөлшері қажет<sup>326, 327</sup>.

Өз кезегінде, мұхитқа микро- және нанопластиктердің ауқымды ағыны салыстырмалы түрде жақында - шамамен 30 жыл бұрын басталды, ал мұхит тереңдігінің жылынуының жеделдеуі соңғы 60 жылда байқалды. Осылайша, пластик мұхиттағы осы ластаушы заттардың айтарлықтай пайда болуынан көп бұрын басталған мұхиттың орта тереңдігінің жылынуының ұзақ мерзімді және өсіп келе жатқан үрдісін түсіндіре алмайды.

Күн радиациясы да бұл қызуды түсіндіре алмайды, өйткені күн сәулелері 200 м-ге дейінгі тереңдікке енеді. Араластыру (араласу) процесінің нәтижесінде су Күннің әсерінен ең көп дегенде 700 метр тереңдікке дейін жылынуы мүмкін<sup>328</sup>.

Күн сәулелері өтпейтін терең қабаттарды жылыту үшін орасан зор энергия қажет. Бұл мұхитта жиналған жылу басқа бір көзден келуі тиіс екенін білдіреді, ал нанопластиктің болуы осы жылудың мұхит ішінде «қамалып қалуына» әкеледі.

Күннің әсерінен болатын жылыну мұхит температурасының экспоненциалды өсу себептерін түсіндірмейтіндіктен, мұхиттың әртүрлі бөліктерінде қосымша жылу көздерінің бар екендігі туралы болжам ұсынылды.

## Температуралық аномалиялардың вертикалды таралуы

Argo жүйесінің соңғы екі онжылдықтағы әртүрлі тереңдіктердегі температураның ғаламдық ауытқулары жөніндегі деректерін талдау мұхит бетінің жылуын терең қабаттарға төмен қарай

<sup>324</sup>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>

<sup>325</sup>Columbia Climate School. 'Is Global Heating Hiding Out in the Oceans?'. (2013) <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (Accessed May 10, 2025).

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

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

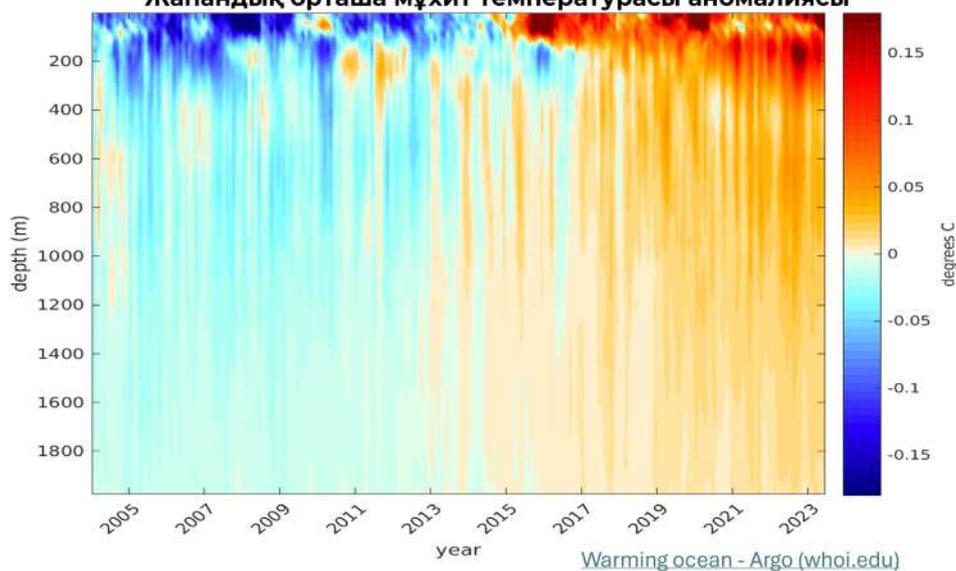
<sup>328</sup>Climate.gov. 'The role of the ocean in tempering global warming'. (2014)

<https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/role-ocean-tempering-global-warming> (Accessed May 10, 2025).

беруінің дәстүрлі моделіне сәйкес келмейтін бірқатар температуралық аномалияларды анықтады<sup>329, 330</sup>.

Температуралық градиенттің инверсиясының статистикалық тұрғыдан мәнді жағдайлары тіркелді, яғни салыстырмалы түрде суық беткі қабаттардың астында жылырақ су массалары орналасқан (129-сурет). Мұндай температуралық стратификация физикалық тұрғыдан тек беттен төмен қарай жүретін жылу алмасу жағдайында мүмкін емес, өйткені физика заңдарына сәйкес жылу энергиясы арадағы суық қабатты жоғарыдан төмен қарай еңсере алмайды.

**ARGO деректері соңғы 20 жылдағы әртүрлі тереңдіктегі температура ауытқуларын көрсетеді.  
Жаһандық орташа мұхит температурасы аномалиясы**



**129-сурет.** 2004 жылдан бастап 0–1900 м тереңдіктегі мұхит температурасының ғаламдық ауытқулары

Дереккөз: Argo <https://www2.who.edu/site/argo/impacts/warming-ocean/>

Қытайдың мұхиттану университетінің<sup>331</sup> ғалымдарының жаңа зерттеулері мұхит қабаттарында бетінде көрінбейтін жылу аномалияларының бар екенін растайды. Зерттеулер көрсеткендей, мұхиттағы жылу толқынының үштен бірі бетінде ешқандай түрде көрінбейді, ал шамамен жартысы өмірлік циклдің барлық кезеңдерінде көрініс таба бермейді. Соңғы үш онжылдықта мұхиттың жылынуы нәтижесінде бұл беткі қабат астындағы мұхиттық жылу толқындарының жыл сайынғы көлемі айтарлықтай артты. Мұхиттағы жылу толқындарының елеулі бөлігі бетінде мүлде байқалмайтыны олардың атмосферадан келетін жылумен пайда болуы мүмкін еместігін айқын көрсетеді.

<sup>329</sup>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>.

<sup>330</sup>Wong, 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>.

<sup>331</sup>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>

## Мұхит түбіндегі жылу көздерін зерттеу

Мұхит түбіндегі температураны зерттеу және жүйелі мониторинг қазіргі таңда өте сирек және шектеулі жүргізіледі. Ұзақ уақыт бойы ғылым мұндай тереңдіктердегі өзгерістерді қадағалауды мақсат етпеді. Қазіргі заманғы мониторинг жүйелері, мысалы, ARGO буйлары желісі, мұхиттың тек 0,03 % аумағынан деректер жинауға мүмкіндік береді, сонымен қатар буйлардың көпшілігі орташа тереңдіктің жартысына дейін ғана батырылып, мұхит түбіне жетпейді<sup>332</sup>.

Адамзат шын мәнінде мұхит түбінің тек шамамен 3–3,5 % ғана зерттеді<sup>333</sup>. Бұған бірнеше маңызды себептер бар. Біріншіден, Жаһандық мұхиттың көп бөлігі 3 000–6 000 м тереңдікте орналасқан. 6 000 м тереңдіктегі өте үлкен қысымға төтеп беретін тереңсудағы аппараттарды жасау үлкен қаржылық және технологиялық ресурстарды талап етеді. Екіншіден, экспедициялар өздері өте күрделі және қымбат: тарихта осындай зерттеулер үшін тек сегіз арнайы аппарат қана жасалған. Сондықтан бүгінгі таңда біз ғарышты кейбір аспектілерде тіпті Жаһандық мұхиттың ең шалғай аймақтарынан да тереңірек зерттегендейміз.

Сонымен қатар мұхит түбіндегі геологиялық процестер климаттың өзгеруінде және мұхиттардың жылулық тепе-теңдігінде маңызды рөл атқаруы мүмкін екені барған сайын айқын бола түсуде. Мұхит түбінде орасан зор энергияға ие миллиондаған бірегей геологиялық нысандар — жанартаулар, жарықтар және гидротермалдық көздер орналасқан. Алайда олардың қолжетімсіздігі мен мониторингтің жеткіліксіз қамтылуына байланысты, олардың ықтимал әсерінің ауқымы әлі күнге дейін ғылым үшін көп жағдайда жұмбақ болып қалып отыр.

Соған қарамастан, мұхит түбін зерттеулер жүргізіліп жатыр және олардың бірқатары мұхит суының түбінде жылыну байқалатынын көрсетеді.

Осылайша, **Аргенти бассейнінің**<sup>334</sup> **екі терең аймағында**, 4 500 м-ден асатын тереңдіктерде, айтарлықтай жылыну үрдістері байқалады: 2009–2019 жылдар аралығында он жылда 0,02 °C ± 0,01 °C. Мұндай суық судың осындай көлемін түбінде жылыту үшін орасан зор энергия қажет.

**Батыс Антарктида жағалаулары маңында** Уэдделл теңізінің<sup>335</sup> терең суларының аномалды жылынуы байқалуда. Бұл ретте судың жоғарғы 700 метр қабаты іс жүзінде жылынбайды, ал одан да терең қабаттарда температураның тұрақты түрде жоғарылауы тіркелуде. Бір жағынан Уэдделл теңізін Батыс Антарктикалық рифт қоршап жатса, екінші жағынан — Оңтүстік Сандвич аралдарымен байланысты суасты жанартаулық жотасы орналасқан.

<sup>332</sup>Argo Program. 'Mission'. (n.d.) <https://argo.ucsd.edu/about/mission/> (Accessed May 10, 2025).

<sup>333</sup>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>

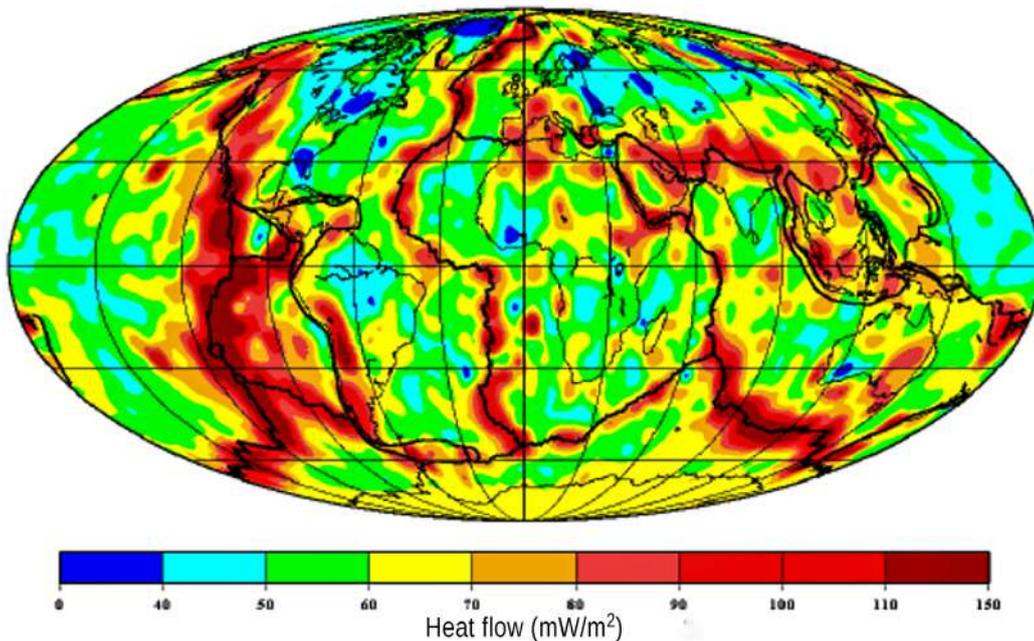
<sup>334</sup>Meinen, C. S., Perez, R. C., Dong, S., Piola, A. R. & Campos, E. Observed Ocean Bottom Temperature Variability at Four Sites in the Northwestern Argentine Basin: Evidence of Decadal Deep/Abyssal Warming Amidst Hourly to Interannual Variability During 2009–2019. *Geophysical Research Letters* 47, e2020GL089093 (2020). <https://doi.org/10.1029/2020GL089093>

<sup>335</sup>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>

## Мұхит түбіндегі геотермиялық жылу ағынының, тектоникалық процестердің және жанартаулардың атқылауының рөлі

Атмосфераның әсері аз болатын терең теңізді жылытуда байқалатын ауытқулар жағдайында Жердің ішкі бөлігінен келетін геотермиялық ағынды қосымша жылудың әлеуетті көзі ретінде қарастыру қисынды сияқты. Дәстүрлі түрде климаттық модельдерде төменнен келетін геотермиялық ағын тұрақты және шамамен  $0,09 \text{ Вт/м}^2$  (немесе  $90 \text{ мВт/м}^2$ )<sup>336</sup> тең деп есептеледі, бұл күн ағыны<sup>337, 338</sup> шамасынан бірнеше рет аз.

Алайда ғылыми деректердің көлемі артып келе жатқаны бұл жылу көзінің бұрын бағаланбай келген маңызын көрсетуде. Ауқымды геотермиялық зерттеулер мұхит түбі арқылы шығатын жылу ағынының энергиясы мұхиттық қыртыстың жасына тәуелді екенін көрсетті: ол жас спрединг аймақтарында ең жоғары болып, ал ескі мұхиттық бассейндерде ең төмен деңгейге дейін азаяды<sup>339</sup> (130-сурет). Мұндай жергілікті аномалиялар судың температуралық вертикальды құрылымына әсер етіп, термоклинді әлсіретуі және су массаларының араласуын күшейтуі мүмкін, бұл өз кезегінде мұхиттық циркуляцияға, биологиялық өнімділікке және тіпті поляр маңындағы аймақтардағы мұздықтардың тұрақтылығына да ықпал етеді.



**130-сурет.** Жылу ағынының жаһандық таралуы

Мақаланың суреті: 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.

<sup>336</sup>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>

<sup>337</sup>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>

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

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

**Геотермалдық жылу ағыны — Жер қойнауынан бірлік уақыт ішінде беткі қабаттың бірлік ауданы арқылы өтетін жылу энергиясының мөлшері, ол шаршы метрге шаққандағы милливаттпен (мВт/м<sup>2</sup>) өлшенеді.**

Материктер үшін геотермиялық ағынның орташа энергиясы 40–60 мВт/м<sup>2</sup>, мұхит түбі үшін – шамамен 100 мВт/м<sup>2</sup> болса, кейбір аймақтарда бұл көрсеткіштерден бірнеше есе жоғары мәндер тіркелген. Геотермиялық жылу ағынының ең экстремалды мәндері тектоникалық және жанартаулық белсенді аймақтарда кездеседі: мысалы, мұхиттың орта жоталары мен белсенді рифт аймақтарында ағын 200–1000 мВт/м<sup>2</sup><sup>340</sup> асуы мүмкін.

Әсіресе жоғары жылу ағыны геотермиялық кен орындарының аймақтарында байқалады – бұл су температурасы 350–400 °C-қа жететін мұхит түбіне түсетін ыстық сұйықтықтардың аймақтары. Бұл жүйелер бірегей экожүйелерді құрайды және жер асты суларының жылу режиміне айтарлықтай әсер ететін жылу ағынының жергілікті ауытқуларын қамтамасыз етеді.

Мұхит түбіндегі геотермалдық ағыны жоғары аймақтардың ең жақсы зерттелгені – орталық мұхит жоталары. Бұл аймақтар литосфералық тақталардың ажырауы жүретін жерлер болып, мұнда жаңа мұхиттық қыртыс белсенді түрде қалыптасады. Бұл ғаламдық суасты жоталары жүйесі шамамен 60 000 км<sup>341</sup> ұзындыққа созылып, Жер шарын бейсбол добының тігістері сияқты қоршап өтеді. Орталық мұхит жоталары гидротермалдық көздер, суасты жанартаулары және белсенді жарықтармен тығыз сипатталады, олар арқылы Жер мантиясынан мұхитқа елеулі мөлшерде жылу энергиясы өтеді<sup>342</sup>.

Бұл аймақтардағы жылу ағыны мұхит түбінің қалған бөліктеріне қарағанда 10–100 есе жоғары, сондықтан олар Жердің ішкі қабаттары<sup>332</sup> мен Теңіз әлемі арасындағы жылу алмасудың негізгі аймақтары болып саналады.

Мэриленд университетінің профессоры Артур Витерито 1995 жылдан бері орталық мұхит жоталары бойындағы жер сілкіністерінің саны артқанын анықтаған (131-сурет)<sup>343</sup>. 0,7 корреляция коэффициентімен бұл өсім ғаламдық температураның өсуімен сәйкес келеді. Сондай-ақ, температураның өсуі сейсмикалық белсенділіктің артуынан екі жыл кейін байқалады. Бұл аймақтардағы сейсмикалық белсенділіктің артуы жаңа мұхиттық қыртысты қалыптастыратын магманың көтерілуімен байланысты.

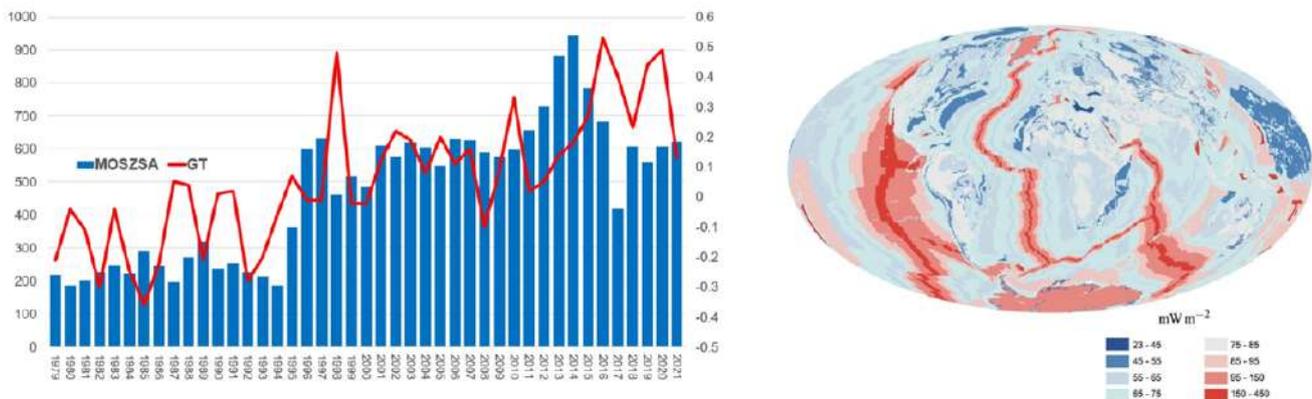
<sup>340</sup>Polyak, B. G., & Khutorskoy, M. D. (2018). Heat flow from the Earth's interior as an indicator of deep-seated processes. *Georesources*, 20(4), Part 2, 366–376.  
<https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376>

<sup>341</sup>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>

<sup>342</sup>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).

<sup>343</sup>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>

### Океан түбіндегі сейсмикалық белсенділіктің, әсіресе орталық мұхит жоталары бойымен, көбеюі.



**131-сурет.** Мұхит түбіндегі 4,0–6,0 баллдық жер сілкіністерінің және жаһандық атмосфералық температураның бір мезгілде артуы

Дереккөз: Viterito, A. (2022). "1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History." *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 29(5). <https://doi.org/10.19080/ijesnr.2022.29.556271>

Магманың көтерілу көлемін тікелей өлшеудің болмауына қарамастан, жаһандық сейсмикалық бақылау желісі бұл процестердің масштабын жанама түрде – сейсмикалық деректердің көлеміне қарамастан өсетін сейсмикалық оқиғалардың саны мен қарқындылығы бойынша бағалауға мүмкіндік береді. Витерито гипотезасына сәйкес, орта мұхит жоталарының бойындағы сейсмикалық және жанартаулық белсенділік гидротермиялық шығарындылар мен суды жылыту жылдамдығының артуына әкеледі, бұл өз кезегінде парниктік газдар шығарындыларына және атмосфераның қызуына әкеледі. Осылайша, Витерито мұхиттардың тек жоғарыдан ғана емес, төменнен де – геологиялық процестердің әсерінен қызатынын көрсетеді.

Мұхит түбінің жылу режимін қалыптастыруда су астындағы вулканизм де маңызды рөл атқара алады. Заманауи деректер Жердегі барлық жанартау атқылауларының шамамен 75% су астында болатынын көрсетеді<sup>344</sup>. Бұрын су астындағы атқылау лаваның тыныш төгілуімен және су бағанының қысымынан жарылғыш атқылау мүмкін емес деп есептелді. Сонымен, су астындағы жанартаулар су бағанасын қыздыра алмайды деп болжанған - ағып жатқан лава бірден қатып қалады. Бірақ соңғы зерттеулер су астындағы жанартаулардың атқылауының механизмі туралы түсінікті өзгертті.

Магманың қысымы 10 000–30 000 барды құрайды, ал мұхиттың ең терең бөліктеріндегі су бағанының қысымы бар болғаны 1 000 бар ғана.

Магма жарып шыққан кезде су лезде қайнап, H<sub>2</sub>O молекулалары ыдырайды, нәтижесінде қысымы жүздеген немесе мыңдаған барға жететін газ-су қуысы түзіледі<sup>345</sup>, бұл аса қуатты жарылғыш атқылауларға алып келеді.

<sup>344</sup>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)

<sup>345</sup>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>

Мұндай атқылаулар тефраның және гидротермалардың — аса қатты қызған судың алып ағындарының атқылауымен қатар жүреді, олардың көлемі 40 миллион олимпиадалық бассейнге тең болуы мүмкін. Мұндай шығарындылар мұхиттың жылулық тепе-теңдігін тек жергілікті деңгейде ғана емес, жаһандық деңгейде де бұзуы ықтимал.

Лидс университетінің зерттеулері Тынық мұхитының<sup>346</sup> түбінде километрлерге созылған жанартаулық тефра алқаптарын анықтады, бұл қуатты жарылғыш суасты атқылауларының болғанын растайды. Осындай бір атқылау шамамен 1 ТВт жылулық қуат бөлуі мүмкін, бұл АҚШ-тың энергия тұтынуынан екі есе жоғары..



Жарылғыш атқылаулардың мұхиттың жылынуына қосатын үлесін Бавариядағы Юлиус Максимилиан университетінің профессоры Бернд Зимановски де растайды<sup>347</sup>: **«Суасты лавалық атқылаулар кезінде лаваның жылуы суға салыстырмалы түрде ұзақ уақыт бойы беріледі. Ал жарылғыш атқылаулар кезінде магма ұсақ бөлшектерге ыдырайды. Бұл мұхиттардағы жылулық тепе-теңдік ағындарын жергілікті деңгейде немесе тіпті жаһандық деңгейде бұза алатын аса күшті жылулық импульстердің пайда болуына әкелуі мүмкін»<sup>348</sup>.**

Заманауи есептеулер бойынша, гидротермиялық белсенді су асты түзілімдерінің саны 100 мыңнан 10 миллионға<sup>349, 350</sup> дейін жетеді, бұл геотермиялық белсенділіктің мұхиттың жылу балансына қосқан үлесі аз бағалануы мүмкін дегенді білдіреді. Магманың жарылғыш атқылауы жергілікті жерде мұхиттардағы жылу ағындарын бұзуға қабілетті қуатты жылу импульстарының пайда болуына әкеледі. Дегенмен, мұхиттың көлемін ескерсек, оны қыздыруға мұндай күшті су астындағы атқылаулар да жеткіліксіз. Жанартаулар барлық жерде орналаса бермейді, ал олардың атқылауы эпизодтық, ал энергиясы бүкіл мұхитты жылытуға жетпейді. Дегенмен, бұл мұхиттағы жергілікті жылу толқындарын тудыруы мүмкін.

Мұндай жергілікті жылулық аномалиялардың нақты мысалы — теңіздегі жылу толқындары, яғни мұхиттағы ұзақ уақыт бойы жергілікті қызған су аймақтары. Оларды тағы «блбтар» деп атайды. Бұл — беткі судың температурасы қалыптан тыс жоғары болатын алып аумақтар. 1995 жылдан бері блбтардың саны айтарлықтай артты<sup>351</sup> және олар Дүниежүзілік мұхиттың әртүрлі бөліктерінде, соның ішінде Жаңа Зеландия жағалауларында, Оңтүстік-Батыс Африка маңында және Үнді мұхитының оңтүстік бөлігінде жиі байқала бастады.

<sup>346</sup>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>

<sup>347</sup>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>

<sup>348</sup>University 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).

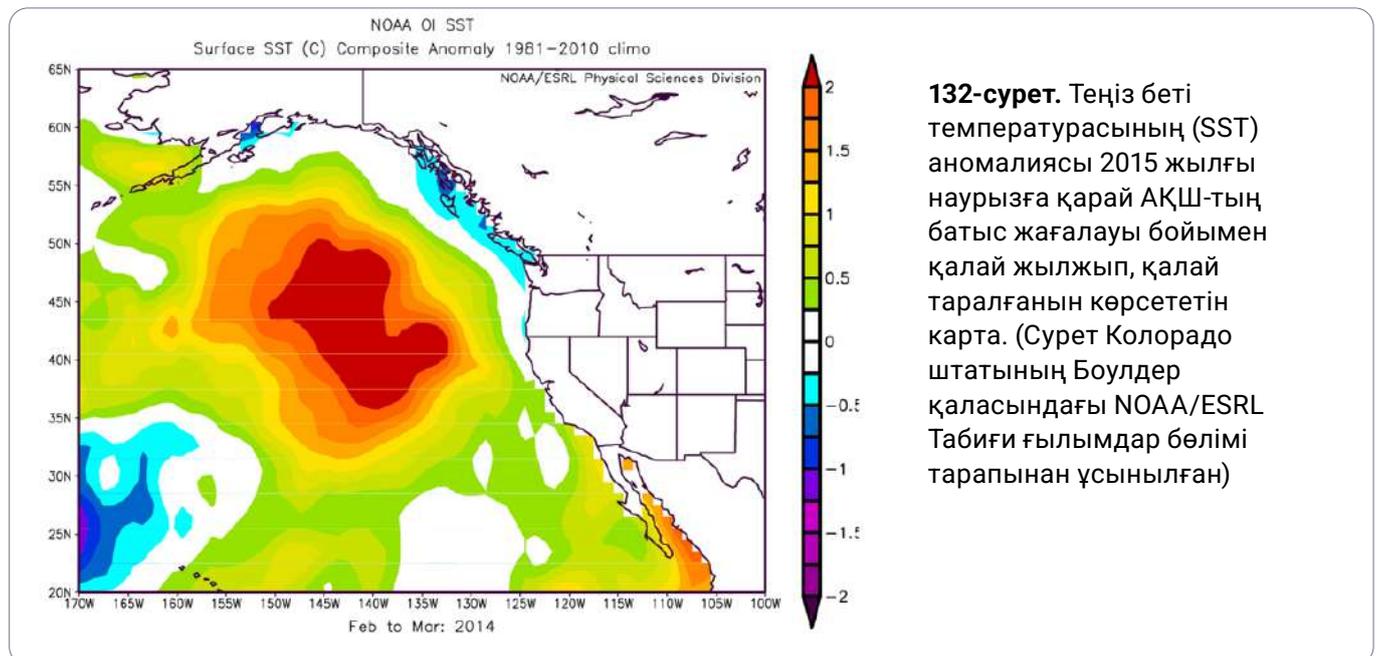
<sup>349</sup>Baker, E. T. et al. How many vent fields? New estimates of vent field populations on ocean ridges from precise mapping of hydrothermal discharge locations. Earth Planet. Sci. Lett. 449, 186–196 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.05.031>

<sup>350</sup>Science 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).

<sup>351</sup>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>

Ең танымал әрі ауқымды блобтардың бірі 2013 жылы Аляска шығанағында қалыптасып, қысқа уақыт ішінде Тынық мұхиты бойынша кең тарайды. Оның аумағы 4 млн км<sup>2</sup>-ден асты (бұл Үндістан аумағынан да үлкен), ал кейбір жерлерде судың температурасы орташа мәннен 5–6 °C-қа жоғары болды (132-сурет). Блоб үш жыл бойы, 2016 жылға дейін, мұхит арқылы Аляскадан Мексикаға дейін жылжыды. Бұл құбылыс аймақтың теңіз экожүйесіне және климатына кері әсерін тигізді.

Блобтың пайда болу себебі, ең ықтимал нұсқа бойынша, Аляска жағалауы маңындағы белсенді жанартау әрекеті және Кобб магмалық плюмі<sup>352</sup> болып табылады. Олар мұхит түбіндегі суды қыздырып, оның аса үлкен көлемде беткі қабатқа көтерілуіне себеп болған.



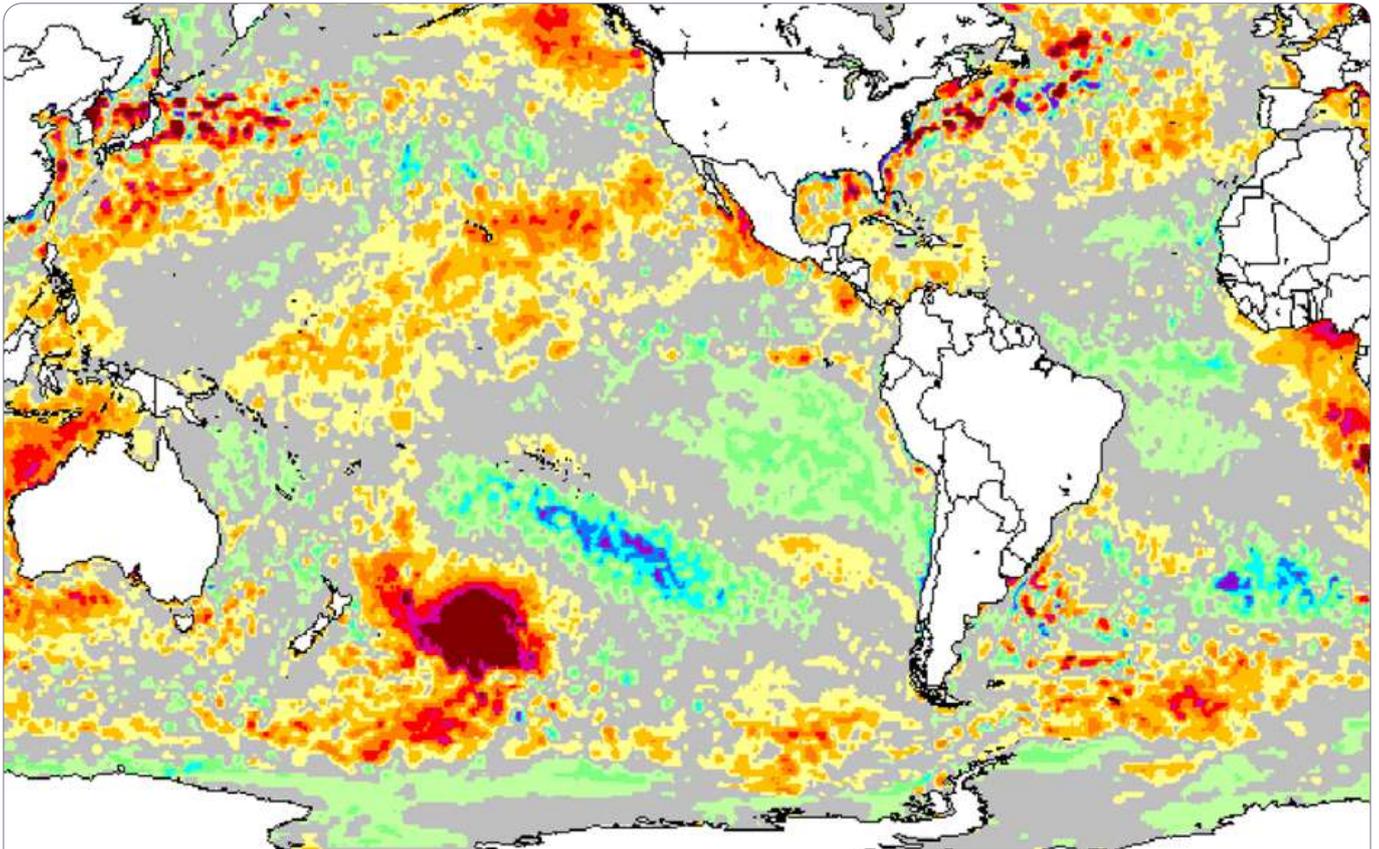
Жаңа Зеландияның шығысында, Тынық мұхитының оңтүстік бөлігінде 2019 жылы желтоқсанда блоб пайда болды, оның температурасы кейбір күндері орташа мәндермен салыстырғанда 6 °C-қа жоғары болды. Блобтың аумағы 1 000 000 км<sup>2</sup>-ден асып, бұл Техас аумағынан 1,5 есе немесе Жаңа Зеландия аумағынан 4 есе үлкен болды (133-сурет). Хабарланғандай, ол сол кезеңде Дүниежүзілік мұхиттағы ең үлкен блоб болған. Бұдан бөлек, бұл құбылыс осы өңірдегі бақылаулар тарихындағы көлемі бойынша екінші ең ірі оқиғаға айналды.

<sup>352</sup>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>

66

Веллингтондағы Виктория университетінің география, экология және Жер ғылымдары кафедрасының профессоры Джеймс Ренвиктің айтуынша:

**«Бұл – ғаламшардағы аномалды жылынудың ең ірі аймағы. Әдетте мұндағы судың температурасы шамамен 15 °C болса, қазір ол 20 °C шамасында»<sup>353</sup>.**



**133-сурет.** 2019 жылы 25 желтоқсанындағы Тынық мұхитының оңтүстік бөлігінде теңіз беті температурасының аномалиясын көрсететін карта

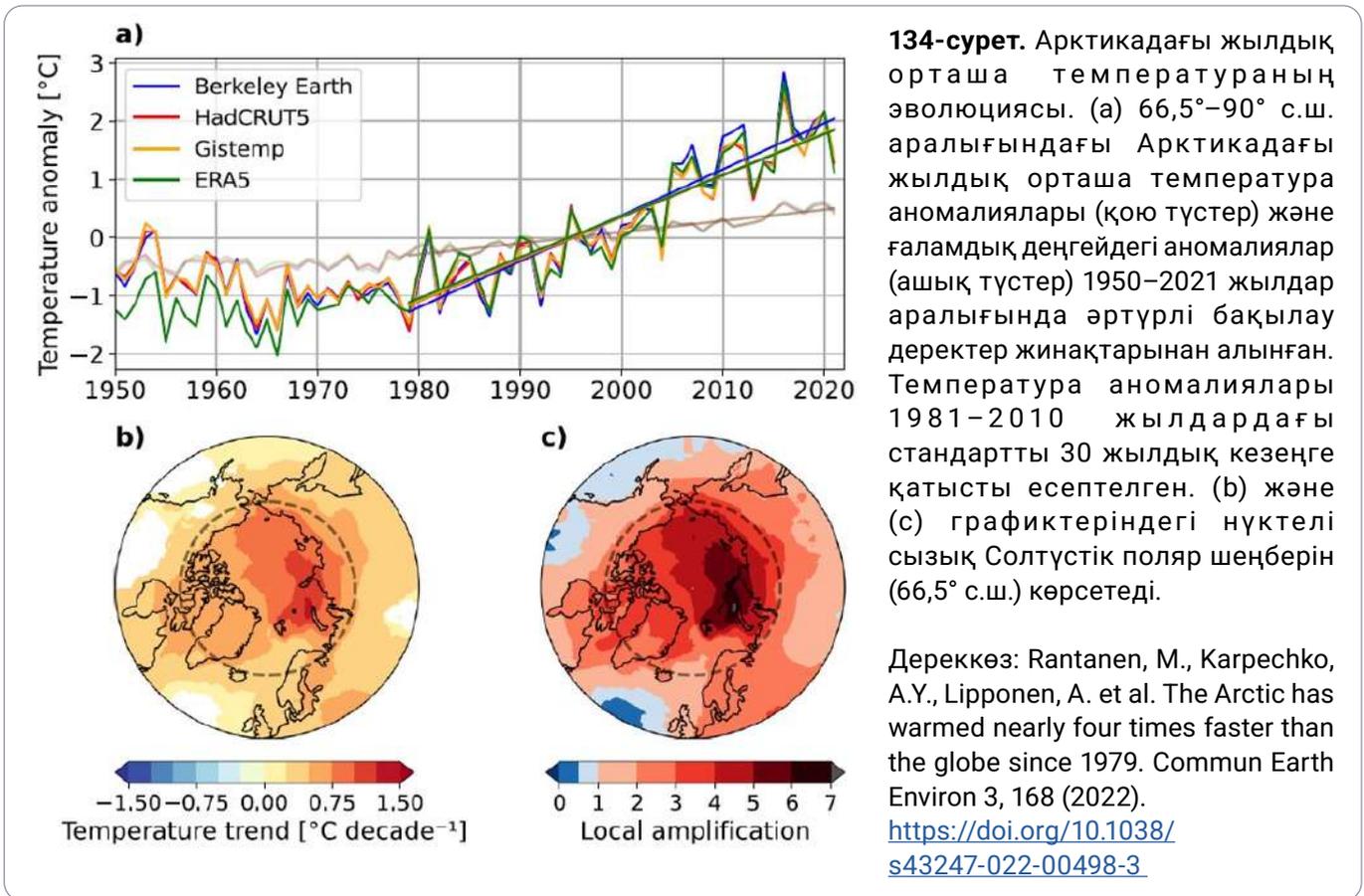
Дереккөз: The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019) <https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists> (Қол жеткізу күні: 11.05.2025)

Бұл блобтың пайда болуына ықтимал себеп ретінде Жаңа Зеландия жағалауындағы ежелгі жанартаулық платоның белсенділігі аталады<sup>354</sup>.

<sup>353</sup>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).

<sup>354</sup>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>

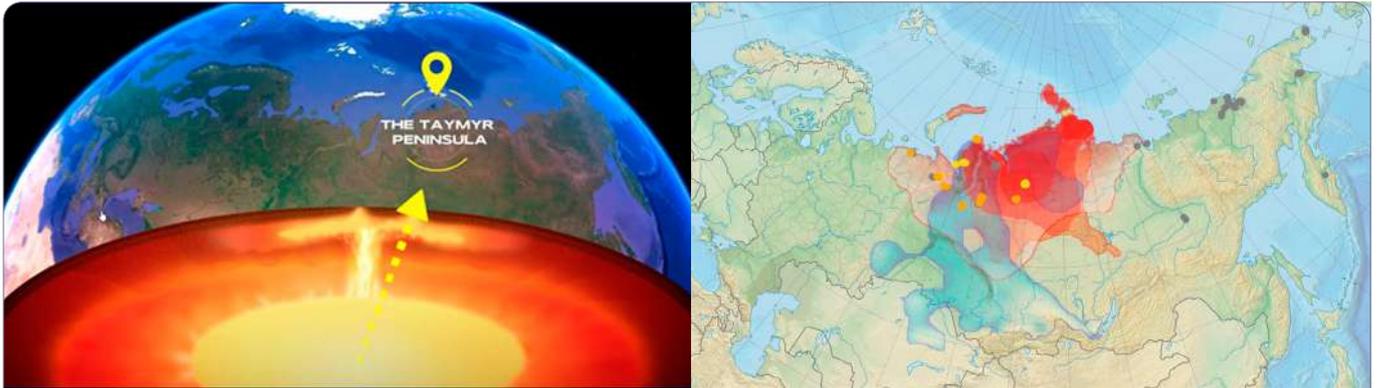
Магмалық процестердің арқасында геотермалдық жылудың мұхит суын қыздыруға әсерінің тағы бір нақты мысалы — Сібір жағалауындағы Арктика теңіздеріндегі жылу аномалиялары. 2022 жылғы зерттеулерге сәйкес, Сібір Арктикасы Жер шарының орташа жылу қарқынынан шамамен төрт есе жылдам қызуда, бұл климаттық модельдерде бұрын есептелгеннен де жоғары көрсеткіш болып табылады және ғалымдар үшін аса күтпеген жағдай болып шықты<sup>355</sup> (134-сурет).



Дәл осы әлемнің аймағында, Таймыр түбегі маңында, Сібір магматикалық плюмінің белсенділігі артып келеді. Бұл плюм дәл қазір 250 миллион жыл бұрын Сібір трапптарының жаппай лава төгілуі болған өңірде қарқынды түрде көтерілуде.

Барлық деректер көрсетіп отырғандай, плюмнің басы қазіргі уақытта Шығыс Сібір кратонын белсенді түрде ыдыратуда, ал магма оның бүкіл аумағы бойынша таралуда (135-сурет). Алдын ала бағалауларға сәйкес, Сібір астындағы магма ағындарының таралу аймағы 2 500–3 000 км диаметрге жетуі мүмкін, бұл Аустралияның аумағына тең.

<sup>355</sup>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>



135-сурет. Әртүрлі зерттеулердің нәтижелері бойынша плюмнің орналасуын локализациялау

Маңыздысы, Арктикалық теңіздердің осындай қарқынды жылынуы дәл Таймыр түбегі аймағында болып жатыр. Сібір акваториясында байқалатын бұл аномалияны былай түсіндіруге болады: мұхит қыртысы жіңішке болғандықтан жылуды тез өткізеді, ал судың жылу сыйымдылығы атмосфераға қарағанда жоғары. Сондықтан, континенттік қыртыстың астында плюмнің көтерілуіне қарамастан, мұхит сулары жылуды қарқынды жинап, ұстап тұрады.



Сібір магмалық плюмы және оның климаттық жүйеге әсері, сондай-ақ бұл геологиялық құрылымның төндіретін қауіптері мен оларды шешу жолдары туралы толығырақ ақпаратты

**«СІБІРДЕГІ МАГМАЛЫҚ ПЛЮМНІҢ ЖАРЫП ШЫҒУ ҚАУПІ ЖӘНЕ ОСЫ МӘСЕЛЕНІ ШЕШУ ЖОЛДАРЫ»**

атты баяндамада қарауға болады

Барлық осы деректердің жиынтығы мұхит түбіндегі геологиялық процестер ғаламдық жылынуудың маңызды факторы екенін көрсетеді. Мұхит түбіндегі сейсмикалық және жанартаулық белсенділіктің артуы ғаламдық температураның өсуімен корреляцияланады, бұл мүмкін себеп-салдарлық байланысты көрсетеді. Суасты атқылаулары, әсіресе жарылғыш сипаттағысы, күшті жылулық импульстерді тудырып, жергілікті және тіпті жаһандық жылулық тепе-теңдікті бұзуға қабілетті.

Гидротермалдық жүйелер мен жанартаулық процестер үлкен ауқымды аномалияларды, мысалы, блобтарды қалыптастырады, олар мұхит экожүйесіне және климатқа айтарлықтай әсер етеді, ал магмалық процестер Арктика теңіздерінің аномалды жылынуына себеп болады. Осылайша, мұхит тек атмосфера әсерінен ғана емес, сонымен қатар Жердің терең қабаттарындағы динамикалық процестердің әсерінен де қызады. Бұл қолданыстағы климаттық модельдерді қайта қарауды және мұхит түбіндегі геологиялық белсенділікті планетаның жалпы жылулық балансындағы маңызды компонент ретінде тереңірек зерттеуді қажет етеді.

Дегенмен, бір маңызды сұрақ туындайды: неге қазіргі уақытта Жердегі магмалық және тектоникалық процестердің қарқыны артып отыр?

## Қазіргі кезеңдегі Жердің климат өзгерісін сипаттайтын геодинамикалық модельдің қысқаша сипаттамасы

Соңғы 30 жылда Жер климаттың өзгеруінің ғана емес, сонымен қатар планетаның барлық қабаттарындағы ауытқулардың және оның геофизикалық параметрлерінің бұрын-соңды болмаған және синхронды өсуін бастан кешуде. Бұл өзгерістер экспоненциалды түрде өсуде. Ғылыми деректерді жан-жақты талдау мұның басты себебі 12 мың жыл сайын қайталанатын астрономиялық циклдер екенін көрсетеді.

Ғарыштық факторлардың әсері туралы гипотеза Күн жүйесінің басқа планеталарында және олардың серіктерінде Жермен бір мезгілде бола бастаған ұқсас өзгерістермен расталады. Мысалы, Уран<sup>356</sup>, Юпитер<sup>357</sup> және Венерада<sup>358</sup> желдің жылдамдығы артып, дауыл аймақтары кеңейді. Марста мұз қабаттары<sup>359</sup> полюстерде еріп жатыр, ал Венера<sup>360</sup> және Марста жанартаулық белсенділік<sup>361</sup> өсуде. Сонымен қатар Марста өлі планетада жер сілкінісі күшейіп жатыр<sup>362</sup>, бұл оның тереңдігінде аномалды белсенділіктің пайда болғанын көрсетеді.

Жер жүйесіндегі сыни өзгерістер 1995 жылы көріне бастады, бұл кезде Жердің айналуының күрт үдеуі, оның осінің ығысуы, солтүстік магниттік полюстің дрейфінің басталуы сияқты елеулі геофизикалық ауытқулар тіркелген (136-сурет).

<sup>356</sup>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>

<sup>357</sup>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>

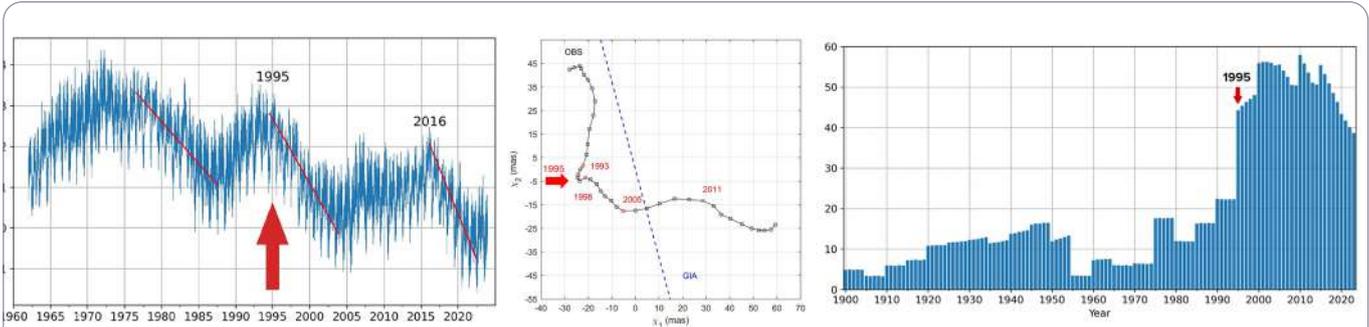
<sup>358</sup>Khatuntsev, I. V. et al. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging. *Icarus* 226, 140-158 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018>

<sup>359</sup>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>

<sup>360</sup>Encrenaz, T. et al. HDO and SO<sub>2</sub> thermal mapping on Venus - IV. Statistical analysis of the SO<sub>2</sub> plumes. *A&A* 623, A70 (2019). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833511>

<sup>361</sup>Broquet, 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>

<sup>362</sup>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>



Париж обсерваториясының Жерді бағдарлау орталығы тіркегендей, планетаның айналу жылдамдығы кенеттен және күрт артты.

Дереккөз:  
IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory. Length of Day – Earth orientation parameters. [https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plot\\_name=EOPC04\\_14\\_62-NOW\\_IAU1980-LOD&id=223](https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plot_name=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223)

Жердің айналу осіндегі аномалды өзгерістер: оның дрейфі бағытының күрт өзгеруі және жылдамдығының 17 есе артуы.

Дереккөз: 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>

Бұрын 10 км/жыл жылдамдықпен қозғалған солтүстік магниттік полюс кенет 55 км/жылға дейін үдеп, Сібірдегі Таймыр түбегіне қарай траекториясын өзгертті.

Дереккөз:  
NOAA data on the position of the North Magnetic Pole <https://www.ncei.noaa.gov/products/wandering-geomagnetic-poles>

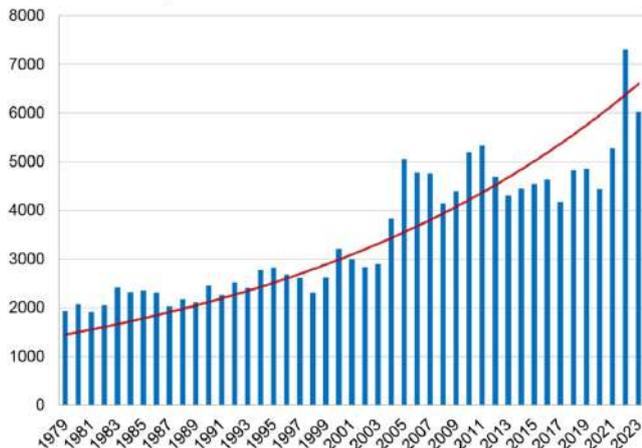
**136-сурет.** 1995 жылы Жердің геофизикалық параметрлеріндегі өзгерістер

Бұл аномалиялар Жердің өзегіндегі терең өзгерістерді көрсетеді, бұл адамзат өркениеттің бүкіл өмірінде өндіргеннен квадриллиондаған көп энергия шығындарын талап етеді. Оның себебі - Жердің өзегіне, сондай-ақ Күн жүйесіндегі басқа планеталардың өзектеріне әсер ететін сыртқы ғарыштық әсер. Бұл сыртқы әсер мантияның еруін арттырады, бұл оның жер бетіне жақындауына әкеледі. Нәтижесінде тізбекті реакция басталады: жанартаулық және сейсмикалық белсенділік артады, тереңдіктен қызу күшейеді, бүкіл әлемде табиғи апаттар көбейеді.

1995 жылдан бастап жер сілкіністерінің жиілігінің, күші мен энергиясының жоғарылауымен сипатталатын сейсмикалық белсенділіктің айтарлықтай өсуі байқалды. Бұл тенденция құрлықта да, мұхиттарда да, оның ішінде сейсмикалық белсенділік бұрын дерлік тіркелмеген аймақтарда да байқалады. Мұның бәрі өзгерістердің жаһандық ауқымын көрсетеді. Магнитудасы 5,0 және одан жоғары жер сілкіністерінің санының артуы желінің немесе датчиктердің сезімталдығының жоғарылауымен байланысты емес, шын мәнінде Жердің геодинамикасындағы өзгерістерді көрсететінін атап өткен жөн. Халықаралық сейсмологиялық орталықтың жиынтық деректері бойынша мұндай жер сілкіністерінің саны соңғы 25 жылда айтарлықтай өсті және әлі де өсуде (137-сурет).

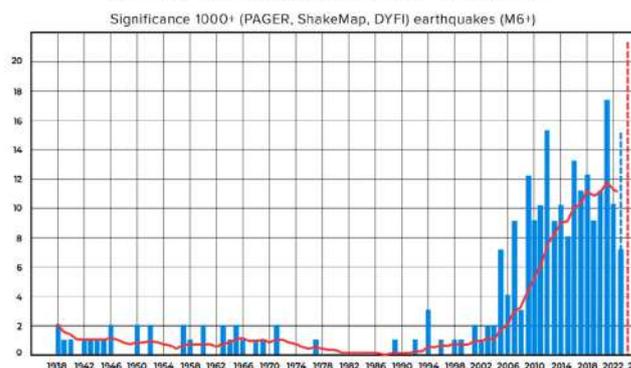
Сонымен қатар, жанартаулар, соның ішінде АҚШ-тағы Йеллоустоун супервулканы, Италиядағы Флегрей далалары<sup>363</sup> және Жаңа Зеландиядағы Таупо<sup>364</sup> сияқты супервулкандар маңында сейсмикалық белсенділік артып келеді, сондай-ақ соңғы 12 мың жылдық циклдарда атқылаған басқа жанартауларда да белсенділік байқалуда.

Earthquakes from ISC M 5+ 1979-2023



ISC дерекқорына сәйкес магнитудасы 5,0 және одан жоғары жер сілкінісі.

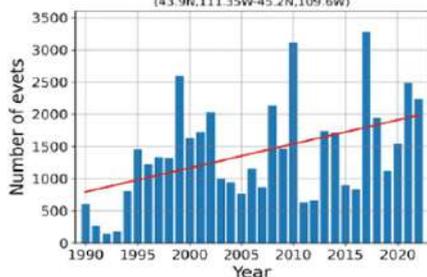
Increase in the number of significant earthquakes globally with magnitudes M6.0 and above



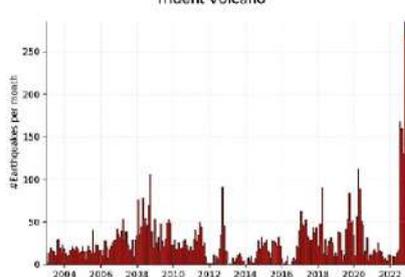
Дүниежүзіндегі 6,0 және одан жоғары магнитудалы ірі жер сілкіністерінің саны. Жер сілкіністері 1000+ маңызды оқиғалар критеріі бойынша таңдалған. Дереккөзі: АҚШ геологиялық қызметі (USGS).

Yellowstone Supervolcano

(43.9N, 111.35W-45.2N, 109.6W)

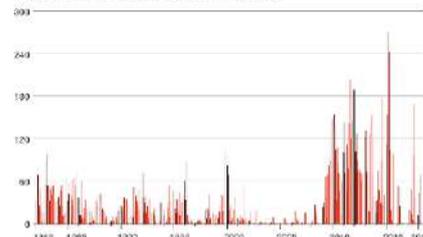


Trident Volcano

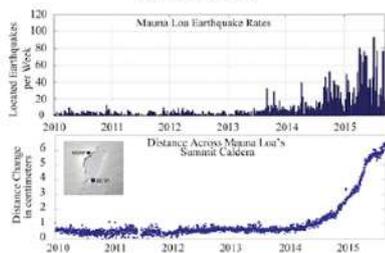


Sakurajima Volcano

Frequency of Monthly Sakurajima Eruptions



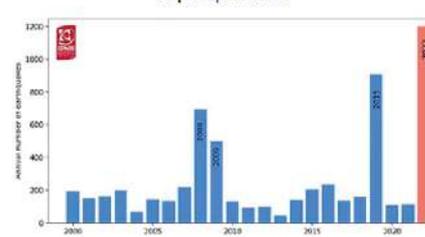
Mauna Loa Volcano



Campi Flegrei Supervolcano



Taupo Supervolcano



**137-сурет.** Жалпы планетада және жанартаулар мен супер жанартаулардың жанында сейсмикалық белсенділіктің артуы

Жыл сайын жанартаулардың атқылау күндерінің саны артып келеді және атқылған лава жиі аномалды қасиеттерге ие болады: ол өте қызған және терең мантия қабаттарынан шығатын магмаға тән ерекше химиялық құрамға ие.

<sup>363</sup>Fanpage.it. At Campi Flegrei 675 earthquakes in April 2023: it is the month with the most tremors in the last 20 years. (2023)

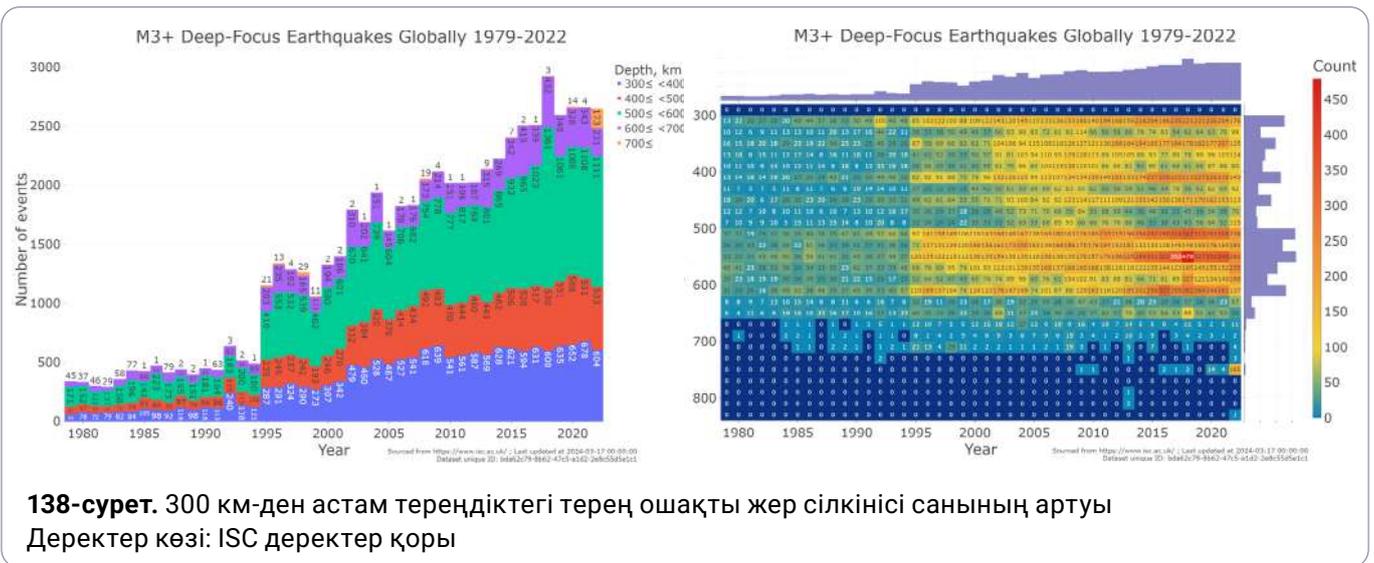
<https://www.fanpage.it/napoli/campi-flegrei-675-terremoti-aprile-2023> (Accessed May 1, 2025).

<sup>364</sup>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).

Арнайы алаңдаушылық туғызатыны — тереңдікте орын алатын жер сілкіністерінің, яғни 300 км-ден терең, кейде Жер бетінің астында 750 км-ге дейін жететін оқиғалардың санының артуы. Бұл құбылыстар Жер қыртысында емес, мантияда пайда болады, онда мантия материалы бұзылмай, пластилин сияқты деформацияланады, бұл жер сілкіністерінің табиғатын ерекше етеді. Себебі бұл жер сілкіністері экстремалды қысым мен жоғары температура жағдайында орын алады, демек, мантиядағы осы күшті жарылыстардың энергиясы Жер мантиясының ішінде бір уақытта бірнеше атом бомбасының жарылуына тең деп айтуға болады.

Сонымен қатар, терең ошақты жер сілкінісі жиі жер қыртысында күшті сейсмикалық дүмпулерді тудырады, олардың жойқын әсерін арттырады. 1995 жылдан бастап осындай тереңдіктегі жер сілкіністері санының тез өсуі байқалады (138-сурет), бұл сол кезеңде басталған басқа геодинамикалық ауытқулармен сәйкес келеді. Мантия ішіндегі осы жарылыстардың санының артуы планетаның терең қабаттарында энергияның көбеюін және мантияның қарқынды еруін көрсетеді, бұл жанартаулардың ауқымды атқылауларына әкелуі мүмкін.

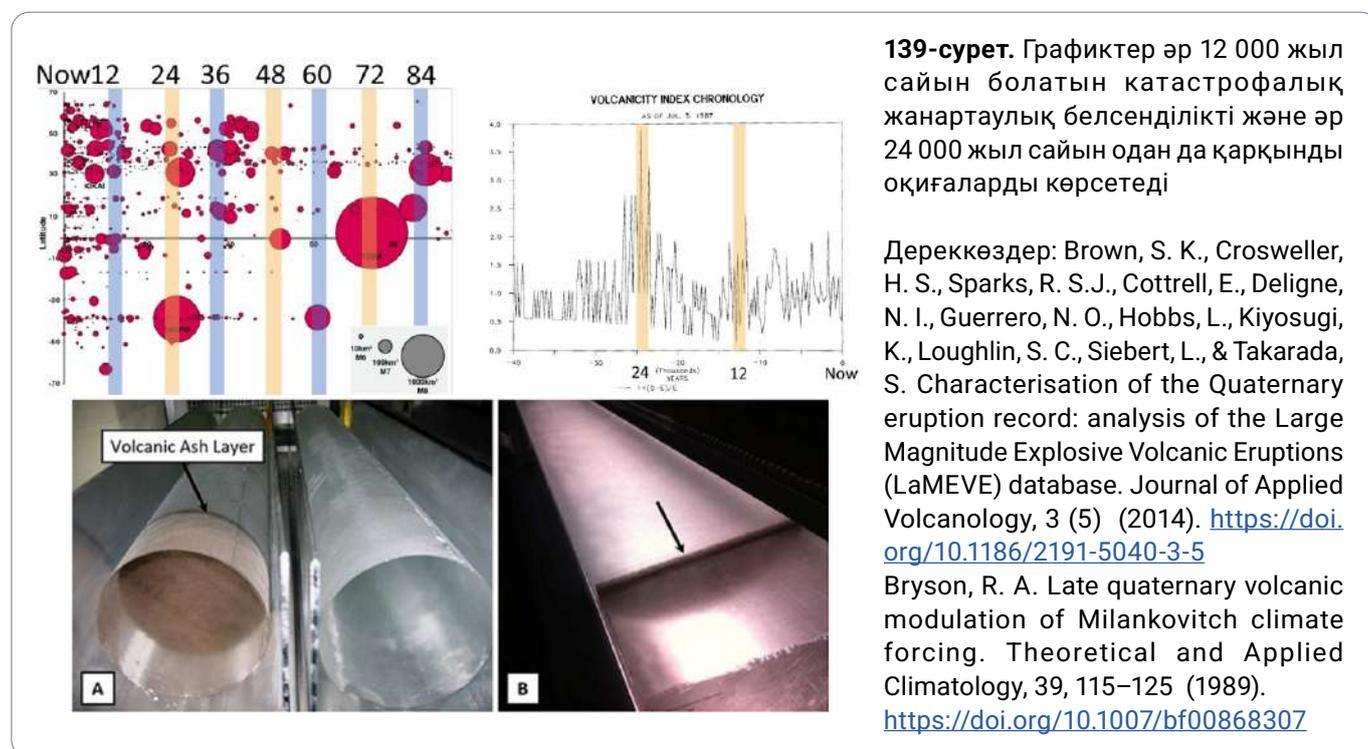


Ортадан тепкіш күштердің әсерінен мантиядағы балқыған магма 1995 жылдан бері Жер бетіне белсенді түрде көтеріліп, литосфераның іштен жылынуын әдеттегіден көбірек эрозияға түсіріп, күшейте бастады. Магманың бұл көтерілуі планетаның ішкі бөлігінен геотермиялық ағынның ұлғаюына әкеледі және Батыс Антарктида, Орталық Гренландия және Сібір мұздықтары астында магмалық плюмді белсендіреді. Нәтижесінде мұздықтар мен мәңгі тоң<sup>365, 366, 367</sup> төменнен жоғары ери бастайды.

Осылайша, мұхиттың қызуының себебі — көтеріліп келе жатқан магма, ол мұхит қыртысын ерекше қатты қыздырады, өйткені ол континенттік қыртыстан жұқа әрі осал. Геологиялық

<sup>365</sup>Rogozhina, 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>  
<sup>366</sup>Van 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>  
<sup>367</sup>Dziadek, 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>

және мұз ядроларының тарихи деректері көрсеткендей, Жер әр 12 000 жыл сайын осындай апаттық циклдерге ұшыраған. Әр екінші циклде, яғни әр 24 000 жыл сайын, планеталық апаттар әлдеқайда жойқын сипатқа ие болады (139-сурет).



Қазір Жер дәл осындай циклге енген. Алайда, осы жолы мұхиттың микро- және нанопластикпен антропогендік ластануы мантиядағы жылулық тепе-теңдігін күшейтті, бұл терең фокусқа ие жер сілкіністерінің санын көбейтуге, жаңа магмалық ошақтардың пайда болуына және планетаның жалпы тұрақсыздығына әкеледі. Сондықтан қазіргі катаклизмдер алдыңғы циклдерге қарағанда әлдеқайда тез және күшті болып тұр. Шындығында, мұхиттың ластануы Жердің осы циклмен күресе алмауының негізгі себебі болып отыр. Маңыздысы, мұхиттағы микро- және нанопластикпен ластануды шешу катаклизмдердің дамуын бәсеңдетуі мүмкін, бірақ оларды толық тоқтата алмайды.



Жер қойнауының қазіргі кезеңдегі геодинамикалық белсенуіне, 12 000 жылдық катаклизмдер цикліне және осы мәселені шешу жолдарына қатысты толығырақ ақпаратты

**«ЖЕРДЕГІ КЛИМАТТЫҚ КАТАКЛИЗМДЕРДІҢ  
ҮДЕУІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ АПАТТЫҚ  
САЛДАРЛАРЫ ТУРАЛЫ»**

атты баяндамада табуға болады

12 000 жылдық цикл аясындағы геодинамикалық өзгерістерді көпжылдық ғылым аралық зерттеулер көрсеткендей, мұхиттың бастапқы жылынуының негізгі себебі — жоғары көтерілетін магма. Ол континенттік қыртыспен салыстырғанда жұқа әрі осалырақ болып келетін мұхиттық қыртысқа ерекше күшті әсер етеді. Дүниежүзілік мұхиттың пластикпен ластануы және микро- және нанопластикалық бөлшектердің жиналуы мұхиттың термофизикалық қасиеттерін өзгертетін шешуші факторға айналууда. Бұл синтетикалық бөлшектердің мұхит суында болуы оның жылу өткізу қабілетін айтарлықтай төмендетеді, бұл мұхиттың терең қабаттары мен жер беті арасындағы жылу алмасудың табиғи процестерін бұзады, бірақ одан да маңыздысы литосфералық плиталардан жылуды кетіруді бұзады. 12 000 жылдық цикл кезіндегі геодинамикалық белсенділіктің күшеюі жағдайында мұхит суының жылуөткізгіштік қасиетінің критикалық өзгеруі тек мұхит пен атмосфераның қызуын ғана емес, сонымен қатар Жер қойнауындағы жылынуды да арттырады. Бұл мантияның еруінің күшеюіне әкеліп, соның салдарынан геодинамикалық белсенділіктің одан әрі арта түсуіне себеп болады.

Бұл Жер қойнауында артық энергияның жиналуына әкеліп, терең фокусты жер сілкіністерінің санының артуына және жаңа магмалық ошақтардың жедел қалыптасуына себеп болады. Өз кезегінде, бұл процестер планетаның тұрақсыздығын одан әрі күшейтіп, мұхиттың қызуын жеделдетеді.

Осылайша қауіпті тұйық цикл қалыптасады:

геодинамикалық белсенділік мұхитты қыздырады → қызу пластиктің ыдырауын жеделдетеді → микропластик концентрациясының артуы судың жылуөткізгіштігін төмендетеді → Жер қойнауынан жылудың шығарылуы бұзылады → геодинамикалық белсенділік пен жер сілкіністерінің жиілігі күшейеді → мұхит одан әрі қызады және соның нәтижесінде пластиктің микро- және нанобөлшектерге ыдырау процесі тағы да жеделдейді.



Бұл қазір бұрын-соңды болмаған қарқындылыққа жеткен су тасқыны, дауыл және тропикалық циклондар сияқты экстремалды ауа райы құбылыстары мен табиғи апаттардың жиілігі мен қарқындылығының артуына әкеледі.

Осылайша, мұхиттың микро- және нанопластикамен ластануы адам денсаулығына, экожүйеге, биосфера мен климат жүйесіне айтарлықтай зиян келтіріп қана қоймай, мұхиттың жылынуының артуына ықпал етеді. Бұған қоса, ол Жер енді кірген 24 000 жылдық циклдің онсыз да жойқын апаттарын күшейтеді. Бұл адамзаттың өмір сүруі үшін ғана емес, сонымен қатар Жер планетасының өзі үшін де бұрын-соңды болмаған қауіптерді тудырады.

Жаһандық экологиялық, климаттық және геодинамикалық дағдарысты шешу кешенді шараларды жедел әзірлеп, жүзеге асыру үшін әртүрлі ғылым салаларының ғалымдарының халықаралық ынтымақтастығын талап етеді. Бұл шешімдер мұхитты микро- және нанопластиктен тазартуды және олардың адам денсаулығына кері әсерін азайтуды ғана емес, сонымен қатар геодинамикалық қауіптерді жою үшін іргелі шешімдерді әзірлеуді қамтуы керек. Ұсынылған шешімдер туралы тиісті баяндамалардан оқи аласыз:



#### БАЯНДАМА

**«ЖЕРДЕГІ КЛИМАТТЫҚ  
КАТАКЛИЗМДЕРДІҢ ҮДЕУІ  
ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ АПАТТЫҚ  
САЛДАРЛАРЫ ТУРАЛЫ»**



#### БАЯНДАМА

**«СІБІРДЕГІ МАГМАЛЫҚ  
ПЛЮМНІҢ ЖАРЫП ШЫҒУ  
ҚАУПІ ЖӘНЕ ОСЫ МӘСЕЛЕНІ  
ШЕШУ ЖОЛДАРЫ»**

## ҚОРЫТЫНДЫ: НАНОПЛАСТИК — ЕЛЕМЕУ МҮМКІН ЕМЕС СЫН-ҚАТЕР

Пластикпен, әсіресе микро- және нанопластикпен ластану мәселесі жергілікті экологиялық салдардан шығып, көп қырлы жаһандық қауіп-қатерге айналды. Қазіргі зерттеулер микро- және нанопластиктің климаттық жүйеге, экожүйелердің тұрақтылығына және адам денсаулығына тікелей және жанама әсер ететінін растайды. Микропластик бөлшектері тірі организмдерге еніп, қабыну реакцияларын тудыруы, гормоналды балансқа, иммундық және репродуктивтік жүйелердің қызметіне әсер етуі мүмкін, сондай-ақ қоршаған ортаның физико-химиялық қасиеттерін — теңіз суынан бастап атмосфераға дейін — өзгертеді.

10 жылдан астам бұрын халықаралық ғылыми қоғамдастық «АЛЛАТРА» өкілдері пластикпен ластанудың климаттық аномалияларға және қоғамдық денсаулық мәселелерінің ушығуына әсерінің артуы мүмкін деген болжам айтты. Бүгінде бұл гипотезалар жетекші ғылыми мекемелер жүргізген тәуелсіз зерттеулермен расталды. Микро- және нанопластиктің экологиялық және биологиялық әсерлері туралы деректердің жылдам жиналуы климаттық үлгілердің трансформациясын, гидросферадағы өзгерістерді және тұрақты дамуға жүйелік қауіптердің артуын талдауға жаңа мүмкіндіктер ашады. Арнайы алаңдаушылық тудыратыны — тіпті микроскопиялық концентрациядағы нанопластик биосфера мен климатта каскадтық әсерлерді тудыруы мүмкін. Пластик тек қатты қалдық емес — ол өмір сүру ортасын және адам организмін трансформациялайтын белсенді агентке айналды. Оның таралуының салдары қазірдің өзінде көрініс табууда. Микро- және нанопластик мәселесі тек экология мен медицинаға ғана қатысты емес, сонымен қатар ұлттық қауіпсіздік, макроэкономика және халықаралық қатынастар контекстінде де қарастырылуы қажет.

Осы қауіп-қатерге қарсы стратегия аясында «АЛЛАТРА» Қозғалысы екі негізгі бағытты ұсынды, олар практикалық және болжамдық әлеуетке ие. Бірінші бағыт — атмосферадан су генерациялау (АСГ) технологияларын кеңінен енгізу, олар бір мезгілде тұщы су тапшылығын шешіп қана қоймай, атмосфера мен мұхиттарды микропластик бөлшектерінен тазартуға үлес қосады. Дегенмен, АСГ технологияларын жүзеге асыру мүмкін болатын қауіптерді ескеруі керек — атап айтқанда, ауадағы МНП концентрациясының артуы және оның нәтижесінде адамға ингаляциялық әсердің күшеюі. Бұл жоғары тиімді сүзу және қорғаныс жүйелерін параллельді түрде дамыту қажеттілігін туғызады.

Екінші стратегиялық бағыт, оны да «АЛЛАТРА» ұсынған, нанопластиктің электростатикалық зарядын бейтараптандыру немесе экрандау әдістерін әзірлеу болып табылады — бұл оның уыттылығының негізгі факторларының бірі. Зарядталған нанопластик бөлшектері жасушалық мембраналармен, ақуыздармен және генетикалық материалмен белсенді әрекеттесіп, тұрақты молекулалық байланыстар түзеді. Мұндай бөлшектер гематоэнцефалиялық қорғаныс сияқты биологиялық тосқауылдардан өтіп, тіндерде жиналып, жасушалық каскадтық

бұзылуларды тудырады — тотығу стрессі мен апоптозға дейін. Микро- және нанопластиктің электростатикалық белсенділігін төмендету оның зиянды әсерін айтарлықтай азайтып, организмде жиналуын баяулатуы мүмкін.

Баяндама авторларының бағалауы бойынша, электростатикалық зарядты экрандау немесе бейтараптандыру МНП-тің потенциалды қаупін кемінде 50% төмендетуге қабілетті, бұл зерттеу бағытын критикалық маңызды етеді. Бұл адам организмнен МНП-ті анықтау, алдын алу және шығару, сондай-ақ биосфераны тазарту бойынша кешенді стратегияларды әзірлеуге қажетті уақытша интервалды қамтамасыз етеді. Осы контексте биофизика, нанотехнологиялар және молекулалық токсикология саласындағы зерттеулер ерекше мәнге ие болады.

Осылайша, МНП қаупіне тиімді әрекет ету үшін жеке шаралар жеткіліксіз, қажеті — жаһандық және ғылым аралық тәсіл. Ғылыми зерттеулер, технологиялық шешімдер, нормативтік реттеу және халықаралық ынтымақтастық саласындағы күш-жігерді үйлестіру қажет. Пластикпен ластануды тек экологиялық мәселе ретінде емес, денсаулықты, қауіпсіздікті, ресурстық қамтамасыздықты және әлеуметтік инфрақұрылымның тұрақтылығын қамтитын жүйелік сынақ ретінде қарастыру керек.

Ағымдағы баяндаманың бірегейлігі — физика, химия, биология және медицинадан алынған деректерді біріктіретін кешенді ғылым аралық тәсілде. Мұндай синтез МНП мәселесін өркениеттік сын-қатер ретінде қарастыруға мүмкіндік береді, ол бірнеше деңгейде шешім қабылдауды талап етеді. Қазіргі кезде әлемдік қауымдастық бұл қауіптің нақты ауқымын біртіндеп түсіне бастады. Универсалды шешім жоқ болса да, оны іздеуге ұмтылу және ғылыми ынтымақтастықты дамыту дағдарыстан шығу жолын анықтай алады. Негізгі сын-қатер — шешімнің жоқтығында емес, оны сыни сәтке жетпей тұрып таба білу қабілетінде.

## Дереккөздер

- 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., Crosweller, 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.jpuro.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](https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/role-ocean-tempering-global-warming). '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](https://climatereanalyzer.org), Climate Change Institute, University of Maine, Dataset. NOAA OISST. [https://climatereanalyzer.org/clim/sst\\_daily/?dm\\_id=world2](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 SO<sub>2</sub> thermal mapping on Venus - IV. Statistical analysis of the SO<sub>2</sub> 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  $\geq 10 \mu\text{m}$  in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution. *Marine Pollution Bulletin* 100, 70–81 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.027>

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

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

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

Eunomia. Plastics in the Marine Environment. <https://eunomia.eco/reports/plastics-in-the-marine-environment> (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](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](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](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](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](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](http://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](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. Lett.* 9, 1–5 (2018). <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>

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

Polyak, B. G., & Khutorskoy, M. D. (2018). Heat flow from the Earth's interior as an indicator of deep-seated processes. *Georesources*, 20(4), Part 2, 366–376. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376>

*Phys.org*. Quantum effects in proteins: How tiny particles coordinate energy transfer inside cells. (2025) <https://phys.org/news/2025-05-quantum-effects-proteins-tiny-particles.html> (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., Ingrassia, 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., Vollaro, D. & Molinari, J. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. *Science* 346, 851–854 (2014). <https://doi.org/10.1126/science.1259100>
- Rosenthal, Y. et al. Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science* 342, 617–621 (2013). <https://doi.org/10.1126/science.1240837>
- Rosenthal, Y., Linsley, B. K., & Oppo, D. W. (2013). Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. *Science*, 342(6158), 617–621. <https://doi.org/10.1126/science.1240837>; Oppo, D. (2013, October 31). Is Global Heating Hiding Out in the Oceans? <https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130> (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 Bhuvaneshwari, 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.snews.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/swbj/467/503/content/post\\_550539.html](https://www.shanwei.gov.cn/swbj/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](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-PLASTICSOUP.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  $\alpha$ -Helicity, Compromises Substrate Binding, and Creates Binding Pockets in a Model Globular Protein. *J. Am. Chem. Soc.* 146, 12766–12777 (2024). <https://doi.org/10.1021/jacs.4c02934>

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

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

Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science* 351, 1196–1199 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

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

- Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. *Sustainability* 15, 13252 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151713252>
- Zaheer, J. et al. Pre/post-natal exposure to microplastic as a potential risk factor for autism spectrum disorder. *Environment International* 161, 107121 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107121>
- Zajac, M. et al. Exposure to polystyrene nanoparticles leads to changes in the zeta potential of bacterial cells. *Sci Rep* 13, 9552 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36603-5>
- Zeidan, J. et al. Global prevalence of autism: A systematic review update. *Autism Research* 15, 778–790 (2022). <https://doi.org/10.1002/aur.2696>
- Zhang, J., Wang, L., Trasande, L. & Kannan, K. Occurrence of Polyethylene Terephthalate and Polycarbonate Microplastics in Infant and Adult Feces. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 8, 989–994 (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00559>
- Zhang, W. et al. The mechanism for adsorption of Cr(VI) ions by PE microplastics in ternary system of natural water environment. *Environmental Pollution* 257, 113440 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113440>
- Zhang, Y. et al. Selective bioaccumulation of polystyrene nanoplastics in fetal rat brain and damage to myelin development. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 278, 116393 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116393>
- Zhang, Y., Wang, J., Yang, H. & Guan, Y. The potential mechanisms underlying phthalate-induced hypospadias: a systematic review of rodent model studies. *Front. Endocrinol.* 15, (2024). <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1490011>
- Zhang, Y.-W. et al. Bridging relevance between microplastics, human health and bone metabolism: Emerging threats and research directions. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 6, 422–435 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.08.006>
- Zhong, Y. et al. Global, regional and national burdens of bipolar disorders in adolescents and young adults: a trend analysis from 1990 to 2019. *Gen Psych* 37, e101255 (2024). <https://doi.org/10.1136/gpsych-2023-101255>
- Zhu, R. et al. A global estimate of multiecosystem photosynthesis losses under microplastic pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122, e2423957122 (2025). <https://doi.org/10.1073/pnas.2423957122>
- Zuin, M. et al. Trends in Sudden Cardiac Death Among Adults Aged 25 to 44 Years in the United States: An Analysis of 2 Large US Databases. *JAHA* 14, e035722 (2025). <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.035722>