ДОКЛАД

НАНОПЛАСТИК В БИОСФЕРЕ

ОТ МОЛЕКУЛЯРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДО ПЛАНЕТАРНОГО КРИЗИСА

ДОКЛАД

НАНОПЛАСТИК В БИОСФЕРЕ

ОТ МОЛЕКУЛЯРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДО ПЛАНЕТАРНОГО КРИЗИСА

АВТОРЫ

FREEDOM DEMOCRACY
ALLATRA

Международное общественное движение «АЛЛАТРА»

При участии:

UNIVERSIDAD CATÓLICA BOLIVIANA

Боливийский католический университет Сан-Пабло

CREATIVE SOCIETY

Международный проект «Созидательное общество»

СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИЯ

«Если бы Земля вела дневник, о последних 100 годах она бы написала чёрными чернилами: “Эпоха пластика”». От микроскопических частиц, проникающих в клетки живых организмов, до гигантских мусорных островов в океане — пластик стал неотъемлемой частью геологической летописи. Но какой ценой?

Ежегодно в мире производится более 400 миллионов тонн пластиковых отходов, из которых около 11 миллионов тонн попадают в Мировой океан. В океане уже накоплено более 200 миллионов тонн пластика. Анализ образцов поверхностных вод выявил, что масса пластика превышает массу зоопланктона в 6 раз. По прогнозам, к 2050 году масса пластика в океане превысит массу рыбы.

Пластик разлагается на протяжении сотен или даже тысяч лет, но под воздействием волн, солёной воды и ультрафиолетовых лучей он распадается на мелкие частицы — микро- и нанопластик. Они переносятся на тысячи километров морским воздухом и осадками, пересекая страны, континенты и океаны, накапливаются в лесах и присутствуют в пище и воде. Микропластик проник даже в отдалённые уголки планеты, такие как Марианская впадина и вершина Эвереста.

В данном докладе представлена глубокая аналитическая оценка воздействия пластикового загрязнения на окружающую среду, здоровье человека и устойчивость жизненно важных систем общества. Доклад исследует воздействие микро- и нанопластика, обладающего статическим зарядом и содержащего токсичные химические соединения, на экосистемы. Особый акцент сделан на его роли в закислении океана, дестабилизации пищевых цепей и угрозе биоразнообразию. Выдвигается гипотеза о влиянии микро- и нанопластика на изменение свойств воды, вследствие чего происходит ускоренный нагрев океана и усугубляются природные катаклизмы.

Одной из наиболее актуальных и тревожных проблем, рассматриваемых в докладе, является воздействие микро- и нанопластика (МНП) на здоровье человека. Пластиковые частицы, в силу своих малых размеров, способны преодолевать биологические барьеры, вызывая окислительный стресс, повреждение ДНК, воспалительные реакции и нарушения клеточных функций. Особое внимание уделяется потенциальной корреляции между воздействием МНП и увеличением распространённости нейродегенеративных и нейропсихических заболеваний. В докладе показано, что воздействие МНП на развивающийся организм в пренатальный и постнатальный периоды приводит к нарушениям когнитивных функций и психического здоровья, что представляет серьёзную проблему для будущего человечества.

Рост числа заболеваний, вызванных воздействием микро- и нанопластика, уже сегодня заметно ухудшает качество жизни населения, особенно в регионах с высоким уровнем пластикового загрязнения.

В докладе обозначены регионы, которые уже сейчас относятся к зонам повышенной опасности, а также те, которые пока остаются относительно безопасными. Усугубление ситуации в сочетании с отсутствием эффективных методов защиты от этого воздействия может вынудить людей покидать загрязнённые территории в поисках более безопасных условий для жизни. Это создаст предпосылки для неконтролируемой массовой миграции, что, в свою очередь, может усилить социальную напряжённость, повысить нагрузку на городские инфраструктуры и дестабилизировать экономику.

Таким образом, экологическая проблема пластикового загрязнения постепенно перерастёт в макроэкономическую и геополитическую.

Доклад акцентирует внимание на необходимости решения проблемы микропластика, предлагая новый взгляд на его распространение, воздействие и последствия. Уникальность работы заключается в междисциплинарном подходе, объединяющем данные о физических, химических и биологических аспектах пластикового загрязнения. Это делает доклад актуальным для исследователей и учёных широкого круга дисциплин, заинтересованных в разработке устойчивых решений для безопасного будущего планеты и человечества.

ПОСЛЕДСТВИЯ ПЛАСТИКОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ: МИКРО- И НАНОПЛАСТИК (МНП) КАК НОВЫЙ ФАКТОР ПЛАНЕТАРНОГО КРИЗИСА

Пластик стал неотъемлемой частью современной жизни. Упаковка, посуда, одежда, обувь, предметы гигиены, медицинские изделия, транспорт и средства связи — большинство предметов, окружающих человека, изготовлены из пластика. Однако он существует не только в виде крупных объектов, но также в форме микроскопических частиц, которые выделяются из этих изделий, — микро- и нанопластика. Микропластик — это частицы пластика размером менее 5 мм, которые могут быть различимы невооружённым глазом. Нанопластик, напротив, имеет размеры менее 1 мкм (одной миллионной метра), из-за чего большинство таких частиц невозможно увидеть даже под стандартным микроскопом.

Пластиковые материалы представлены множеством типов, но все они основаны на полимерах — природных или синтетических соединениях, состоящих из крупных молекул, связанных между собой. Благодаря уникальным химическим свойствам полимеры отличаются высокой долговечностью и устойчивостью в окружающей среде.

Пластиковые материалы включают разнообразные типы, но все они основаны на полимерах — природных или синтетических соединениях, состоящих из крупных молекул, связанных между собой. Благодаря уникальным химическим свойствам полимеры отличаются высокой долговечностью и устойчивостью в окружающей среде.

Таким образом, пластик, благодаря своей прочности, универсальности и низкой себестоимости, стал основным материалом для массового производства, включая одноразовые предметы[1]. Но неправильное обращение с пластиковыми отходами сделало пластик наиболее значительным по объёму загрязнителем окружающей среды в мире.

Количественные оценки и тенденции глобального производства пластиковых отходов

С 1950-х годов в мире было произведено около 9,2 млрд тонн пластика. Из них в настоящее время используются 2,9 млрд тонн, включая 2,7 млрд тонн первичного пластика и около 0,2 млрд тонн переработанного материала. 5,3 млрд тонн оказалось на свалках, а 1 млрд тонн было сожжено. Также известно, что 1,75 - 2,5 млрд тонн считаются «неправильно управляемыми», что означает, что они могут неконтролируемо попадать в окружающую среду (рис. 1).

[1]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

На сегодняшний день в пластиковые изделия было добавлено около 640 млн тонн дополнительных химикатов[2]. По данным UNEP[3], ежегодно в мире производится более 400 млн тонн пластиковых отходов.

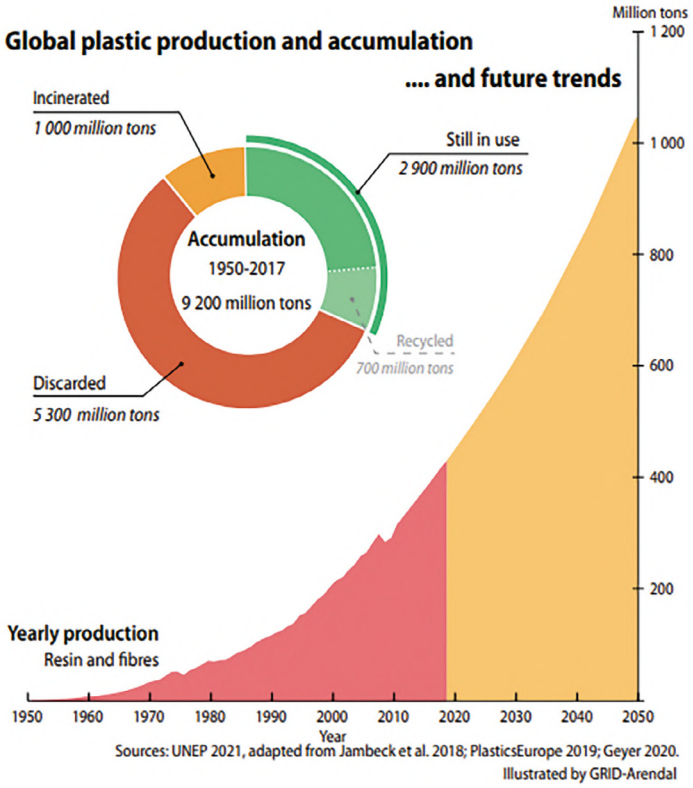


Рисунок 1. Мировое производство пластмасс, накопление и будущие тенденции

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

Всего лишь 9 % пластиковых отходов перерабатывается, 19 % — сжигается, а всё остальное остаётся в окружающей среде, включая свалки и океаны[4] (рис. 2).

Доля методов утилизации	По всему миру, 2023 г.
Переработка	9%
Сжигание	19%
Неправильная утилизация	22%
Захоронение	49%

Рисунок 2. Ежегодные пластиковые отходы по методу утилизации, 2000–2023 гг.
Источник данных: Our World in Data https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate

Каждый год в Мировой океан поступает около 11 млн тонн пластика[5]. Это эквивалентно более чем одному мусоровозу с пластиком, сбрасываемому в океан каждую минуту.

[2]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
[3]United Nations Environment Programme (UNEP) Beat plastic pollution https://www.unep.org/interactives/beat-plastic-pollution (accessed: 1 May 2025)
[4]How Much of the World's Plastic Waste Actually Gets Recycled? https://www.visualcapitalist.com/how-much-plastic-gets-recycled
[5]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

В настоящее время в океанах уже накоплено более 200 млн тонн крупных пластиковых отходов и 35 540 тонн микропластика[6]. Годовой объём пластиковых отходов, выбрасываемых в окружающую среду с наземных источников, оценивается по-разному, в зависимости от применяемых методов анализа. При обычном сценарии и отсутствии необходимых мер количество пластиковых отходов, попадающих в водные экосистемы, может почти утроиться: примерно с 9–14 млн тонн в год в 2016 году до 23–37 млн тонн в год к 2040 году.

Согласно другому методу анализа, количество отходов может увеличиться более чем в два раза: примерно с 19–23 млн тонн в год в 2016 году до 53 миллионов тонн в год к 2030 году[7].

Согласно исследованиям, при сохранении существующих тенденций, к 2050 году пластика в океане будет порядка 12 000 млн тонн[8], что по весу будет сопоставимо со всей массой рыбы в океане (порядка 10 000 млн тонн[9]).

В зависимости от вида пластик разлагается в диапазоне 100–1 000 лет (рис. 3). В океане пластик разлагается значительно медленнее, а в тёмных и холодных условиях морских глубин скорость его деградации снижается ещё больше[10].

Рисунок 3. Приблизительные сроки разложения некоторых видов пластикового мусора, выброшенного в море

[6]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)
[7]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
[8]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
[9]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
[10]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

За исключением материалов, которые были сожжены, все обычные пластики, которые когда-либо попадали в окружающую среду, до сих пор остаются неразложившимися либо в виде целых изделий, либо в виде фрагментов[11]. Этот мусор практически никуда не исчезает, а продолжает накапливаться. Подобная ситуация может быть сравнена с мусорным контейнером, в который постоянно добавляют отходы, но никогда не вывозят. Вопрос о том, что произойдёт с таким контейнером через месяц, иллюстрирует масштаб проблемы глобального накопления пластикового мусора.

Великий тихоокеанский мусорный континент

Пластиковый мусор, находящийся в толще воды и на её поверхности, захватывается океаническими течениями, переносится в центральные регионы океана и формирует обширные скопления, называемые «островами».

«Великий тихоокеанский мусорный континент» представляет собой крупнейшую концентрацию пластика на планете, демонстрирующую устойчивый рост (рис. 4). Мусорный континент охватывает обширную территорию между Северной Америкой и Японией. Наблюдения показывают, что в 2018 году её площадь составляла приблизительно 1,6 млн квадратных километров[12], хотя эта величина подвержена вариациям.

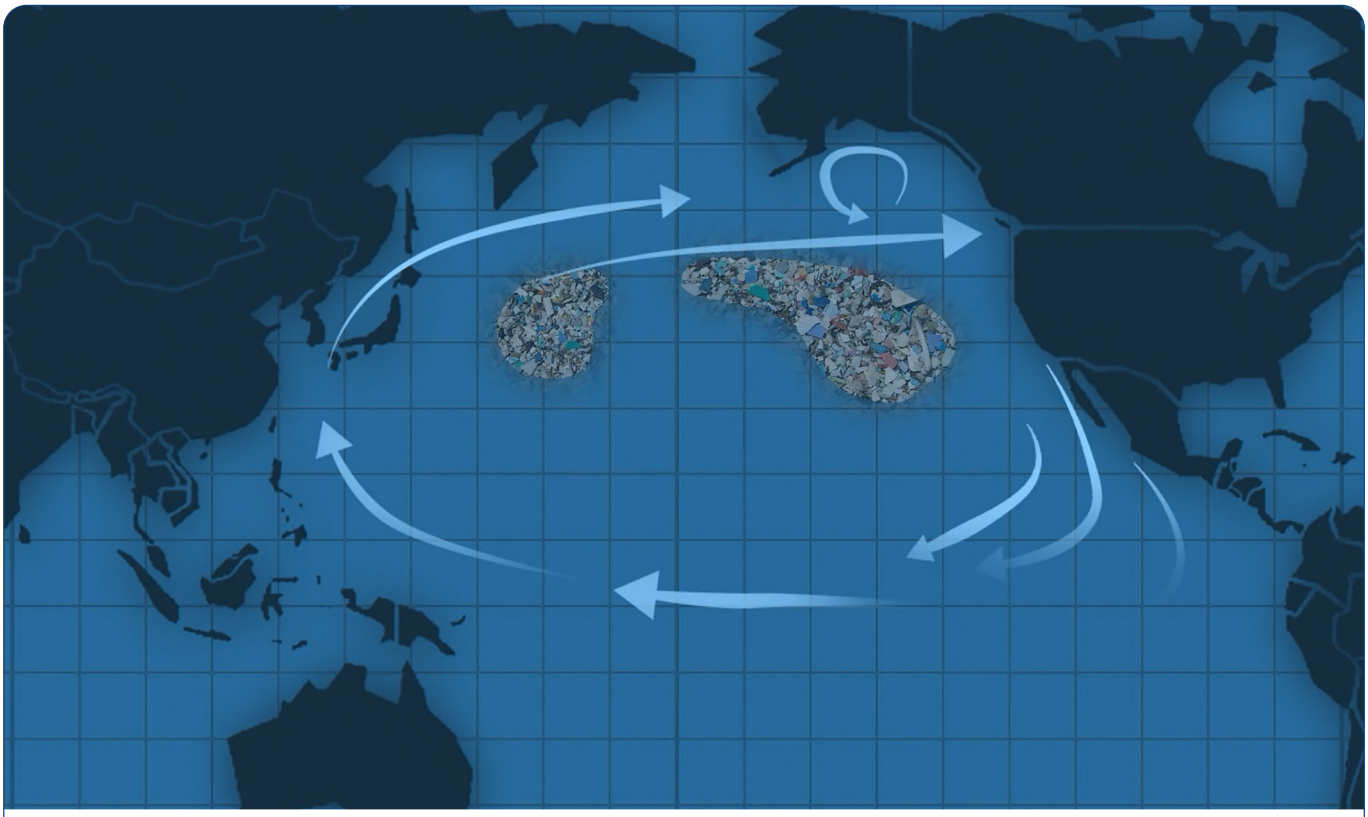


Рисунок 4. Схематический процесс образования мусорного пятна в Тихом океане

[11]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

[12]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

Исследования показывают, что до 80 %[13] содержимого мусорных пятен **составляют** именно пластиковые отходы[14]. В мусорном пятне содержится не менее 80 000 тонн мусора[15]. Однако это лишь видимая часть проблемы. До 94 % пластика, попадающего в океан, оказывается на морском дне[16]. Именно там может скрываться и накапливаться значительное количество мусора.

Точный объём Большого тихоокеанского мусорного пятна остаётся неизвестным, поскольку Северо-Тихоокеанский субтропический круговорот обладает слишком большими размерами для всестороннего научного исследования при текущем уровне технологических возможностей.

Динамика накопления пластика в океане

Инструментальные измерения демонстрируют экспоненциальное увеличение объёмов Большого мусорного пятна. В период с 2015 по 2022 год средняя масса пластиковых отходов в этом районе возросла в 5 раз[17]. Особую обеспокоенность вызывает тот факт, что количество мелких фрагментов пластика за тот же период увеличилось в 10 раз, что свидетельствует об интенсивном процессе фрагментации крупных пластиковых объектов.

Большое мусорное пятно фактически формирует седьмой «континент» нашей планеты. Однако важно отметить, что данное явление не является уникальным. В настоящее время научное сообщество идентифицировало 5 крупных скоплений мусора в Мировом океане[18]: два — в Атлантическом океане, два — в Тихом океане и одно — в Индийском океане[19] (рис. 5).

[13]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

[14]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

[15]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

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

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

[18]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

[19]Garbage Patches. Marine Debris Program. NOAAA https://marinedebris.noaa.gov/discover-marine-debris/garbage-patches

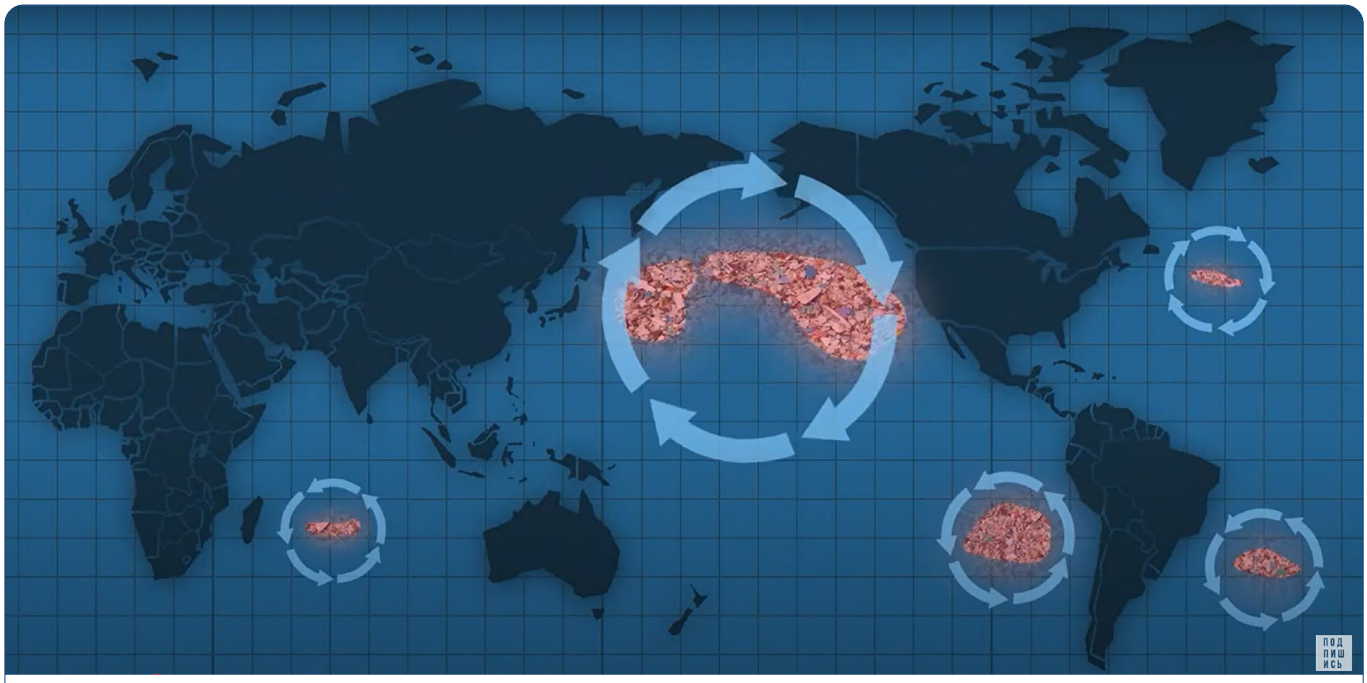


Рисунок 5. Схематическое изображение пяти крупных скоплений мусора в Мировом океане: два — в Атлантическом океане, два — в Тихом океане и одно — в Индийском океане. В океанах циркулируют миллионы тонн пластика и других отходов антропогенного происхождения. Мусорные пятна растут в катастрофической прогрессии.

Процессы формирования микро- и наночастиц пластика

Пластиковый мусор очень устойчив к биоразложению, но под воздействием волн, солёной воды и солнечного излучения он распадается на мелкие частицы — микро- и нанопластик[20], которые могут быть невидимы невооружённым глазом. Эти частицы сохраняют свою полимерную структуру[21], а процесс распада продолжается вплоть до наноуровня (рис. 6–7). В результате, преодолев естественные механизмы деградации, пластиковые отходы становятся постоянным компонентом экосистемы планеты.

Кроме того, микро- и нанопластик содержит опасные химические вещества, которые добавляются в процессе производства пластика.

> *«Пластик содержит около 16 000 химических веществ. Известно, что более 4 200 из них устойчивы в окружающей среде, накапливаются в живых организмах, переносятся на большие расстояния или представляют потенциальную опасность»,* — говорит профессор Анника Янке, химик-эколог Центра Гельмгольца по исследованию окружающей среды (UFZ)[22].

[20]Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023). https://doi.org/10.3390/su151713252
[21]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
[22]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

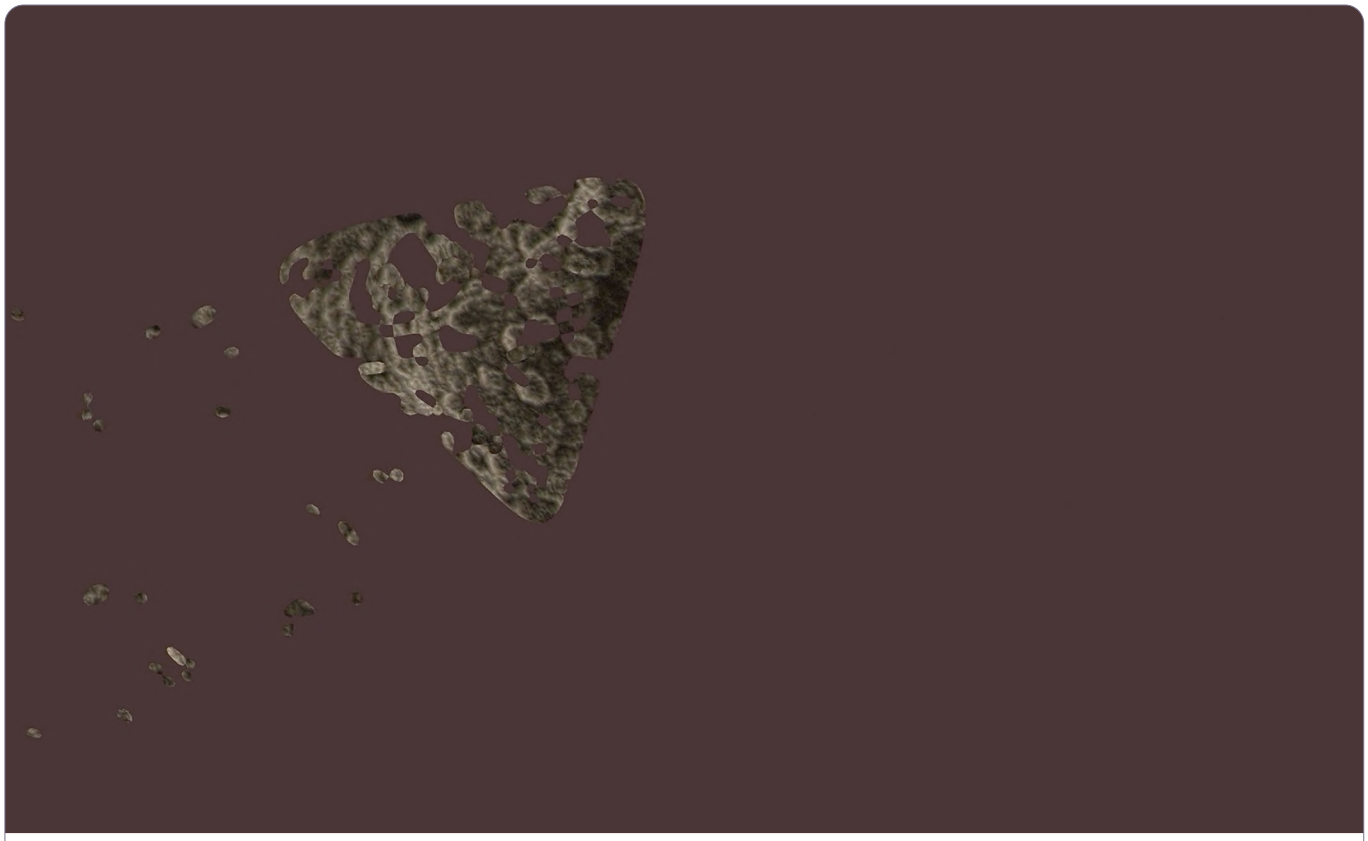


Рисунок 6. Процесс фрагментации частиц пластика до наноуровня с сохранением полимерной структуры

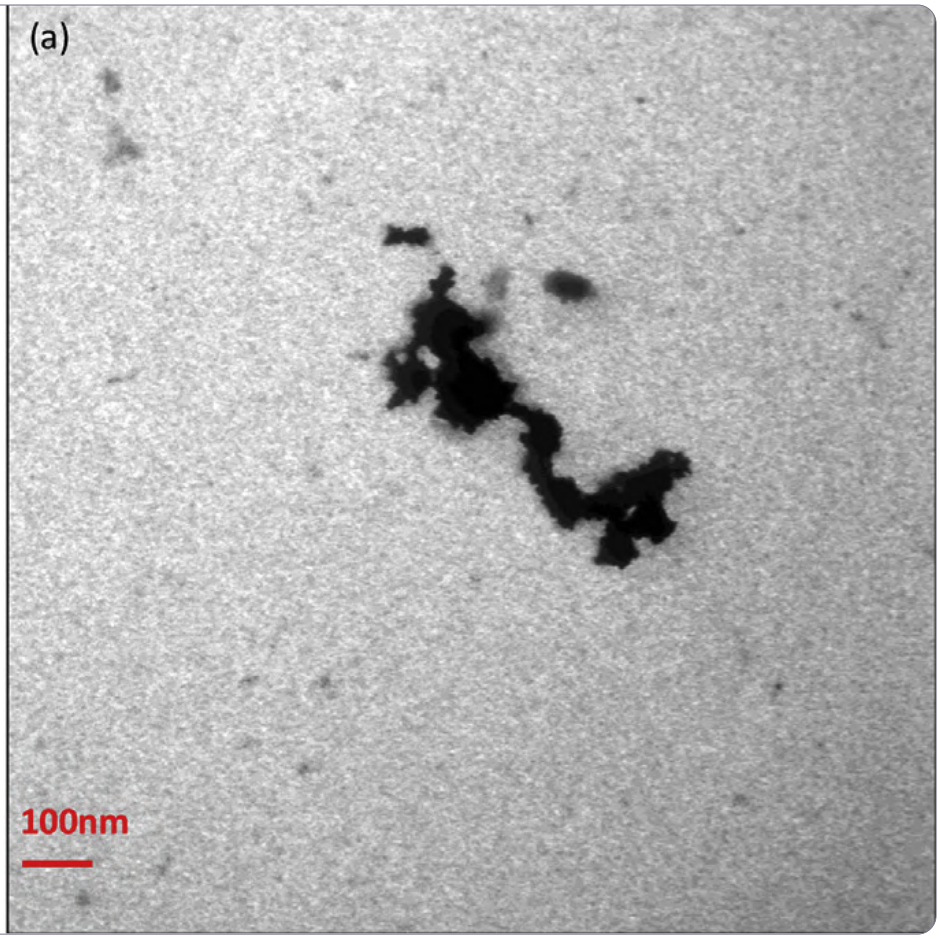


Рисунок 7. Просвечивающая электронная микроскопия экологически значимого нанопластика полиэтилена, разложившегося под воздействием УФ-излучения из состаренного микропластика, отобранного в северной части Атлантического океана

Источник: 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

Распространение микро- и нанопластика в океане

Наибольшая концентрация пластика наблюдается в зонах мусорных пятен. Эти океанические свалки действуют как своеобразные фабрики, где происходит непрерывное образование микро- и нанопластика. Подобно тому, как вирус распространяется по организму через кровь, микропластик переносится океаническими течениями по всему Мировому океану, что подчёркивает глобальный масштаб этой проблемы.

Несмотря на технические сложности обнаружения микропластика, которые затрудняют точное определение его количества в океанах, теоретические расчёты позволяют оценить масштабы этой проблемы.

Практически во всех пробах океанической воды обнаруживается микропластик, а в некоторых регионах его концентрация в десятки раз выше среднего уровня.

Океанические круговороты способствуют глобальному распространению микропластика, включая даже удалённые регионы, такие как Арктика. Исследования ледяных кернов показали, что уровень загрязнения микропластиком в Северном Ледовитом океане в 100 раз выше, чем в водах Атлантики, к северу от Шотландии, или в водах Северо-Тихоокеанского субтропического круговорота[23]. Это свидетельствует о масштабности проблемы и её трансграничном характере.

Большинство глобальных исследований, посвящённых загрязнению морской среды пластиком, сосредоточены на поверхностном слое океана. Согласно оценкам, в 2019 году в поверхностном слое океана находилось от 82 до 358 трлн пластиковых частиц[24].

Однако появляется всё больше доказательств того, что в глубоководных зонах и донных отложениях количество частиц микропластика достигает неисчислимых триллионов[25].

Лёгкий пластик плавает на поверхности, тогда как более плотный или колонизированный биотой опускается на морское дно[26]. Подсчёты показывают, что около 50 % пластика из городских отходов имеют плотность выше, чем морская вода, что способствует его быстрому погружению. На дне он распространяется глубоководными течениями, накапливаясь в желобах и впадинах. Микропластик был обнаружен даже в самой глубокой точке океана — на дне Марианской впадины[27] (рис. 8–9).

---

[23]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

[24]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

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

[26]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

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

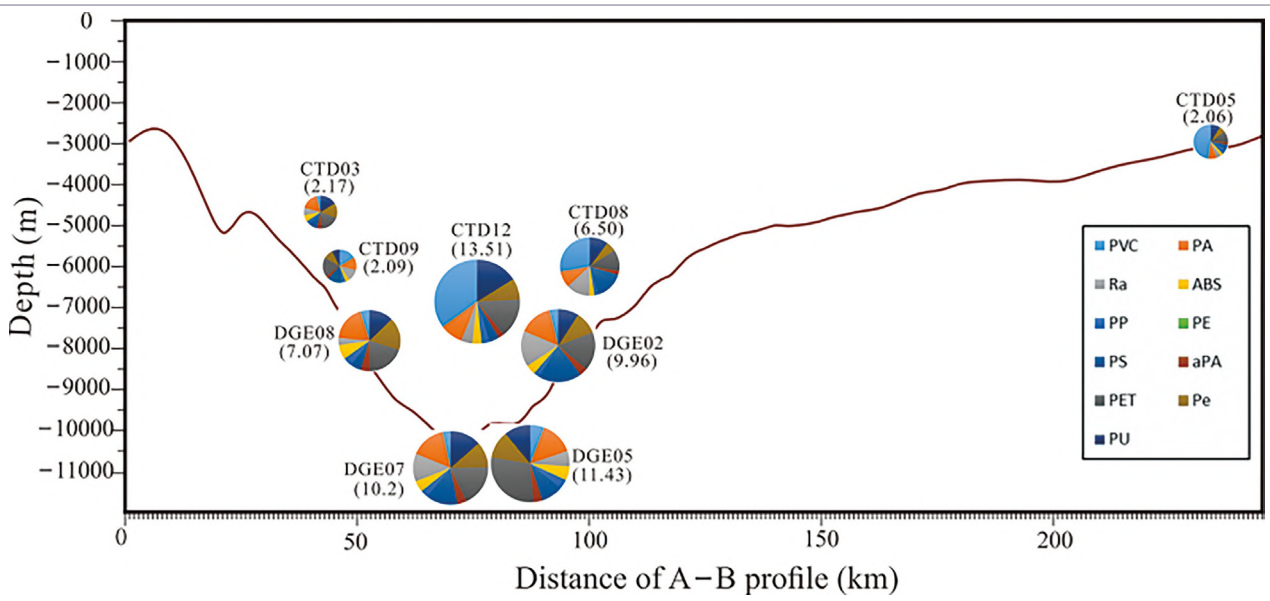


Рисунок 8. Профиль распространённости и состава микропластика в образцах воды из Марианской впадины. Круговые диаграммы представляют составы микропластика, а числа в скобках — распространённость микропластика в единицах штук на литр. PVC-polyvinyl chloride, PA-polyamide, Ra-rayon, ABS-acrylonitrile butadiene styrene, PP-polypropylene, PE-polyethylene, PS-polystyrene, aPA-aromatic polyamide, PET-polyethylene terephthalate, Pe-polyester, PU-polyurethane. The X-axis corresponds to the crossline from point A (12 °N, 142.5 °E) to point B (9.8 °N, 141.43 °E).

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

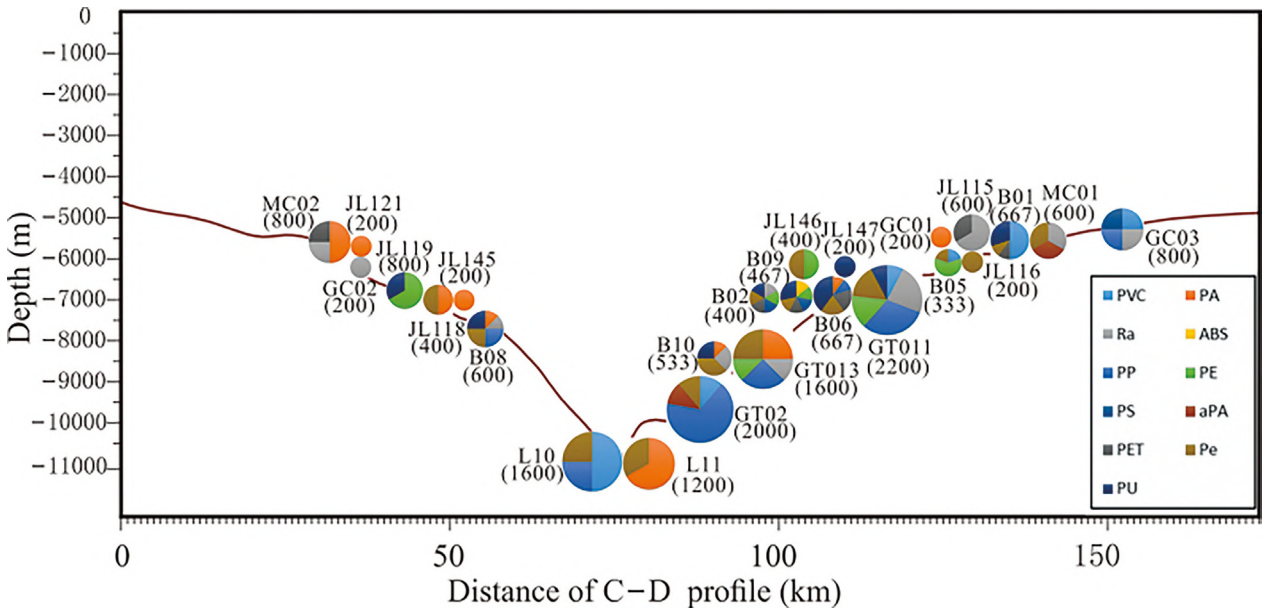


Рисунок 9. Профиль распространённости и состава микропластика в образцах отложений из Марианской впадины. Круговые диаграммы представляют составы микропластика, а числа в скобках — распространённость микропластика в единицах штук на литр. PVC-polyvinyl chloride, PA-polyamide, Ra-rayon, ABS-acrylonitrile butadiene styrene, PP-polypropylene, PE-polyethylene, PS-polystyrene, aPA-aromatic polyamide, PET-polyethylene terephthalate, Pe-polyester, PU-polyurethane. The X-axis corresponds to the crossline from point C (12 °N, 141.9 °E) to point D (10.5 °N, 141.3 °E).

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

Фактически основным местом накопления микропластика является не поверхность океана, а глубокое морское дно. Постепенно всё океаническое дно покрывается слоем пластика. Однако данные о загрязнении океана микропластиком, вероятно, занижены, и реальная ситуация может быть значительно хуже. Как отмечает Мелани Бергманн, биолог из Института Альфреда Вегенера в Германии: *«Не у всех есть доступ к сложным и дорогостоящим приборам для отбора проб»*. По её оценкам, до 90 % морских микропластиковых частиц могут оставаться незамеченными при использовании стандартных методов отбора проб, поскольку их размеры слишком малы для обнаружения[28] (рис. 10).

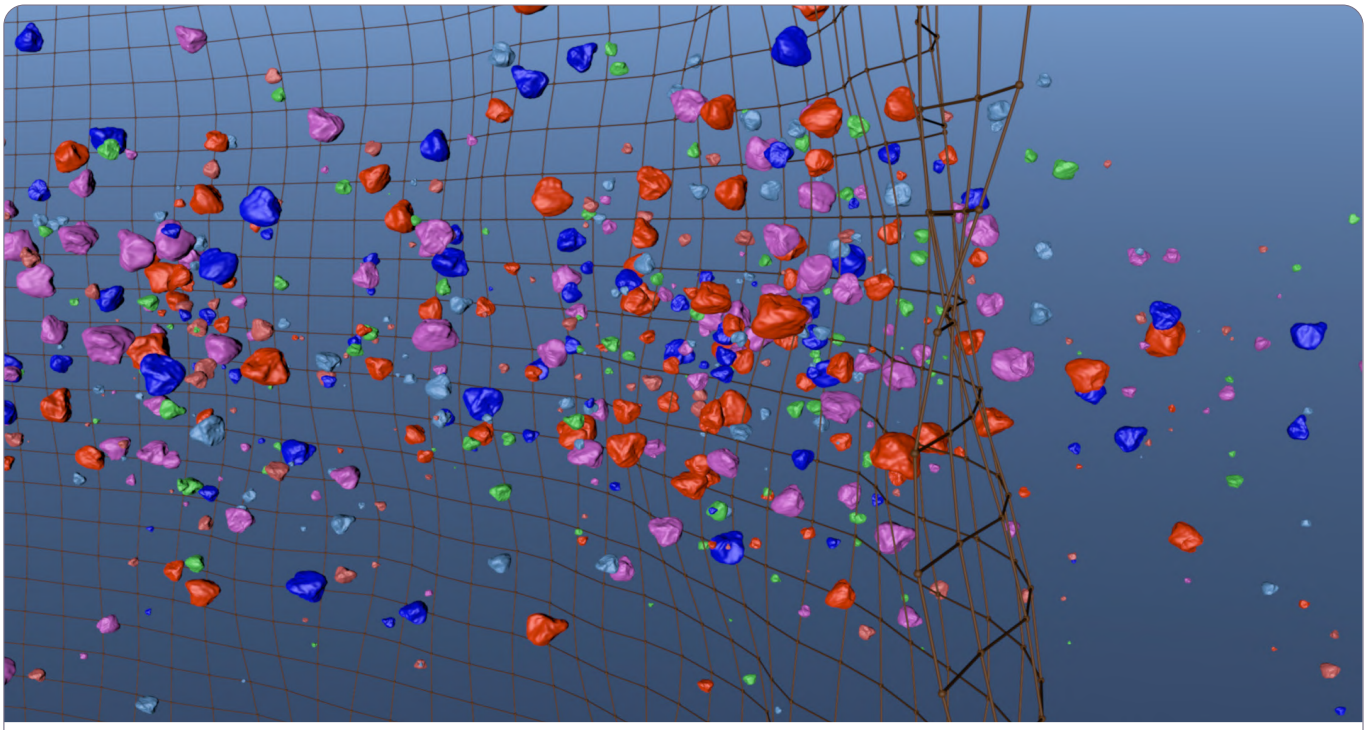


Рисунок 10. Схематическое изображение несовершенных аналитических методов улавливания микро- и нанопластика

[28]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

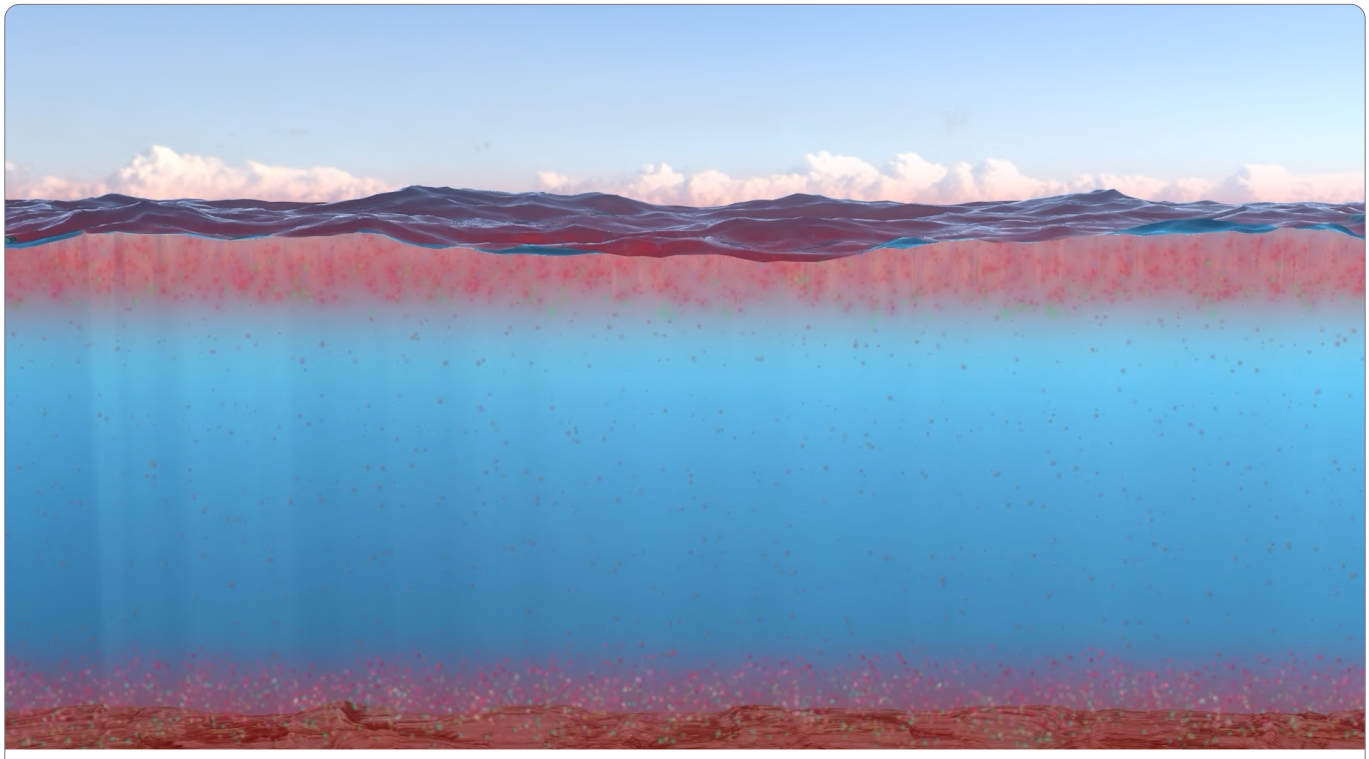


Рисунок 11. Схематическое изображение поверхностного и придонного слоёв загрязнения микро- и нанопластиком

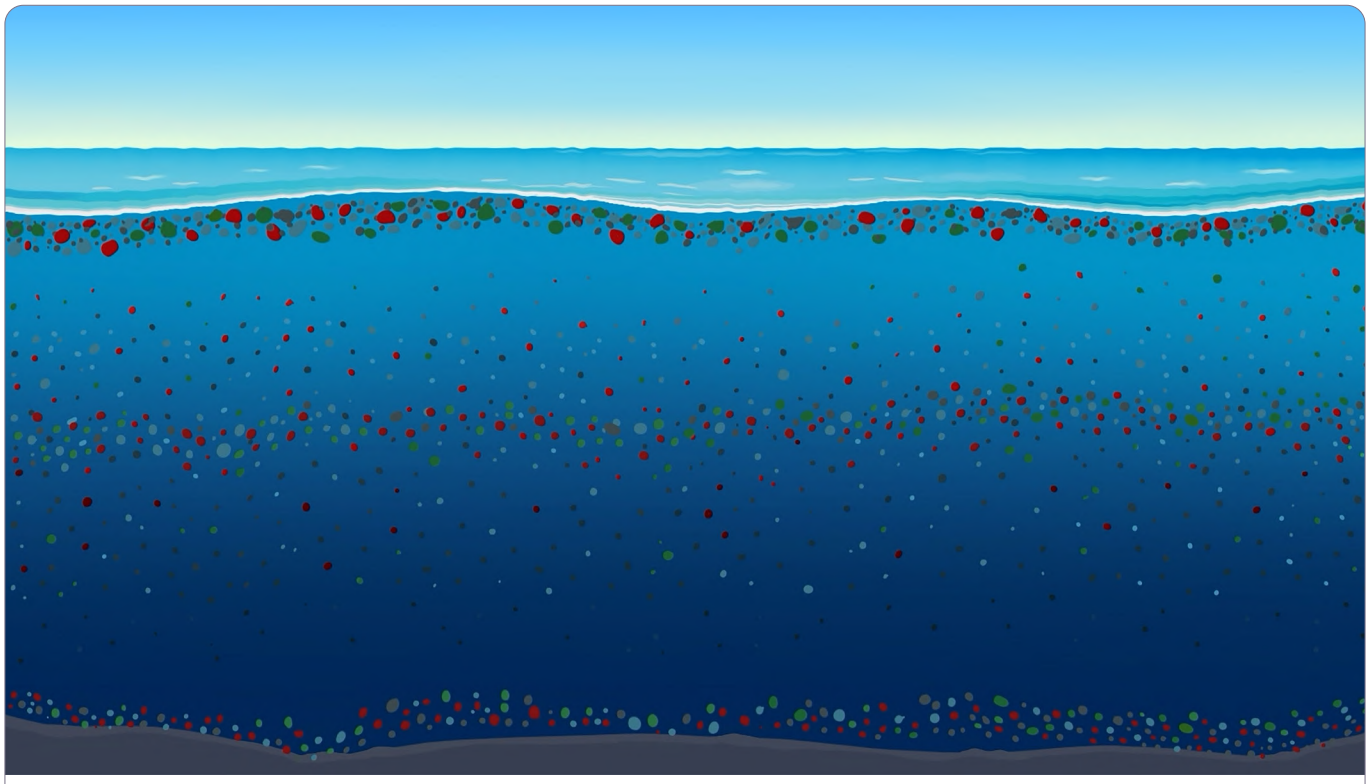


Рисунок 12. Схематическое изображение расположения микро- и нанопластика в поверхностном, придонном слоях и зоне термоклина

Помимо поверхностного и придонного слоёв загрязнения (рис. 11), концентрация микро- и нанопластика значительно возрастает в области термоклина[29] (рис. 12) — слоя воды, где наблюдается резкое изменение температуры. Высокий градиент плотности в этом слое способствует тому, что частицы микро- и нанопластика задерживаются в этих зонах и остаются там на длительное время. Океан можно представить как слоёный пирог, где каждый слой обладает уникальной температурой и плотностью, а микропластик накапливается на границах между этими слоями.

Кроме того, микропластик распространяется в океане с помощью живых организмов, которые поглощают его, переваривают и выделяют[30].

Распространение МНП в окружающей среде

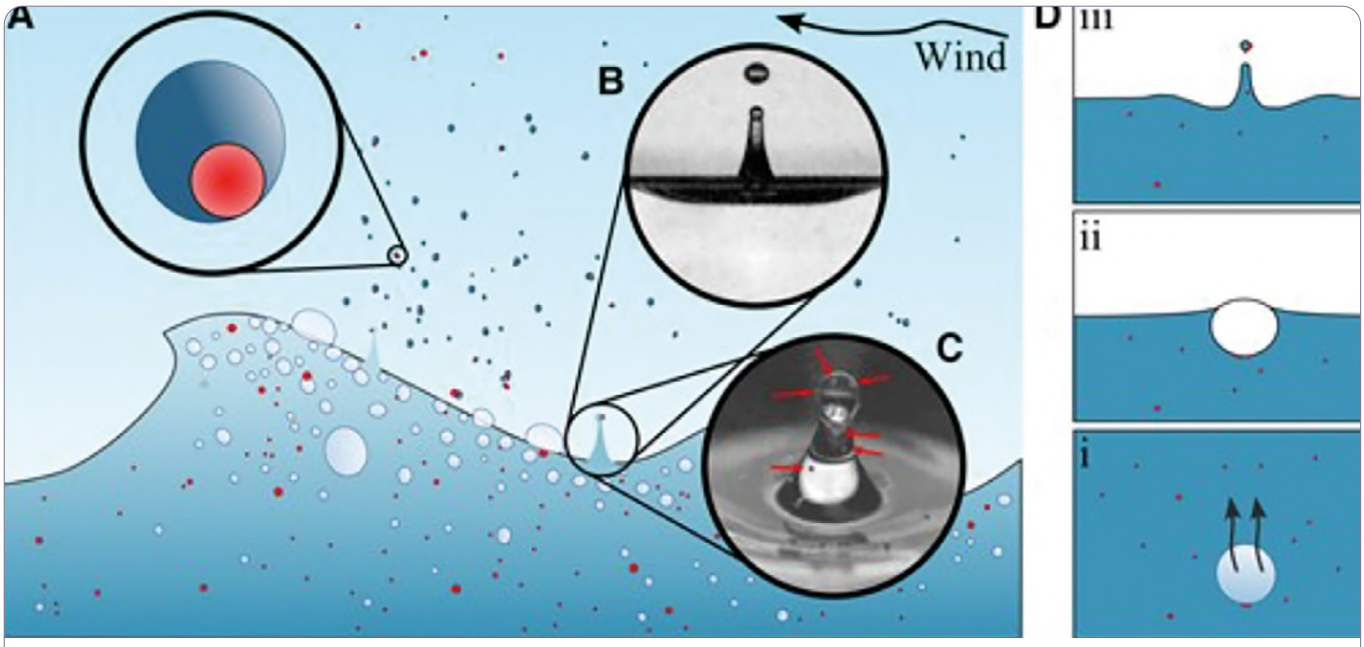


Рисунок 13. Рисунок соответствующих процессов выброса микропластика из океана. A) Микропластик (красный / более тёмный цвет) в океане переносится в атмосферу каплями морской воды. B) Лопающиеся пузырьки создают небольшие капли или аэрозоли, такие как струйные капли. C) Микропластик, присутствующий в жидкости, может переноситься в образующиеся струйные капли. Стрелки указывают на микропластиковые частицы размером 100 μм. Образующиеся капли могут подхватываться ветром и переносить микропластиковый материал в атмосферу. Жидкость в конечном итоге испаряется, оставляя микропластиковые частицы. D) Соответствующие физические процессы выброса микропластика путём лопания пузырька начинаются с очистки частиц по мере подъёма пузырька Di). После достижения поверхности Dii) пузырёк в конечном итоге принимает свою равновесную форму, которая после лопания фокусирует капиллярные волны у своего основания, образуя струйные капли Diii), переносящие микропластиковый материал.

Источник: 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

[29]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
[30]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

Когда вода испаряется[31], микропластик поднимается в атмосферу с поверхности океана[32]. Также, сочетание морских брызг, ветра и волн образует в воде пузырьки воздуха, содержащие микропластик. Когда пузырьки лопаются, частицы попадают в атмосферу (рис. 13). Ежегодно с морским бризом только на побережья переносится около 136 тысяч тонн микропластика[33]. А до 25 млн метрических тонн микро- и нанопластика в год переносятся на тысячи километров морским воздухом, брызгами, снегом и туманом, пересекая страны, континенты и океаны.

> *«Воздух — гораздо более динамичная среда, чем вода. В результате микро- и нанопластик может гораздо быстрее проникать в те регионы нашей планеты, которые наиболее удалены и до сих пор в значительной степени нетронуты» — говорит доктор Мелани Бергманн, биолог из Института Альфреда Вегенера в Германии.* Оказавшись там, частицы могут повлиять на климат поверхности и здоровье местных экосистем[34].

Микропластик был обнаружен в разных местах, от поверхности моря до глубоководных отложений, от сельскохозяйственных угодий до наших самых высоких гор, а также в морском льду, озёрах и реках. Он был обнаружен у 1 300 водных и наземных видов, от беспозвоночных в основании пищевой цепи до высших хищников, с доказательствами воздействия на всех уровнях биологической организации, от клеточного до экосистемного. Микропластик широко распространён в пище, которую мы едим, воде, которую мы пьём, и воздухе, которым мы дышим (рис. 14). Он был обнаружен во многих тканях и органах человеческого тела, и появляются доказательства его потенциального воздействия[35].

Рисунок 14. Повсеместное присутствие микропластика в пище, воде и воздухе

[31]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
[32]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
[33]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
[34]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
[35]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

Таким образом, перемещение в отдалённые и даже полярные регионы может быть обусловлено сочетанием атмосферного и морского переноса. Следовательно, важно понимать взаимодействие между атмосферой и океаном, чтобы определить, какие размеры частиц переносятся и в каких количествах.

Например, недавно группа исследователей обнаружила в облаках на вершинах гор в Японии пластиковые гранулы, имеющие гидрофильную (водопритягивающую) поверхность. Затем они проанализировали образцы и пришли к выводу, что низковысотные и более плотные облака содержат большее количество микропластика. Наличие полимеров как ядер конденсации **играет ключевую роль в быстром образовании облаков**, что в конечном итоге может повлиять на общий климат[36].

Частички пластика в облаках способствуют удержанию большего количества воды, это задерживает выпадение дождя. Когда же дождь начинает идти, он становится более сильным, поскольку в облаках успевает накопиться больше воды. Кроме того, микропластик, подвергавшийся воздействию ультрафиолетового света и отфильтрованной воды из облаков, имеет более шероховатую поверхность, что способствует накоплению на его поверхности больше свинца, ртути и кислородосодержащих групп[37].

Атмосфера в основном переносит мелкие частицы микропластика, что делает её гораздо более быстрым транспортным путём, который может привести к существенным отложениям в широком диапазоне экосистем. Данные исследований показывают, что леса выступают в роли барьеров для микропластика, переносимого ветром. Листья, ветви и стволы задерживают микропластик, который оседает на их поверхностях. Это приводит к тому, что переносимые ветром и осадками микрочастицы пластика остаются на растениях или оседают на землю.

Ограниченная вентиляция под плотным лесным пологом способствует устойчивому накоплению этих частиц в лесных массивах. Листья полога служат долговременным резервуаром для воздушного микропластика[38]. Исследования показали, что с осени 2017 года по лето 2019 года в 11 природных парках и заповедниках на западе США вместе с осадками выпало более 1 000 тонн пластиковых частиц. Этого количества достаточно для производства 120 млн пластиковых бутылок[39]. Аналогичная ситуация наблюдается и в других регионах мира. Например, леса пильчатого дуба (Quercus serrata) в Японии, занимающие площадь около 32 500 км², ежегодно улавливают в своих кронах около 420 трлн частиц микропластика, переносимых по воздуху[40].

[36]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

[37]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

[38]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

[39]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

[40]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

В отличие от лесов, в городах, благодаря хорошему проветриванию и наличию более тяжёлых взвесей от выхлопов автомобилей и промышленного смога, часть микро- и нанопластика осаждается. Сегодня воздух в лесах более насыщен нанопластиком, чем в мегаполисах.

Мир изменился! И теперь, когда люди купаются в океане, загорают на пляже или совершают пробежки вдоль побережья или в парке, гуляют в лесу с целью улучшить здоровье, напротив, они подвергают свой организм дополнительному воздействию микропластика. Микропластик из Африки и Северной Америки был обнаружен в удалённых и, казалось бы, нетронутых местах, таких как французские Пиренеи. Это свидетельствует о глобальном распространении микропластика, который переносится воздушными потоками и осадками, преодолевая огромные расстояния.

Микро- и нанопластик попадает в городские водоёмы через ливневые стоки, промышленные выбросы и дождевую воду, которая улавливает частицы из атмосферы. Например, при одной стирке синтетических тканей в сточные воды может попадать до 1,5 миллионов частиц микропластика[41]. Эти частицы, оказавшись в сточных водах, затем попадают в реки и океаны, там их заглатывают рыбы и другие водные организмы. Анализируя отходы, обнаруженные в реках и окружающем ландшафте, исследователи смогли подсчитать, что всего 10 речных систем переносят от 88 до 95 % пластика, который попадает в океан из рек[42].

В ходе другого исследования учёные пересмотрели общепринятые предположения о транспортировке пластика в реках и пришли к выводу, что фактическое количество пластиковых отходов в реках может быть на 90 % больше, чем предполагалось ранее[43].

Пластик также присутствует и в большинстве крупных озёр мира. При этом плотность пластиковых отходов в озёрах может быть даже выше, чем в крупнейших океанических мусорных пятнах, и даже озёра, расположенные в нетронутых районах, содержат значительное количество мусора. Это было подтверждено в ходе крупного международного исследования, проведённого под руководством Барбары Леони и Вероники Нава из Миланского университета Бикокка[44]. Согласно отчёту Программы ООН по окружающей среде (UNEP) за 2021 год, микропластик был обнаружен во всех исследованных пресноводных водоёмах, включая реки, озёра и водохранилища[45]. Например, исследователи обнаружили, что почти 10 000 метрических тонн, или 22 миллиона фунтов, пластикового мусора ежегодно попадают в Великие озёра из Соединённых Штатов и Канады[46].

---

[41]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

[42]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

[43]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

[44]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

[45]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

[46]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

В конечном итоге микропластик возвращается к человеку в виде рыбы или морепродуктов.

Итальянские учёные обнаружили, что фрукты и овощи также содержат миллионы частиц микропластика. Большая концентрация этих частиц была обнаружена в яблоках, грушах, моркови, картофеле, салате латуке и брокколи. При этом во фруктах концентрация частиц оказалась в 2–3 раза выше, чем в овощах: от 52 тысяч частиц на грамм в салате и до 223 тысяч в яблоках[47].

В ходе исследования было обнаружено, что 81 % из 159 образцов водопроводной воды, взятых по всему миру, содержит микропластик[48]. Другие исследования подтверждают эти выводы, отмечая присутствие микропластиковых частиц и в минеральной воде. Интересно, что количество частиц было примерно одинаковым как в стеклянной, так и в полиэтилентерефталатной (ПЭТ) бутылке, при этом количество достигало 6 292 частиц на литр[49, 50, 51].

Учёные из Ньюкаслского университета (Австралия) провели исследование[52], чтобы оценить, сколько пластика в среднем потребляет современный человек. Результаты показали, что человек съедает около 250 г пластика в год, что эквивалентно 50 пластиковым пакетам[53].

[47]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
[48]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
[49]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
[50]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
[51]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
[52]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
[53]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

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ МИКРО- И НАНОПЛАСТИКОМ

Как МНП разрушает экосистемы на молекулярном уровне

Пластиковые отходы присутствуют везде: от океанов и рек до почвы, воздуха и даже ледников[54]. Многолетние наблюдения подтверждают, что пластик, в отличие от растительных и животных веществ, не подвергается активному естественному разложению[55]. Он сохраняется в окружающей среде, не участвуя в природных циклах биодеградации. Созданный для сопротивления процессам распада, пластик стал постоянным элементом глобальной экосистемы. Эта устойчивость, изначально считавшаяся технологическим успехом, теперь приводит к значительному экологическому дисбалансу.

В производстве пластмасс используются свыше 13 000 химических веществ. Из них более 3 200, включая мономеры, добавки и вспомогательные вещества для переработки, потенциально опасны из-за своих токсичных свойств[56].

Влияние МНП на свойства почвы и деградацию экосистем

Исследования показывают, что загрязнение микропластиком наземных экосистем, особенно сельскохозяйственных почв, может превышать уровень загрязнения водной среды в 4–23 раза[57], указывая на значительное накопление пластика в почвах. Пластик накапливается в почве разными способами, включая очистные сооружения, мульчирование, атмосферные отложения и продукты повседневного использования. Бесчисленное использование одноразовых пластиковых изделий неразрывно связано с серьёзным загрязнением почвы микро- и нанопластиком. Естественные и антропогенные факторы способствуют[58] проникновению мелких частиц микропластика в грунт, что изменяет важные экологические процессы[59].

Наблюдения подтверждают пагубное воздействие микропластика на экосистемы, затрагивающее структуру и функции микроорганизмов, растений и почв (рис. 15).

---

[54]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

[55]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

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

[57]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

[58]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

[59]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

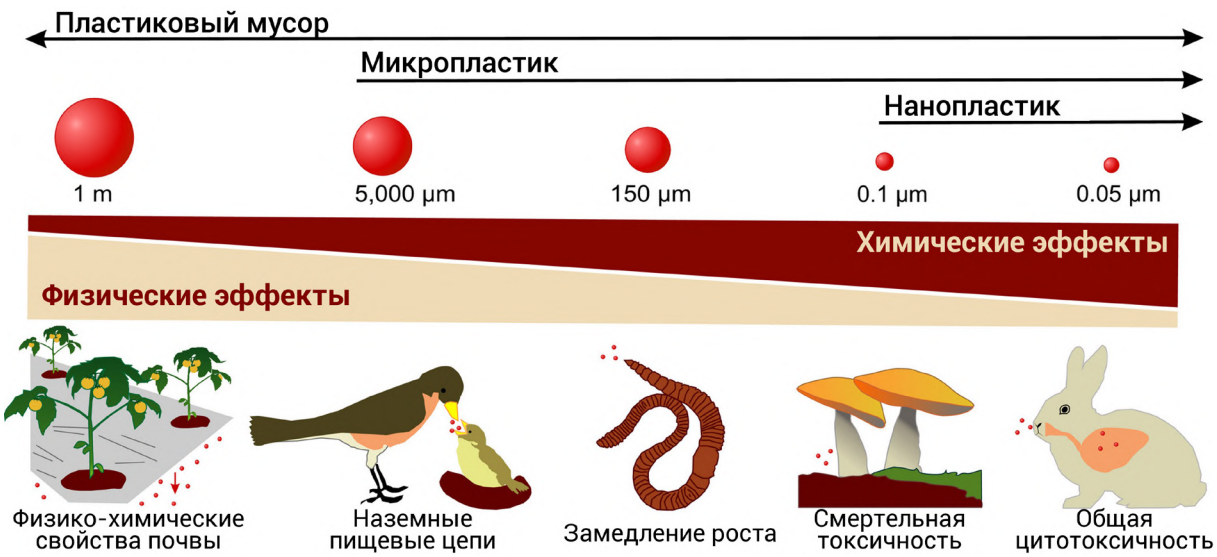


Рисунок 15. Микропластик как триггер комбинированных физических или химических эффектов
Биогеохимия почвы, связанная с сельскохозяйственным мульчированием, употреблением в пищу наземными и континентальными птицами, снижением роста дождевых червей, летальной токсичностью для грибов, воспалением лёгких млекопитающих и широкой цитотоксичностью нанопластика.
Источник: 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

Результаты исследования Китайской академии наук показали, что наличие пластиковой плёнки разных размеров в почве значительно увеличивает скорость испарения воды. Особенно сильный эффект наблюдается при добавлении 2-миллиметровых частиц. Более крупные пластиковые фрагменты (5–10 мм) приводят к растрескиванию почвы, разрушая её структурную целостность. Эти данные указывают на то, что загрязнение пластиком нарушает водный цикл в почвах, что может усугубить дефицит почвенной воды и повлиять на вертикальный перенос загрязняющих веществ[60] (рис. 16–17).

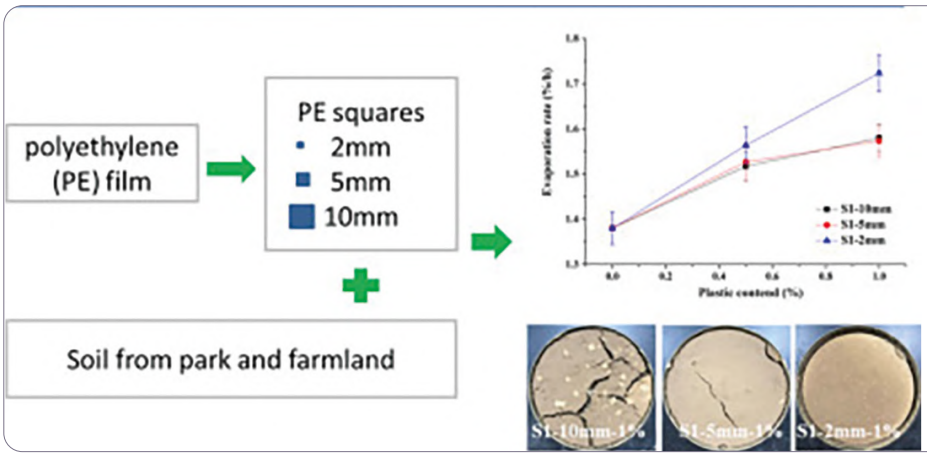


Рисунок 16. Нарушения структурной целостности почвы из-за микропластика

[60]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

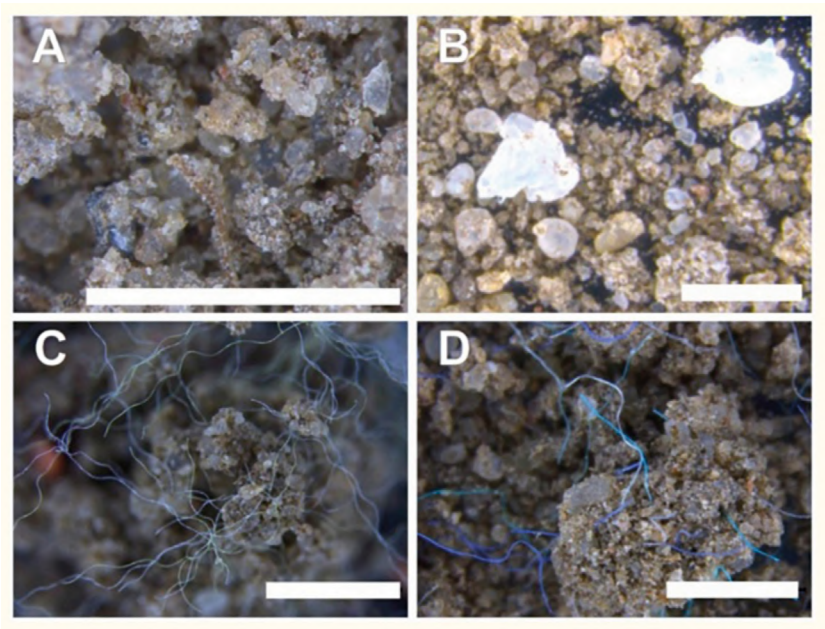


Рисунок 17. Интеграция микропластиковых частиц в биофизическую среду почвы
Источник: Wan, Y., Wu, C., Xue, Q. & Hui, X. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. Science of The Total Environment 654, 576–582 (2019). https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123

Структура контрольной почвы (A) визуально не отличалась под стереомикроскопом от почвы, загрязнённой полиамидными шариками (SI S1D). Полиэтиленовые фрагменты (B) и полиэфирные (C) или полиакриловые волокна (D) привели к визуально различимым признакам почвы. Белая полоса на каждой панели представляет размер 1 мм. 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

Исследования также подтверждают неблагоприятное воздействие пластика на почвенную биоту — разнообразное сообщество, включающее микроорганизмы (например, бактерии, грибы) и фауну (микроскопические и макроскопические животные). Эти организмы взаимодействуют друг с другом, с корнями растений и окружающей средой, образуя почвенные пищевые цепи (рис. 18), необходимые для круговорота питательных веществ и здоровья растений.

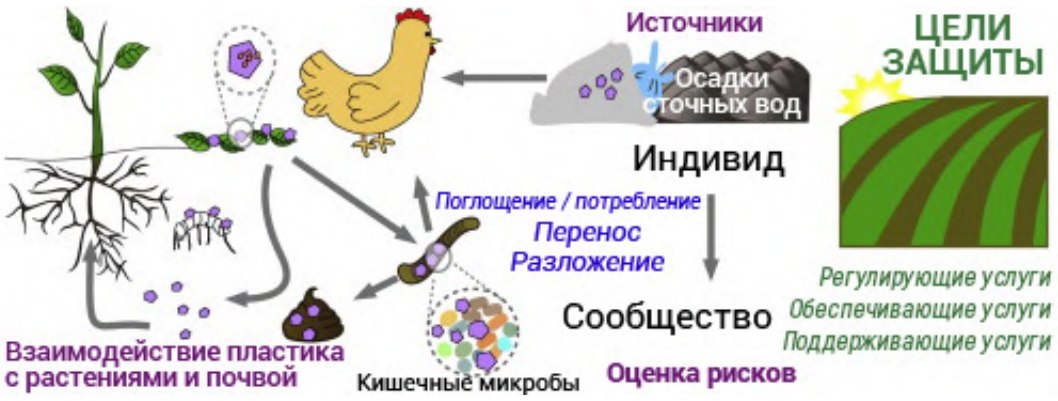


Рисунок 18. Схематическое изображение процесса образования почвенных пищевых цепей
Ng, E.-L. et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. Science of The Total Environment 627, 1377–1388 (2018). https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341

Различные виды наземной биоты служат биоиндикаторами загрязнения микропластиком. Анализ всех образцов показал наличие частиц микропластика и потенциально токсичных элементов (Sb, As, Fe, Al, Se, Zn) в разных концентрациях, что свидетельствует[61] о возможной токсичности микропластика[62].

Исследования показали, что полистирольные гранулы могут поглощаться почвенным организмом нематодой *Caenorhabditis elegans* (рис. 19); это также означает, что частицы полистирола могут накапливаться в почвенной пищевой цепи[63].

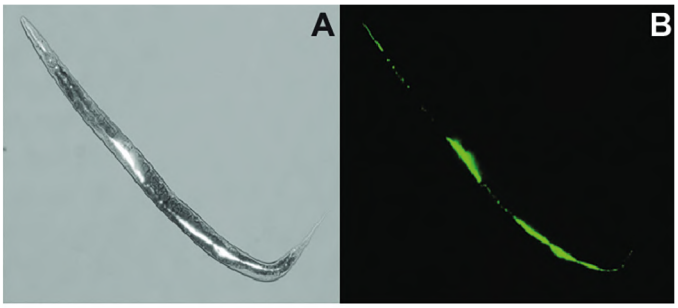


Рисунок 19. Изображения в светлом поле (A) и флуоресцентные изображения (B) взрослого червя *Caenorhabditis elegans*, который накапливал 0,5 мкм микросферы жёлто-зелёной флуоресценции в течение 15 мин. при 20 °C. Фотографии были сделаны при увеличении ×100.

Почвенная биота — это не просто «биологический двигатель Земли», а многофункциональная система, от которой зависят все наземные экосистемы. Её роль в поддержании жизни на планете сопоставима с функциями океанов и атмосферы, что подтверждается исследованиями почвоведов, экологов и климатологов. Поэтому любое изменение, вызванное токсичностью, может повлиять на многие критические процессы в почвах и на пищевую цепь, вызывая экологический дисбаланс[64].

Данные указывают на способность микропластика быстро адсорбироваться на поверхности почв за счёт малого размера, большой удельной площади, высокой гидрофобности и устойчивости к биодеградации[65]. Это способствует его лёгкому поглощению организмами и накоплению в них, что создаёт потенциальную угрозу для здоровья человека. Этот процесс не ограничивается почвенным слоем, а распространяется на растения, где он продолжает своё пагубное влияние.

МНП в продуктах питания

Антропогенные загрязнители могут оказывать значительное воздействие на экосистемы, особенно когда попадают в растения. Было подтверждено, что МП могут поглощаться и перемещаться в различные органы растений.

[61]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
[62]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
[63]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
[64]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
[65]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

Данные исследований указывают, что микропластик накапливается в растительных системах различными путями, оказывая неблагоприятное воздействие на растения, сельскохозяйственные культуры и пищевые продукты.

Нанопластик, за счёт своего малого размера, способен напрямую проникать в растительную ткань[66]. Растения поглощают нанопластик из питательной среды, после чего он транспортируется в надземные части через ксилему — систему проводящих сосудов, транспортирующих воду и питательные вещества от корней к стеблям и листьям.

Микропластик, оседающий на листьях, проникает через устьица и может перемещаться к корням по сосудистым пучкам. Как микро-, так и нанопластик проявляет токсическое воздействие на физиологические процессы и ферментативную активность сельскохозяйственных растений[67] (рис. 20).

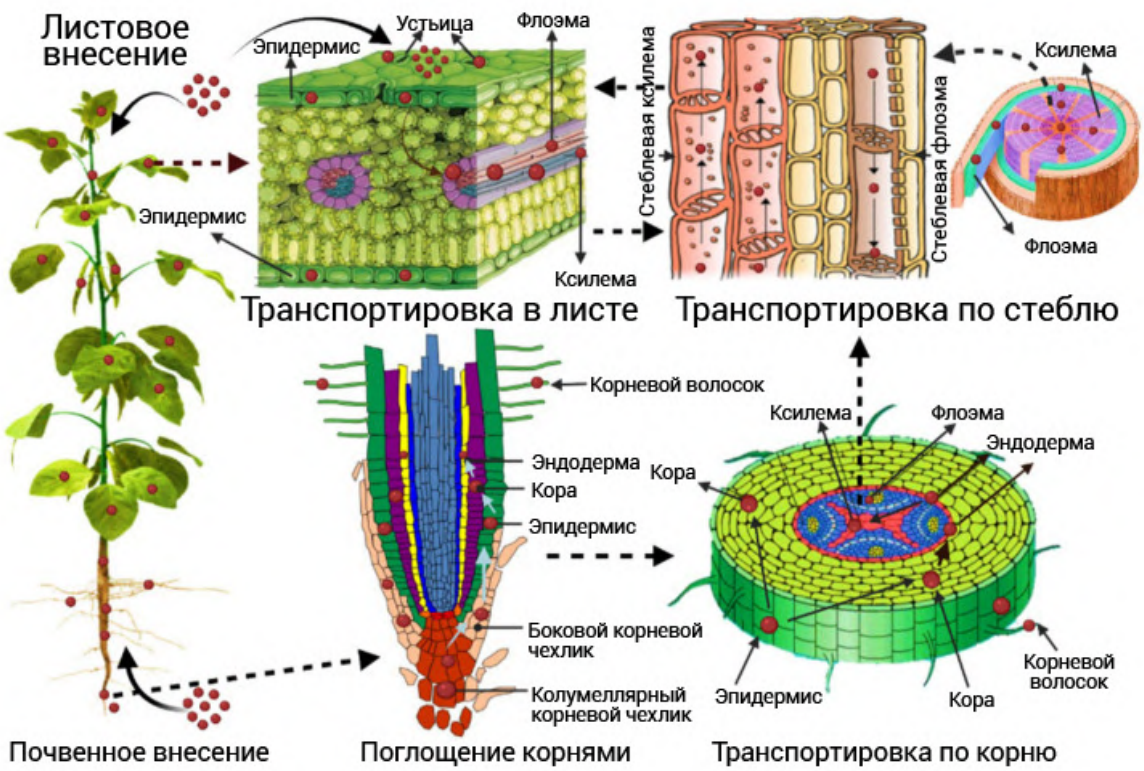


Рисунок 20. Механизмы поглощения микро- и нанопластика в растениях
Механизм поглощения пластика растениями при попадании в почву через поглощение корнями; транспортные пути от корня к стеблю и транспорт от стебля к листьям и плодам. Внекорневое внесение показывает попадание пластика в устьица листьев и последующий перенос в другие части растения. Сплошная стрелка казывает на доступность пластика для растения, а пунктирная стрелка указывает на транспортировку внутри растения.

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

[66]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
[67]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

Система транспортировки воды в растениях способна быстро переносить нанопластик в стебли, листья и, возможно, плоды. Согласно данным, полученным при исследовании растений табака *(Nicotiana tabacum)*, нанопластик размером 100 нм не проникает в растительные клетки, тогда как частицы размером от 20 до 40 нм успешно поглощаются[68].

Кроме того, некоторые пластиковые частицы обладают собственным зарядом, что может усиливать их адсорбцию в корнях растений за счёт электростатического притяжения, влияя на иммобилизацию питательных веществ или процессы фотосинтеза[69]. Отрицательно заряженные микропластики с большей вероятностью проникают в кору корня[70].

В агроэкосистемах с сильным загрязнением этими частицами отмечается замедление роста и развития растений[71], а также краткосрочное и преходящее воздействие на скорость прорастания и развитие корней[72].

Исследования подтверждают присутствие микропластика в коммерчески доступном мёде, произведённом как промышленно, так и локально. Последующий анализ выявил широкое распространение микропластика в соцветиях различных видов растений[73,74].

За последние годы резко ухудшилось состояние популяций пчёл по всему миру. Исследования показывают, что одной из недооценённых причин этого может быть загрязнение окружающей среды микропластиком и нанопластиком. Исследования показали, что пчёлы «собирают» микропластик из воздуха, воды, растений и почвы, а затем приносят его в улей. Пчёлы собирают нектар и пыльцу с растений, а также воду из естественных источников — и все эти среды уже сегодня содержат микропластик. Волоски на теле пчел играют роль «ловушек» для частиц. Частицы пластика также накапливаются на лапках, особенно в сгибах и между сегментами — они контактируют с поверхностями растений, земли, воды и даже самим ульем.

> *«Медоносная пчела является очень хорошим биологическим индикатором загрязнения окружающей среды, поскольку она вездесуща, покрыта волосками, улавливающими примеси и частицы, присутствующие в воздухе, чувствительна к загрязнителям, очень подвижна и имеет широкий радиус полета, среди прочего.»* [75]

[68]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

[69]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

[70]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

[71]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

[72]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

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

[74]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

[75]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

В организм пчелы микро и нанопластик попадает также и через кутикулу (наружную оболочку тела). После попадания в тело пчелы, частицы пластика уже через 3 дня достигают мозга, вызывая у неё нарушения памяти, ориентации и когнитивных функций, критически важных для поиска пищи и навигации[76]. Влияние микропластика на мозг приводит также к снижению способности восстановления памяти. Это критично, потому что пчёлы ориентируются по знакомым ориентирам в пространстве. Нанопластик в мозге пчел также приводит к тому, что пчёлы теряют способность запоминать, где находятся источники нектара, хуже реагируют на запахи цветов и сбиваются с пути обратно в улей. Такие когнитивные нарушения напрямую снижают эффективность опыления и могут дестабилизировать всю колонию[76].

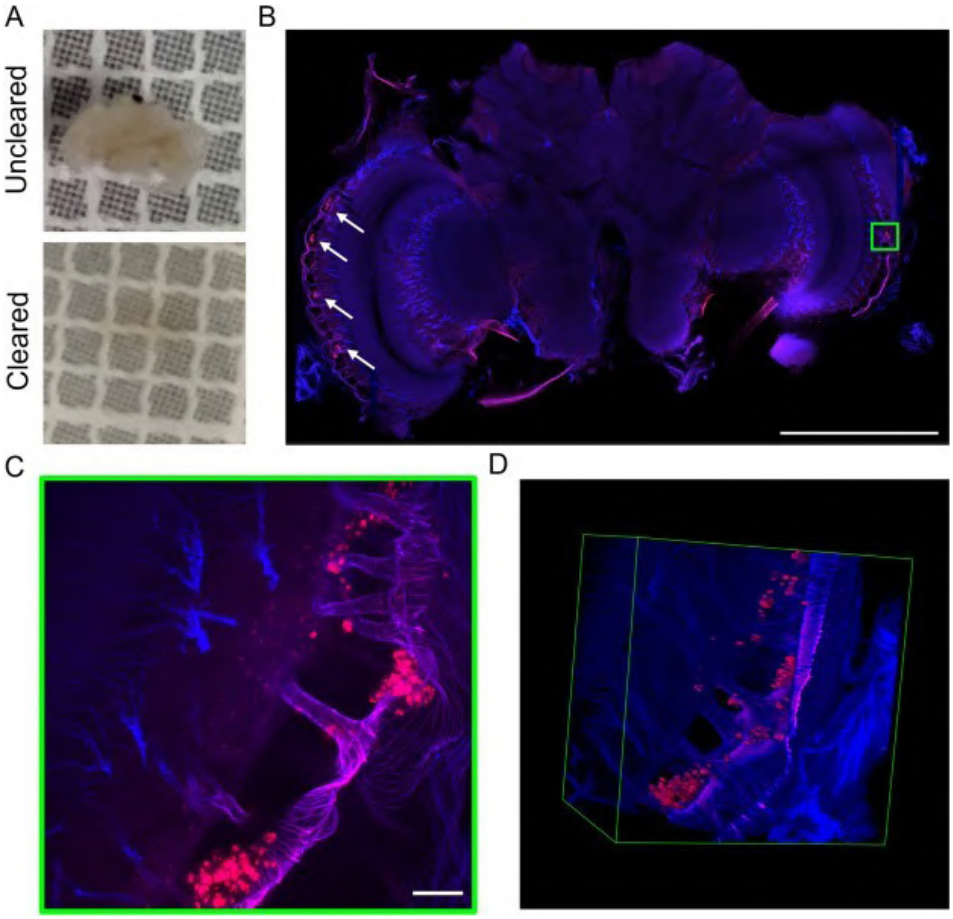


Рисунок 21. Обнаружение значительного количества микропластика в мозге медоносной пчелы.

A) Фотографии диссецированного мозга до и после просветления методом iDISCO.
B) Одиночный оптический срез (глубина ~ 200 мкм) 3D-реконструкции всего мозга, полученной с помощью двухфотонной флуоресцентной микроскопии (TPFM) с объективом 10×; разрешение — 0,51 × 0,51 × 2 мкм³. Синий цвет — автофлуоресценция ткани, красный — микропластик с красной флуоресценцией (указан белыми стрелками). Масштабная линейка: 1000 мкм.
C) Вставка с высоким разрешением из выделенной зелёным области на изображении B, полученная с объективом 63×. Изображение представляет собой проекцию максимальной интенсивности стековой серии глубиной 150 мкм с разрешением 0,17 × 0,17 × 1 мкм³. Масштабная линейка: 20 мкм.
D) 3D-визуализация стековой серии, представленной в C. Размеры: 170 × 170 × 150 мкм³.
Источник: 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

[76]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

Попадая в организм пчелы, нанопластик также вызывает повреждение кишечника, ослабление иммунной системы и повышает восприимчивость к вирусам, что может приводить к смерти пчёл даже при отсутствии острой токсичности пластика[75, 77]. Помимо этого, фрагменты пластика накапливаются не только в пчёлах, но и в мёде, воске и личинках, что создаёт замкнутый цикл пластикового загрязнения внутри улья[75].

Это потенциально может нести серьезные последствия не только для пчёл, но и для продовольственной безопасности. Пчёлы — ключевые опылители, и их ослабление напрямую влияет на урожайность сельхозкультур.

Повреждение мозга, снижение массы тела и ослабление иммунитета приводят к снижению опылительной активности, что, как предупреждают учёные, может усугубить кризис глобального производства продовольствия[77]. Пчёлы действуют как активные биоиндикаторы загрязнения, и уже сейчас микропластик найден в значительном количестве в мёде вне зависимости от страны производства[78].

Воздействие МП снижает общее содержание хлорофилла на 5,63–17,42 %, что приводит к потере мирового производства риса, пшеницы и кукурузы. Такая потеря составляет 4,11–13,52 % от общего годового мирового производства этих культур, что имеет значительные последствия для продовольственной безопасности[79] (рис. 22).

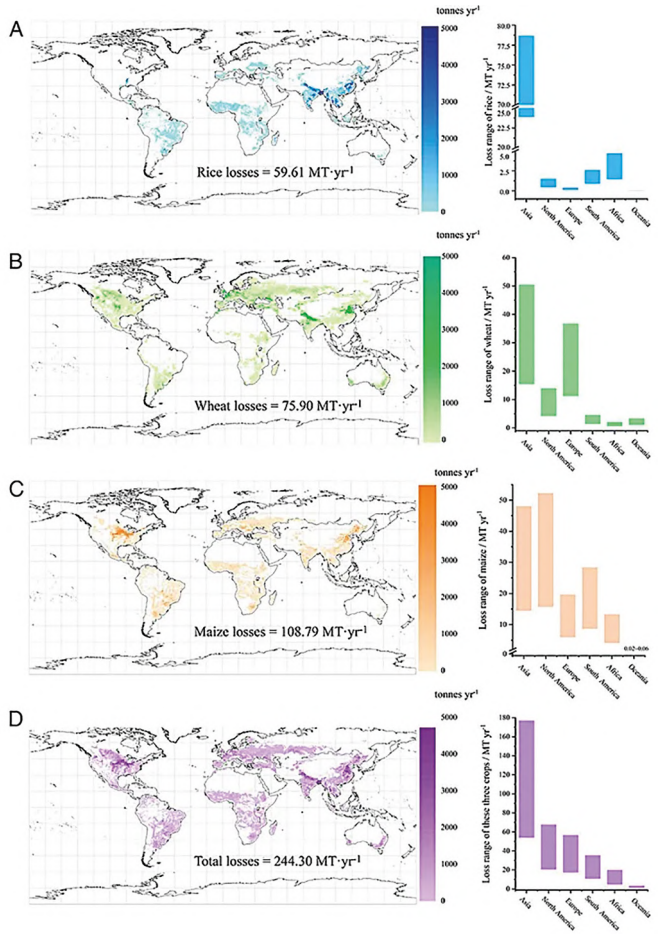


Рисунок 22. Глобальные карты годовых потерь производства для трёх основных продовольственных культур: (A) рис; (B) пшеница; (C) кукуруза; (D) три культуры вместе взятые.

Карты слева отображают среднее значение прогнозируемых годовых потерь производства, а плавающие столбчатые диаграммы справа иллюстрируют диапазон годовых потерь для соответствующей культуры. Данные о производстве сельскохозяйственных культур для версии 2020 года были получены из базы данных Spatial Production Allocation Model (SPAM). 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

[77]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).

[78]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)

[79]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

Леса как накопители МНП

Анализ выявил присутствие нанопластика в корнях, стеблях, листьях и хвое при всех изученных концентрациях и временных интервалах. Концентрации нанопластика в корнях превышали таковые в надземных частях как минимум в 10 раз.

Пластиковое загрязнение негативно сказывается на функционировании как вечнозелёных хвойных, так и листопадных видов деревьев, вызывая окислительный стресс и снижая эффективность фотосинтеза, что может привести к замедлению роста и даже гибели растения. Исследования показывают, что нарушения в стадиях фотосинтеза приводят к накоплению избыточной световой энергии, которая, не превращаясь в химическую, вызывает фотоокислительный стресс и повреждение тканей растений. Для защиты растения активируют фотозащитные механизмы, в которых каротиноиды рассеивают лишнюю энергию в виде тепла[80].

Нарушая фотосинтез, вызывая окислительный стресс и снижая физиологическую активность растений, пластиковое загрязнение усиливает уязвимость экосистем к изменениям климата. Эти данные подчёркивают масштаб воздействия пластикового загрязнения на растительные сообщества, что, в свою очередь, ставит вопрос о его влиянии на наземных животных, зависящих от этих экосистем.

Как нанопластик разрушает фауну

Данные многочисленных исследований свидетельствуют, что накопление микро- и нанопластика в окружающей среде, в том числе в растениях, оказывает влияние на развитие животноводства[81], затрагивая цепочки питания и здоровье животных. Наблюдения на молочной ферме в Италии показали, что все образцы сена райграса содержали микропластик[82]. Исследование в Индии выявило загрязнение микропластиком полиэтилентерефталата в 100 % образцов рациона молочных коров, с концентрациями 89 - 326 г/кг[83].

[80]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
[81]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
[82]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
[83]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

Анализ подтвердил присутствие микропластика в фолликулярной жидкости крупного рогатого скота[84], молоке[85], кале овец[86], говядине и крови[87], указывая на значительное воздействие на жвачных животных. Согласно данным, 50–60 % инородных тел, извлечённых из забитого скота[88], включая мелких жвачных, таких как козы и овцы, представляют собой пластиковые материалы. Кроме того, микропластик обнаружен во внутренних тканях городских собак и кошек[89], кишечнике домашних уток[90] и лёгочной ткани свиней[91].

Данные исследований подтверждают, что микропластик наносит вред животным не только сам по себе, но и через добавки, применяемые при его производстве, а также загрязняющие вещества, поглощаемые им из окружающей среды, вызывая повреждения различной степени[92]. Наблюдения показывают, что микропластик провоцирует у животных токсические эффекты, включая окислительный стресс, повреждение кишечника, иммунотоксичность а также репродуктивную токсичность и нейротоксичность[93] (рис. 23). Более того, микропластик служит носителем для таких загрязнителей, как тяжёлые металлы, антибиотики, стойкие органические соединения и пестициды, что усиливает потенциальные риски для экосистем, здоровья животных и человека[94].

[84]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
[85]Da Costa Filho, P. A. et al. Detection and characterization of small-sized microplastics (≥ 5 µm) in milk products. Sci Rep 11, 24046 (2021). https://doi.org/10.1038/s41598-021-03458-7
[86]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
[87]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
[88]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
[89]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
[90]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
[91]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
[92]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
[93]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
[94]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

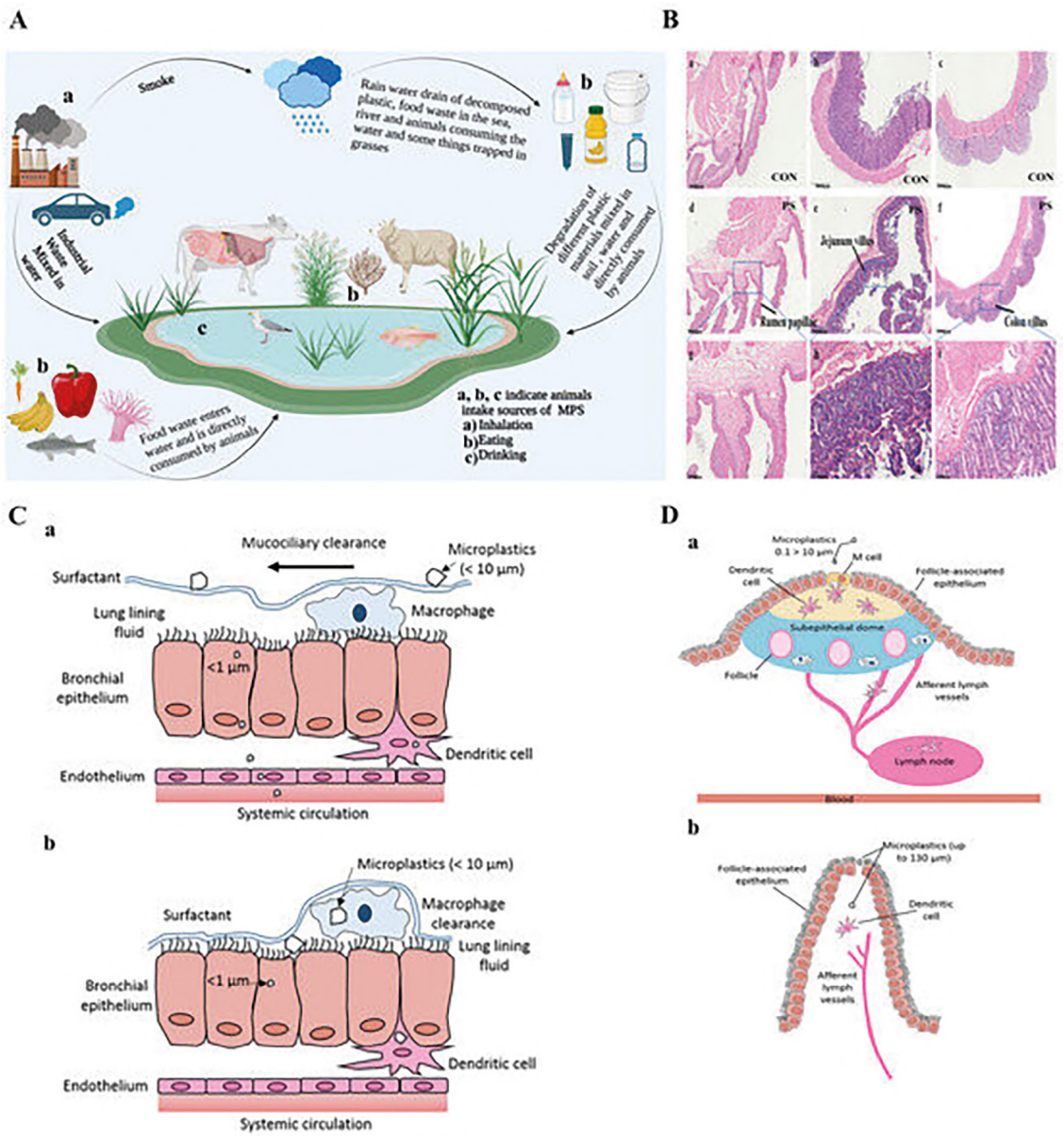


Рисунок 23. Схематическая диаграмма путей потребления животными МП, и влияние МП на желудочно-кишечный тракт

(A) Пути потребления МП животными. (B) Желудочно-кишечный отдел ПС до и после воздействия: H&E изображения рубца (a), тонкой кишки (b) и толстой кишки (c) в группе КОН; (d) H&E карта рубца группы S-PS; (e) H&E карта тонкой кишки группы L-PS; (f) H&E карта толстой кишки группы L-PS; (g–i) представляют собой локально увеличенные изображения, относящиеся к (d–f) соответственно. (C) Потенциальные механизмы поглощения и выведения микрочастиц (МЧ) (0,1 > 10 мкм) в лёгких: (a) Существует сниженная вероятность того, что лёгочные жидкости (поверхностно-активные вещества и слизь) вызовут перемещение микропластика в верхние дыхательные пути (центральное лёгкое), где лёгочная мембрана толще. Ресничная слизистая оболочка с частицами > 1 мкм была очищена. Частицы < 1 мкм могут быть проглочены через эпителий. (b) Если аэродинамический диаметр микропластика позволяет откладываться глубоко в лёгких, он может проникать в более жидкую лёгочную жидкость и контактировать с эпителием, метастазируя посредством диффузии или активного поглощения клетками. (D) Прогнозируемые пути поглощения МЧ из желудочно-кишечного тракта (ЖКТ): (a) Поглощение МЧ из просвета ЖКТ М-клетками собирательных лимфатических узлов Пайла посредством эндоцитоза (0,1 > 10 мкм). М-клетки отбирают и транспортируют частицы из просвета кишечника в лимфоидную ткань слизистой оболочки. (b) МП всасываются из просвета ЖКТ путём парацеллюлярной абсорбции. Неразлагаемые частицы, такие как МП, могут механически защемляться в подлежащей ткани через свободные связи в одноклеточном верхнем слое. Дендритные клетки способны поглощать эти частицы, транспортируя их в лимфатические сосуды и вены ниже. Они могут распространяться во вторичные ткани, включая печень, мышцы и мозг.

Данные наблюдений свидетельствуют, что дикие животные ошибочно принимают пластиковые отходы за пищу. Это приводит к их накоплению в кишечнике. В Зимбабве[95] и на Шри-Ланке[96] слоны, питавшиеся на открытой свалке, погибли от неперевариваемого пластика. В японском парке Нара дикие олени умирали от осложнений, вызванных проглатыванием пластиковых отходов, оставленных туристами[97]. Исследование более 30 000 верблюдов вблизи Дубая в Объединённых Арабских Эмиратах выявило, что 1 % животных предположительно погиб из-за пластика, скопившегося в их пищеварительном тракте[98]. Учёные ввели термин «полибезоар» для описания плотной массы неперевариваемых материалов, таких как пластик, верёвки, мусор и солевые отложения, формирующей камнеподобный конкремент в желудке или кишечнике, особенно у жвачных. Термин объединяет «поли» (синтетическое вещество) и «безоар» (каменистое образование). Наблюдения подтверждают, что полибезоары вызывают закупорку желудочно-кишечного тракта, сепсис от роста бактерий, обезвоживание и недоедание (рис. 24).

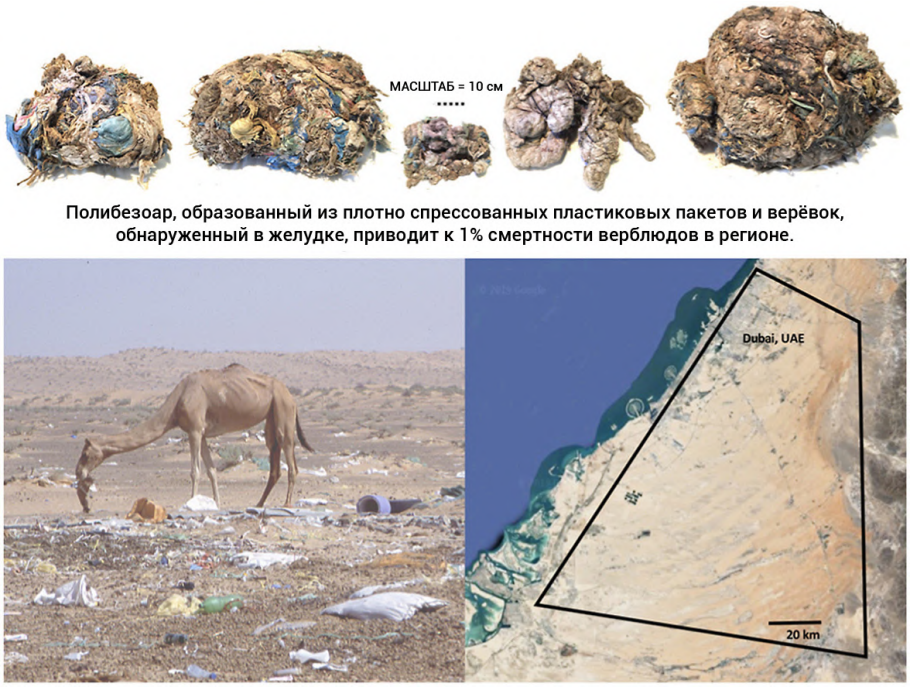


Рисунок 24. Полибензоары, найденные внутри мёртвых верблюдов в пустыне, недалеко от Дубая. Самый большой из проанализированных для нового исследования весил почти 6 4кг (141 фунт) Eriksen, M., Lusher, A., Nixon, M. & Wernery, U. The plight of camels eating plastic waste. Journal of Arid Environments 185, 104374 (2021). https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104374

[95]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
[96]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
[97]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
[98]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

Передача МНП по пищевым цепям от планктона к человеку

Накопление пластика в океане оказывает значительное негативное воздействие на морские экосистемы. Научные наблюдения за последние четыре десятилетия выявили микропластик практически во всех морских местообитаниях мира[99]. Исследования подтверждают, что пластиковый мусор угрожает морскому биоразнообразию, затрагивая не менее 690 видов, включая китообразных, ластоногих, морских птиц, черепах, рыб и ракообразных[100]. Проглатывание пластика подвергает животных влиянию дополнительных токсинов. Химические вещества из пластиков выщелачиваются в организм после потребления, передаваясь по пищевым цепям от добычи к хищнику. Последствия запутывания или проглатывания варьируются от летальных до сублетальных, вызывая нарушения кормления, проблемы с пищеварением, недоедание, болезни, снижение репродуктивной способности, замедление роста и сокращение продолжительности жизни[101]. Из-за своих малых размеров микропластик поглощается планктоном — ключевым звеном морских пищевых цепей. Планктон потребляется многими морскими видами, а те, кто не питаются им напрямую, поедают организмы, уже усвоившие планктон. Таким образом, микропластик интегрируется в пищевые цепи (рис. 25-26).

В 1999 году анализ образцов поверхностных вод в центральном круговороте северной части Тихого океана выявил, что масса пластика превышает массу зоопланктона — основного источника питания экосистемы — в шесть раз[102], что подчёркивает преобладание пластика над живыми организмами в океане.

Расчёты, основанные на данных наблюдений, показывают, что концентрация микропластика возрастает с увеличением размера рыбы. Данные свидетельствуют, что крупнейшее животное — кит — ежедневно поглощает до 43,6 кг пластика, причём 98,5 % этого объёма поступает через пищу, а не напрямую из воды, поскольку микропластик уже содержится в добыче[103].

[99] 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

[100] 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

[101] 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

[102] 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

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

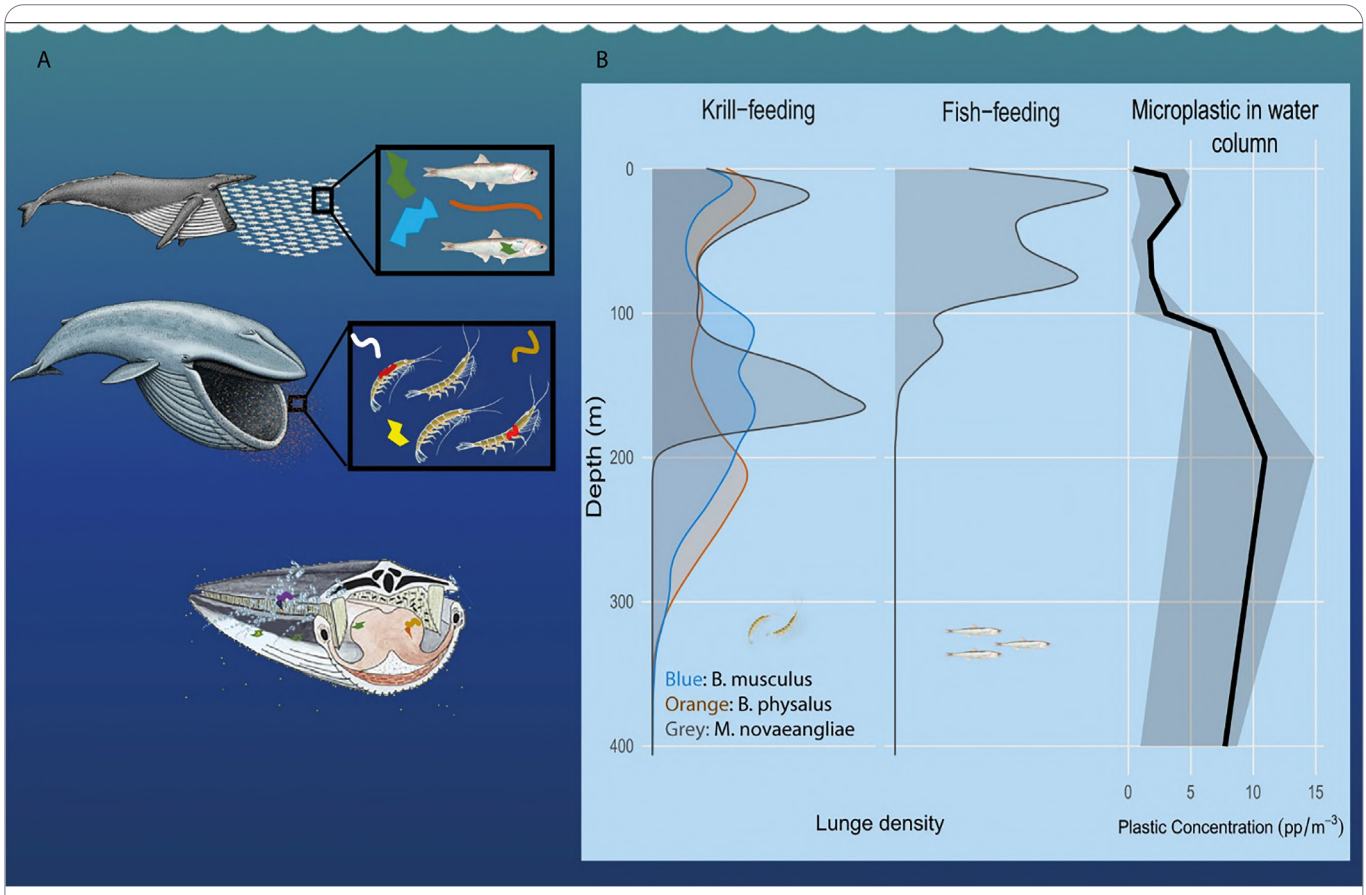


Рисунок 25.
a — Пластик, проглоченный китами в день, смоделированный как сумма (i) пластика, отфильтрованного из воды в день, и (ii) пластика, потреблённого добычей в день. Мы создали три сценария, чтобы охватить диапазон возможного риска воздействия проглатывания пластика: низкий, средний и высокий, — поскольку некоторые переменные не имеют исчерпывающих данных;
b - Глубина выпада от размещений в заливе Монтерей, соответствующая профилю глубины концентрации пластика в заливе Монтерей. Киты и объекты добычи были проиллюстрированы Алексом Боерсмой, а диаграмма фильтрации в разрезе была проиллюстрирована Скоттом Лэндри из Центра прибрежных исследований.
Исходные данные предоставлены в виде файла исходных данных. Kahane-Rapport, S. R. et al. Field measurements reveal exposure risk to microplastic ingestion by filter-feeding megafauna. Nat Commun 13, 6327 (2022). https://doi.org/10.1038/s41467-022-33334-5

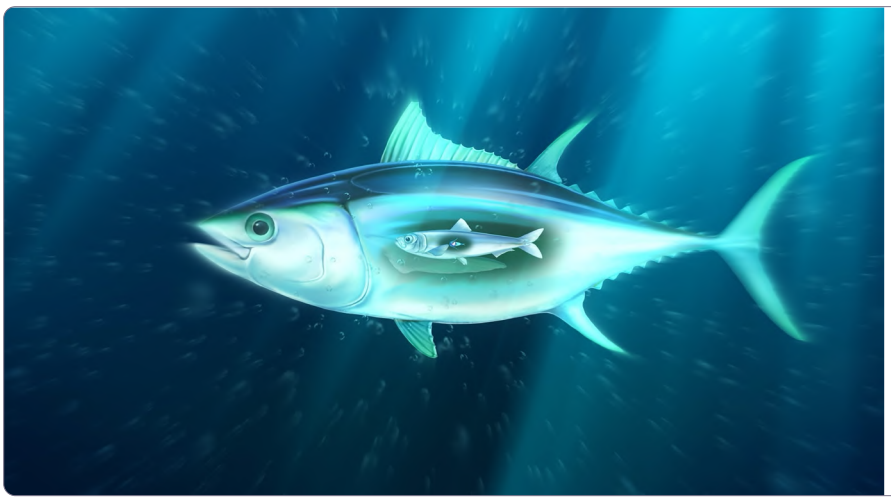


Рисунок 26. Схематическое изображение проникновения пластика в пищевые цепи

Пластик убивает морские организмы

Ежегодно от загрязнения погибает около 1 миллиона морских птиц и 100 000 морских млекопитающих[104]. Наблюдения подтверждают связь между проглоченным мусором и смертностью морских птиц. Исследование 1 733 особей из 51 вида выявило, что внутри 557 птиц (32,1 %) находился морской мусор — от 1 до 40 предметов, с максимальным весом 3 340 мг и объёмом 3 621 мм³ [105].

Отдельные данные показывают, что некоторые пластики выделяют диметилсульфид — химическое вещество, имитирующее обонятельный сигнал, используемый морскими птицами для идентификации пищи[106]. Новые исследования также установили, что проглатывание пластика вызывает у птенцов поражения почек, печени и желудка, а также поражения мозга, схожие с болезнью Альцгеймера. Это подчёркивает разрушительное воздействие пластикового загрязнения на морскую фауну[107]. У каждой особи всех семи видов черепах в трёх океанических бассейнах были обнаружены синтетические частицы[108] (рис. 27).

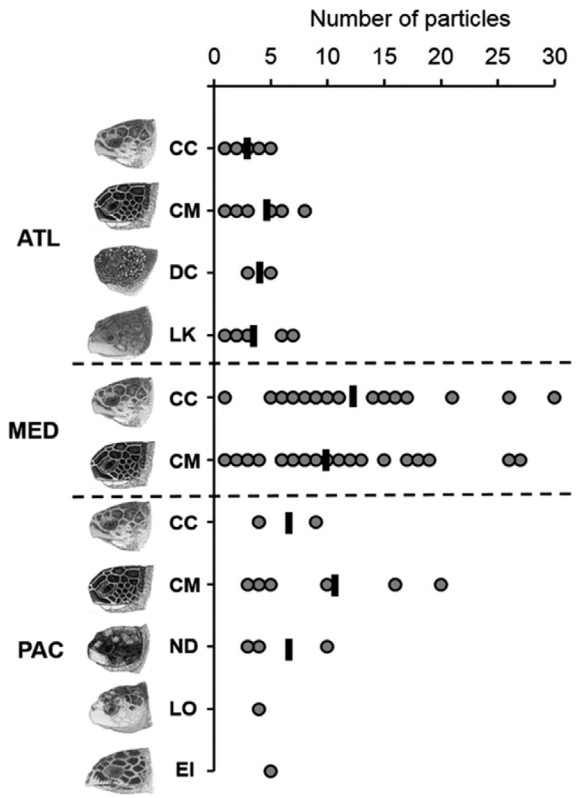


Рисунок 27. Проглатывание синтетических микрочастиц всеми видами морских черепах из трёх океанических бассейнов. Общее количество частиц, идентифицированных в каждой подвыборке объёмом 100 мл для каждого вида в каждом океаническом бассейне. Чёрная линия — среднее количество частиц. Фигурки черепов морских черепах используются с разрешения WIDECAST; оригинальные рисунки Тома Макфарланда. 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

[104]WWF-Australia. How many birds die from plastic pollution? https://wwf.org.au/blogs/how-many-birds-die-from-plastic-pollution.
[105]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
[106]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
[107]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
[108]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

Исследования 171 774 особей из 555 видов морских рыб показывают, что 386 видов морских рыб, включая 210 коммерчески значимых, потребляют пластиковый мусор[109]. Частота проглатывания микропластика рыбами, по данным исследований, составила 26 %, увеличившись вдвое за последнее десятилетие (рис. 28). Анализ выявил положительную корреляцию между обилием пластика в поверхностных водах (рис. 29) и его потреблением морскими организмами (рис. 30).

Лабораторные исследования показывают, что соединения из пластика, проникая в ткани рыб, снижают активность, нарушают работу печени, повреждают мозг, а также замедляют рост и ухудшают репродуктивную функцию[109,110,111].

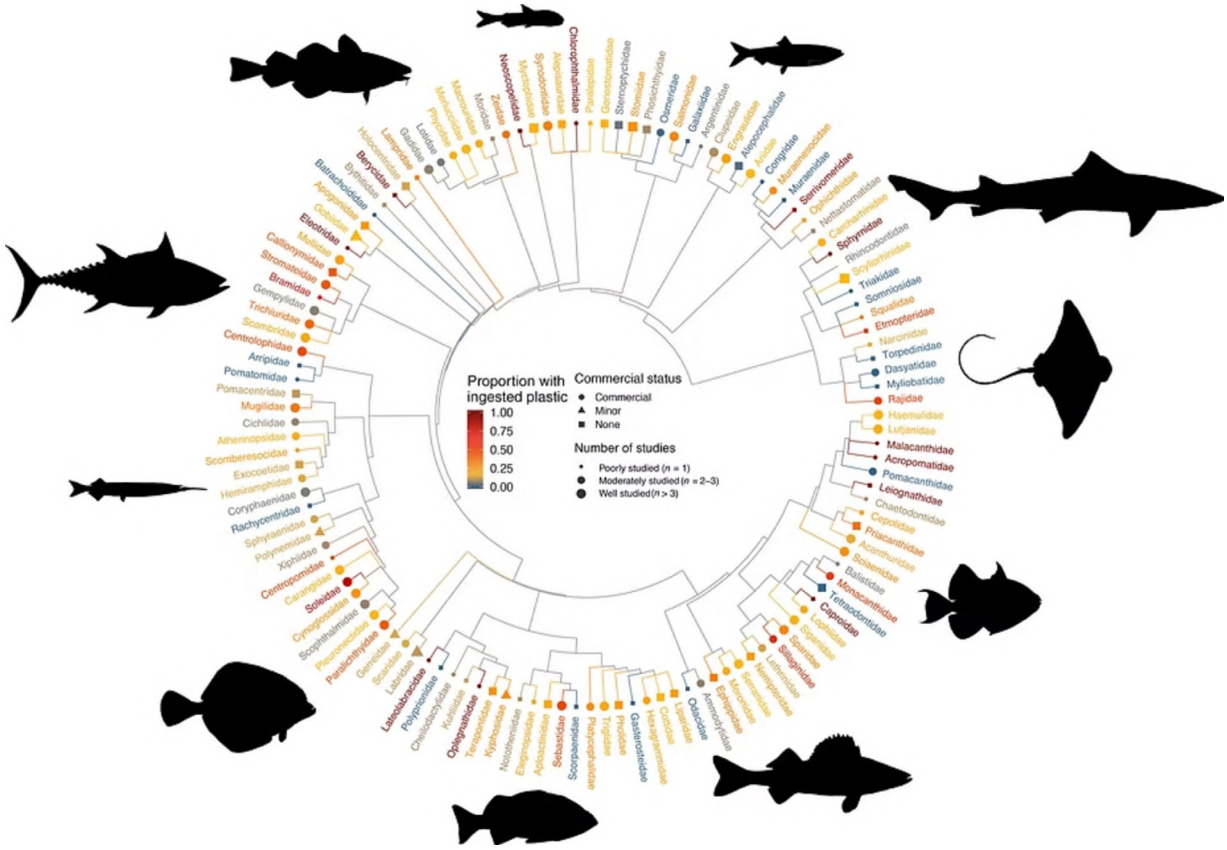


Рисунок 28. Семейства рыб и проглатывание пластика
Филогенетические связи семейств морских рыб (n = 131), окрашенные в зависимости от частоты проглатывания пластика. Формы каждого кончика обозначают долю видов в пределах семейства в наборе данных, которые вылавливаются в коммерческих целях (0 — нет видов, вылавливаемых в коммерческих целях; незначительные — 25 % видов, вылавливаемых в коммерческих целях; коммерческие — > 25 % видов, вылавливаемых в коммерческих целях). Размер вершины указывает на количество исследований, проведённых по видам в этом семействе. Это выделяет 15 семейств, которые хорошо изучены (n > 10 особей, > 2 видов) с высокой частотой проглатывания пластика (FO plastic > 0,25); 67 из этих семейств с записями о проглатывании пластика также являются коммерческими. 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

[109]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
[110]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
[111]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

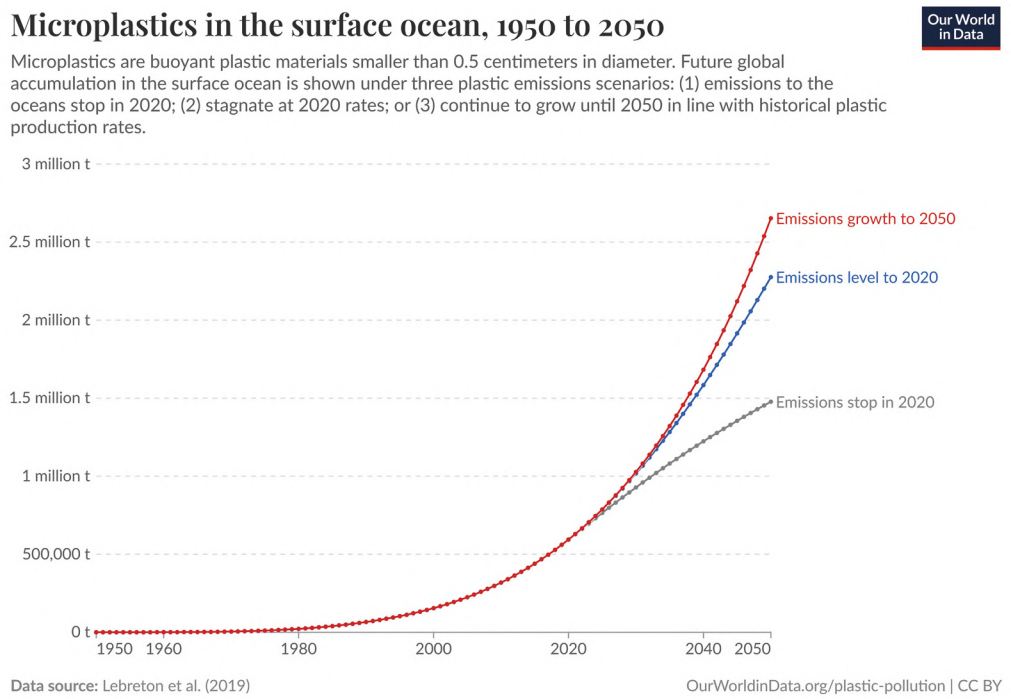


Рисунок 29. График роста количества микропластика на поверхности океана с прогнозом до 2050 года. https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean (Дата доступа 01.05.2025)

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

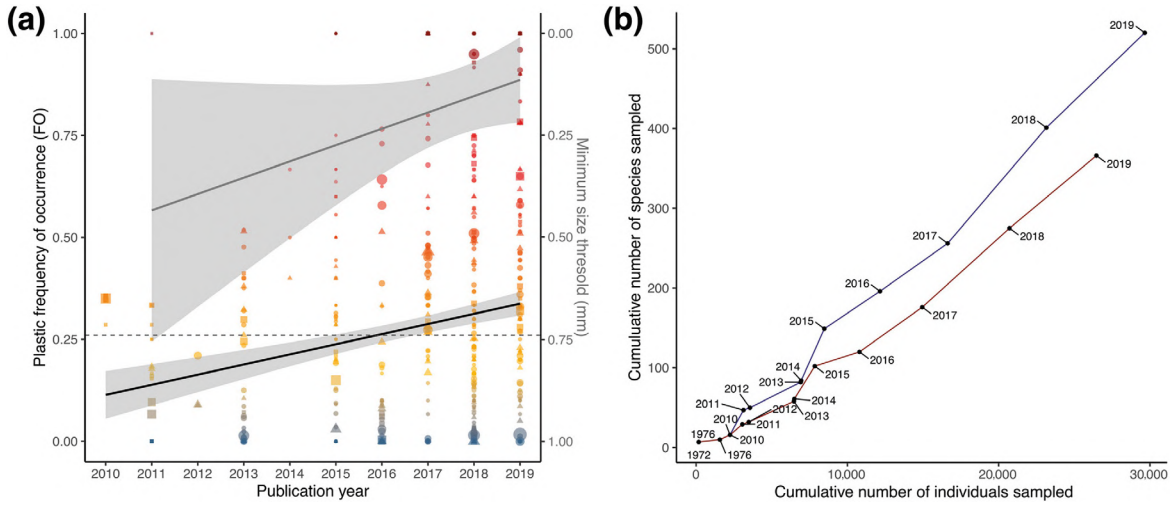


Рисунок 30. Временные тенденции потребления пластика рыбами. (a) Верхняя серая линия указывает на то, что с 2011 года наблюдается тенденция к обнаружению всё более мелких частиц. Нижняя чёрная линия показывает увеличение частоты встречаемости пластика (FO) среди всех видов рыб с 2010 по 2019 год. В течение этого периода частота потребления пластика значительно возросла со скоростью 2,4 % в год. Горизонтальная пунктирная линия представляет FO 0,26, среднюю частоту потребления пластика рыбами во всём мире. (b) Кривая накопления видов, где синяя линия указывает на совокупное количество видов, изученных с течением времени, включая виды, обнаруженные с поглощённым пластиком и без него, а красная линия изображает только виды с поглощением пластика. Отсутствие асимптоты на красной линии указывает на высокую вероятность того, что в ближайшие годы будут продолжать появляться дополнительные виды, которые будут поглощать пластик. 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

Кораллы под ударом: микроугроза глобального масштаба

Пластиковое загрязнение создаёт нарастающую опасность для коралловых рифов, проникая в их пищевые цепи и усиливая распространение болезней и разрушение структуры рифовых сообществ. Анализ выявил антропогенный мусор на 77 из 84 исследованных рифов, включая изолированные атоллы центральной части Тихого океана[112]. У пяти из шести изученных видов зарегистрированы негативные последствия для здоровья[113], такие как обесцвечивание и некроз тканей[114] (рис. 31).

Более крупные пластиковые фрагменты способствуют передаче заболеваний и физическим повреждениям, усиливая уязвимость кораллов к патогенам[115]. Эти эффекты затрагивают скелетный микробиом, который играет ключевую роль в поддержании здоровья коралловых колоний[116] (рис. 32). Исследования также выявляют, что биоплёнки на микропластике, известные как «пластисферы»[110], способны вызывать дисбиоз микробиома кораллов[117]. При контакте с пластиком риск заболеваний кораллов возрастает с 4 до 89 % (рис. 33). Гибель коралловых рифов существенно влияет на сокращение биоразнообразия, так как они обеспечивают среду обитания для четверти морских видов[115].

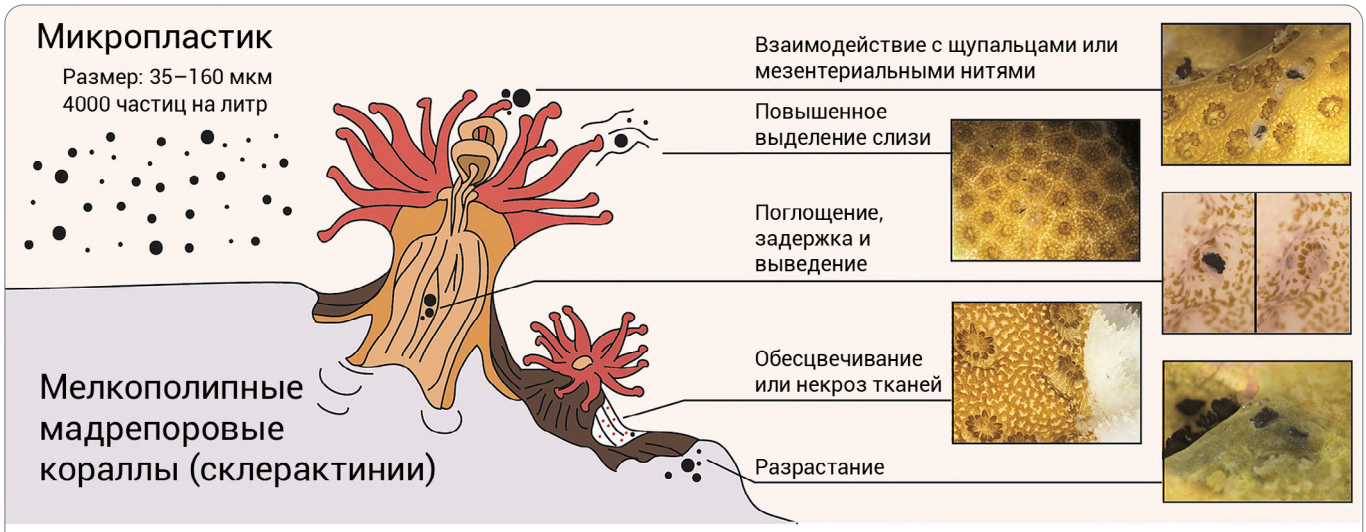


Рисунок 31. Воздействие пластика на состояние коралловых рифов
Кораллы могут реагировать на частицы пластика различными механизмами очистки (например, ресничным действием, выработкой слизи или расширением тканей), удержанием частиц за счёт разрастания или экскрецией ошибочно проглоченных частиц.

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

[112]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
[113]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
[114]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
[115]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
[116]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
[117]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

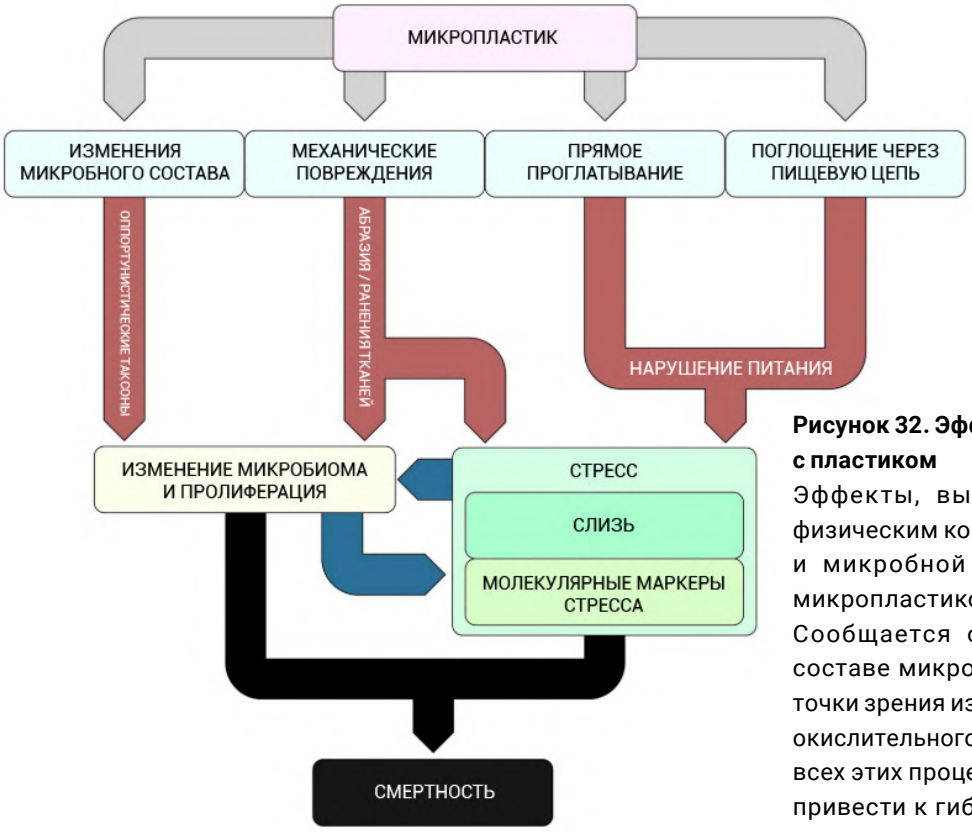


Рисунок 32. Эффекты, вызванные контактом с пластиком

Эффекты, вызванные проглатыванием, физическим контактом с коралловой тканью и микробной реакцией на присутствие микропластиковых частиц в морской воде. Сообщается о последующих сдвигах в составе микробиома кораллов и стрессе с точки зрения изменений в экспрессии генов и окислительного повреждения ДНК. Сочетание всех этих процессов может в конечном итоге привести к гибели кораллов. 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

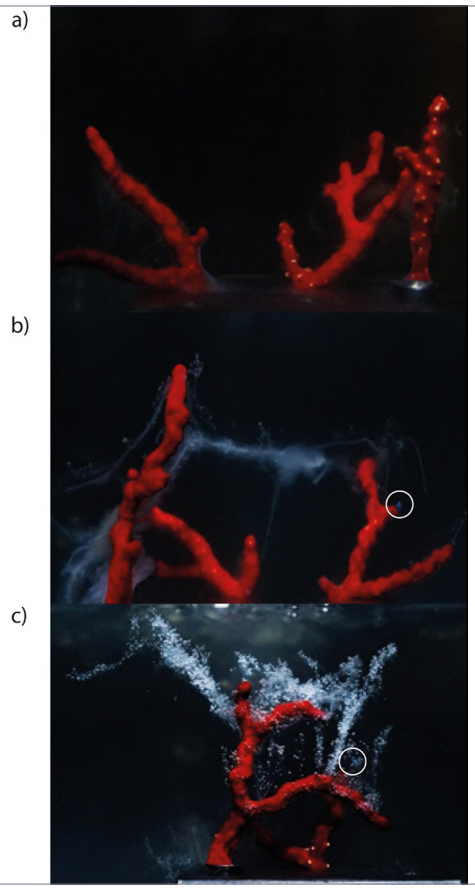


Рисунок 33. Выделение слизи увеличивается с увеличением концентрации частиц микропластика

a — Низкая, b — средняя и c — высокая концентрация частиц микропластика. Выделение слизи увеличивается с увеличением концентрации частиц микропластика. Белые круги обозначают частицы микропластика, захваченные слизью (частицы полиэтилена).

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

Влияние МНП на кислородный баланс экосистем

Наблюдения показывают, что пластик в окружающей среде деградирует преимущественно под воздействием солнечного излучения. Этот процесс изменяет его химический состав и структуру. Исследования подтверждают, что реакции, вызванные солнечным светом, усиливают выщелачивание растворённых органических соединений, что влияет на биогеохимию морской воды и стимулирует рост гетеротрофных бактерий[118] (рис. 34).

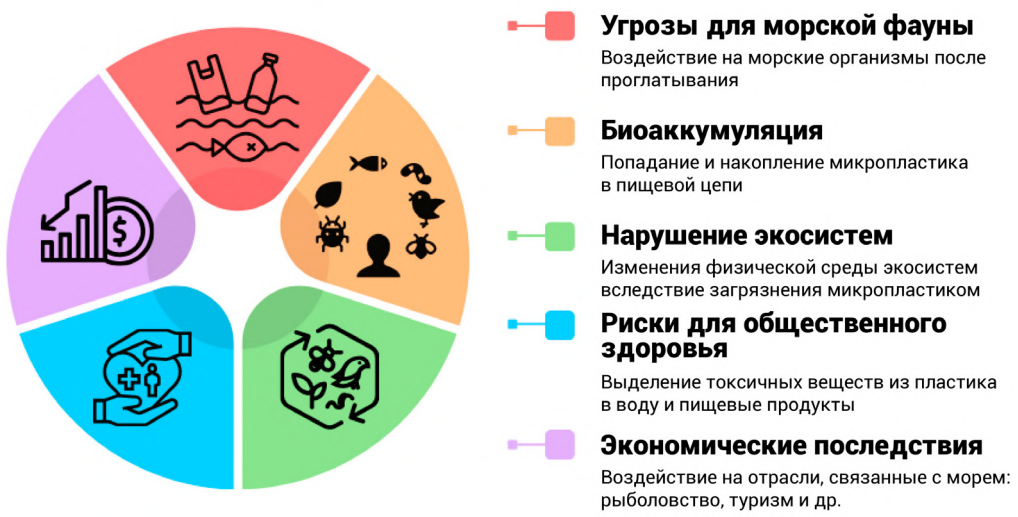


Рисунок 34. Угрозы, создаваемые морским микропластиком
Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023). https://doi.org/10.3390/su151713252

Многолетние исследования показывают, что химические соединения, выделяемые пластиком в морскую воду при его разложении, происходят либо из самого материала, либо из добавок, используемых для придания полимеру цвета или устойчивости. Некоторые из этих соединений представляют собой органические кислоты, что объясняет их роль в снижении pH. Таким образом, пластик усиливает закисление океана (рис. 35), а это, в свою очередь, способно значительно нарушить функционирование естественных систем Земли[119].

[118] Yu, R.-S. & Singh, S. Microplastic Pollution: Threats and Impacts on Global Marine Ecosystems. Sustainability 15, 13252 (2023). https://doi.org/10.3390/su151713252
[119] 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

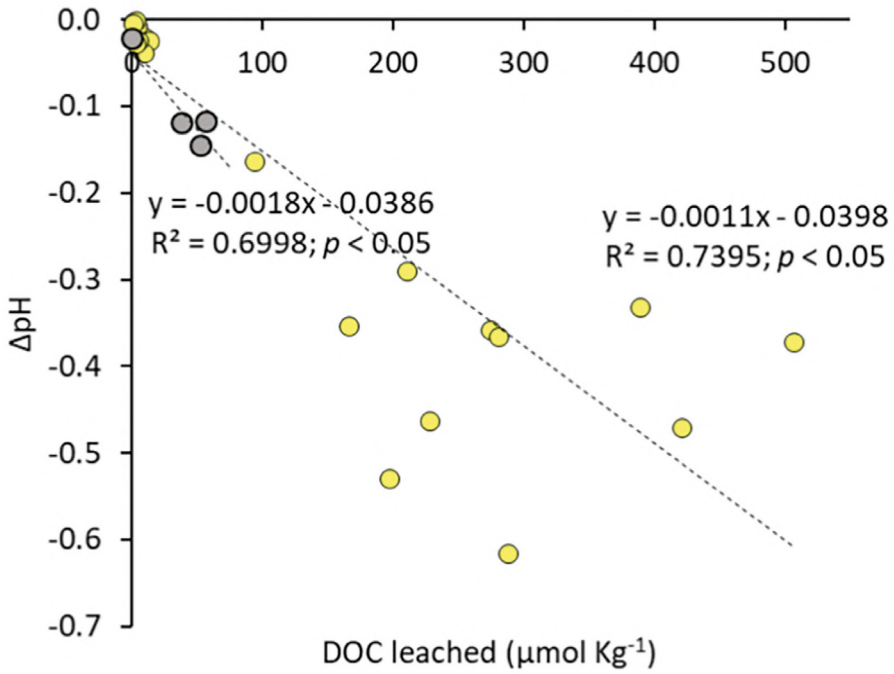


Рисунок 35. Взаимосвязи между изменением pH и DOC, выщелоченного из пластика, нанесены на график для каждого отдельного повторного образца всех экспериментов. Также включены контрольные образцы без пластика для каждого эксперимента. Жёлтые точки соответствуют облучённым обработкам, а серые точки — тёмным обработкам. 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

«Благодаря этому исследованию нам удалось доказать, что в сильно загрязнённых пластиком районах поверхности океана деградация пластика приведёт к снижению уровня pH до 0,5 единиц, что сопоставимо с падением pH, которое предполагается при наихудших сценариях антропогенных выбросов к концу XXI века», — отмечает Кристина Ромера-Кастильо, научный сотрудник ICM-CSIC и первый автор исследования, которое было опубликовано в журнале Science of the Total Environment (рис. 35).[120]

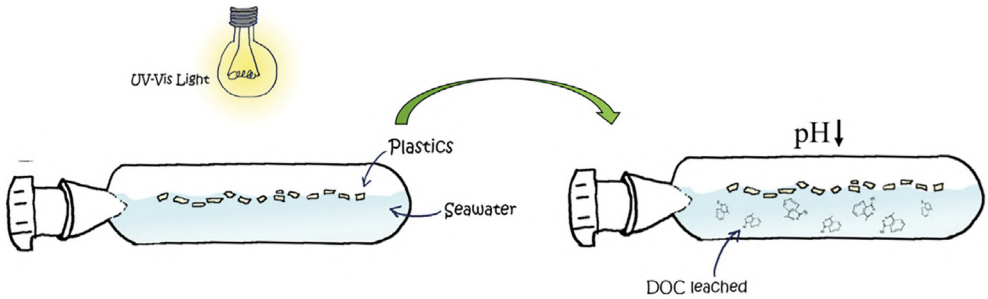


Рисунок 36. Выщелачивание пластика может привести к снижению pH морской воды до 0,5 единиц. Источник: Romera-Castillo, C. et al. Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification. Science of The Total Environment 854, 158683 (2023). https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683

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

Закисление океана — это нарушение условий морской среды, устойчивое и нарастающее экологическое давление[121]. Последствия для экосистем проявляются десятилетиями, столетиями и дольше. Наблюдения подтверждают сокращение биоразнообразия в прибрежных системах из-за снижения pH[122,123]. Это снижает устойчивость экосистем, угрожает их функциям, включая среду обитания, круговорот питательных веществ и хранение углерода[123].

Исследования показывают, что при закислении океана мидии (Mytilus edulis) медленнее растут и хуже выживают (рис. 37). Это уменьшает их численность, что снижает способность фильтровать воду и поддерживать качество прибрежной среды[124].

Современные значения pH на поверхности океана являются беспрецедентными, по крайней мере за последние 26 000 лет[125]. Этот процесс оказывает значительное воздействие на коралловые рифы, глубоководные и высокоширотные экосистемы, которые зависят от уникальных видов. Эти виды играют незаменимую роль, и их исчезновение нарушает ключевые функции экосистем, поскольку аналогов, способных их заменить, не существует[126].

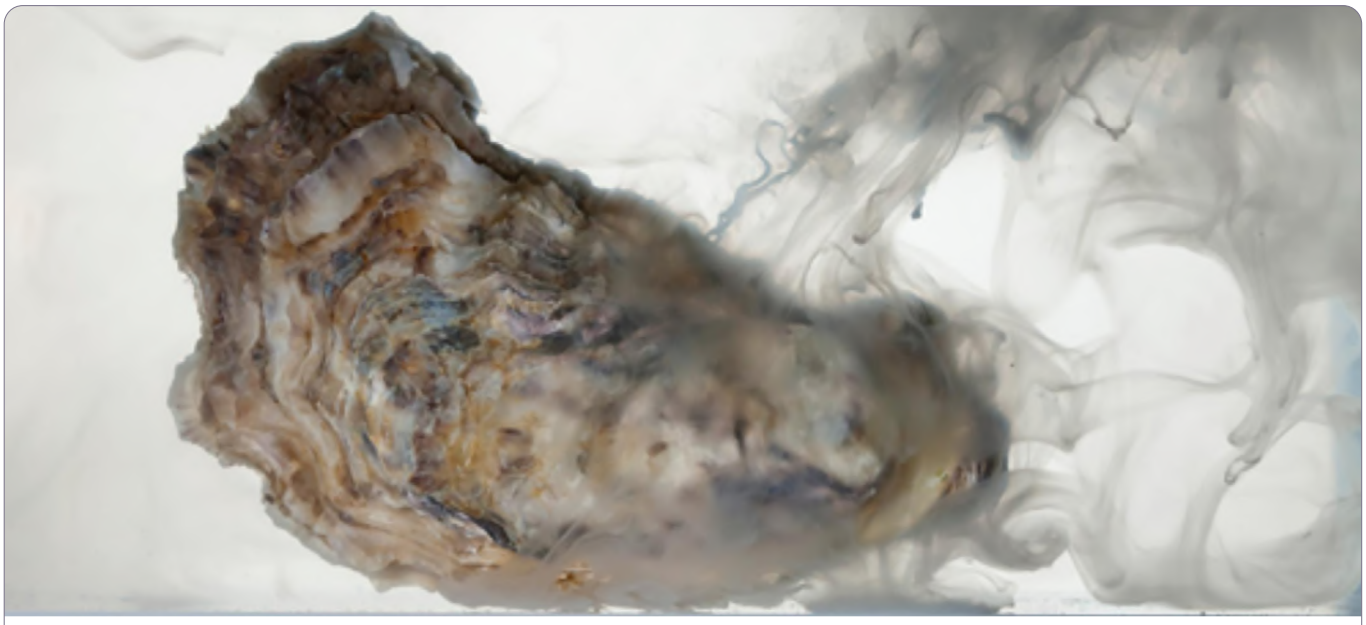


Рисунок 37. Тихоокеанская устрица выпускает мутную сперму в устричном питомнике Whiskey Creek в Орегоне. В некоторых прибрежных водах закисление уже достигло серьёзного уровня; здесь оно сократило производство вдвое, замедляя рост устричных личинок.https://www.nationalgeographic.com/magazine/article/ocean-acidification
Устрицы и мидии заметно сокращаются в численности по градиентам падающей карбонатной насыщенности. Закисление океана может привести к сокращению численности устриц и экосистемных услуг, которые они предоставляют в дикой природе; оно также может ухудшить их качество как морепродуктов.

[121]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
[122]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
[123]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
[124]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
[125]The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1 (Дата доступа 01.05.2025).
[126]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

Исследования подтверждают значительное негативное воздействие микропластика на биологические параметры микроводорослей[127], включая рост, содержание хлорофилла, активность фотосинтеза и уровень активных форм кислорода[128,129].

Согласно исследованию, воздействие МП приводит к глобальному сокращению фотосинтеза на 7,05–12,12 % в морских и пресноводных водорослях[130]. Фотосинтез, как известно, является главным процессом на Земле, производящим молекулярный кислород (O_2), который выделяется в атмосферу.

Кроме того, микропластик в морских отложениях изменяет микробные сообщества и нарушает круговорот азота, потенциально усиливая проблемы, вызванные человеком, такие как токсичное цветение водорослей. Изменения в сообществах планктона на поверхности океана могут усугубить деоксигенацию (уменьшение количества кислорода в воде), лишая морские организмы кислорода[131].

Данные свидетельствуют, что с 1960 по 2010 год океан утратил 2 % растворённого кислорода из-за повышения температуры воды и накопления загрязнителей, включая промышленные, бытовые и сельскохозяйственные стоки[132]. Снижение кислорода приводит к образованию мёртвых зон — участков океана, где морская флора и фауна практически исчезли. Наблюдения показывают, что в 1960-х годах в Мировом океане насчитывалось 45 мёртвых зон, тогда как к 2011 году их число возросло примерно до 700[131]. Согласно данным, опубликованным на сайте UNDP, количество мёртвых зон с 1960-х годов удваивается каждые десять лет. На основе этой тенденции можно с высокой степенью уверенности предположить, что к 2025 году их число может достичь 1 500[134].

Загрязнение пластиком влияет на множество процессов в системе Земли. Согласно исследованию, оно может усилить такие острые экологические проблемы, как потеря биоразнообразия и изменение климата[134].

---

[127]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
[128]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
[129]Sarkar, P., Xavier, K. A. M., Shukla, S. P. & Rathi Bhuvaneswari, G. Nanoplastic exposure inhibits growth, photosynthetic pigment synthesis and oxidative enzymes in microalgae: A new threat to primary producers in aquatic environment. Journal of Hazardous Materials Advances 17, 100613 (2025). https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100613
[130]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
[131]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 (Дата доступа 01.05.2025)
[132]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
[133]The International Union for Conservation of Nature (IUCN). Ocean deoxygenation. https://iucn.org/resources/issues-brief/ocean-deoxygenation (Дата доступа 01.05.2025)
[134]United Nations Development Programme. Ocean hypoxia: Dead zones. https://www.undp.org/publications/issue-brief-ocean-hypoxia-dead-zones (Дата доступа 01.05.2025)
[135]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

ВЛИЯНИЕ МИКРО- И НАНОПЛАСТИКА (МНП) НА КЛИМАТ

Функции океана

Океан играет ключевую роль в поддержании климатического равновесия планеты, функционируя как естественный «кондиционер». Его уникальная способность аккумулировать и постепенно высвобождать тепло позволяет смягчать температурные колебания на планете. Всего лишь десятиметровый слой океанических вод способен поглощать тепла больше, чем вся атмосфера Земли (рис. 38). Это уменьшает перепады температур как в дневные и ночные периоды (рис. 39), так и в сезонные — летом и зимой.

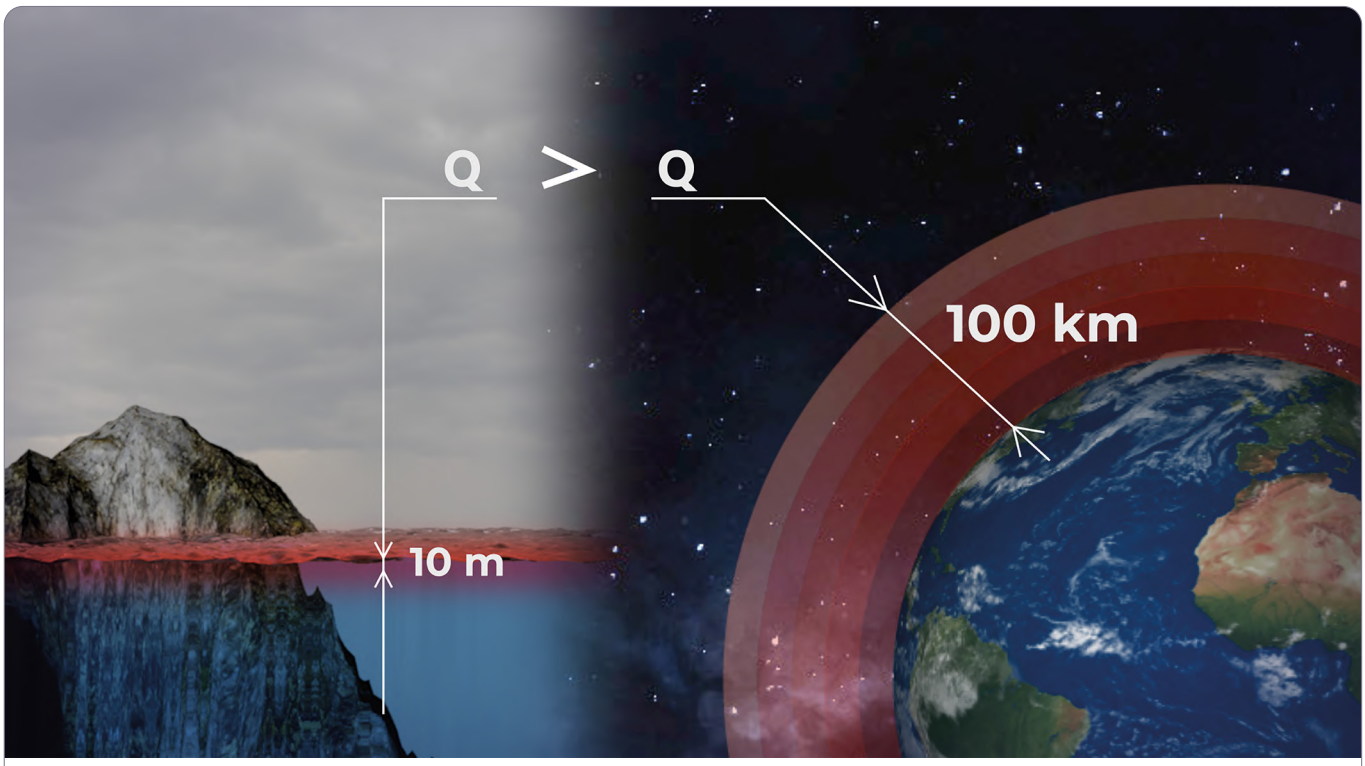


Рисунок 38. Сравнительная теплоёмкость океана и атмосферы: несмотря на меньшую массу воздуха, океан способен накапливать и удерживать в десятки раз больше тепла, играя ключевую роль в регулировании климата Земли

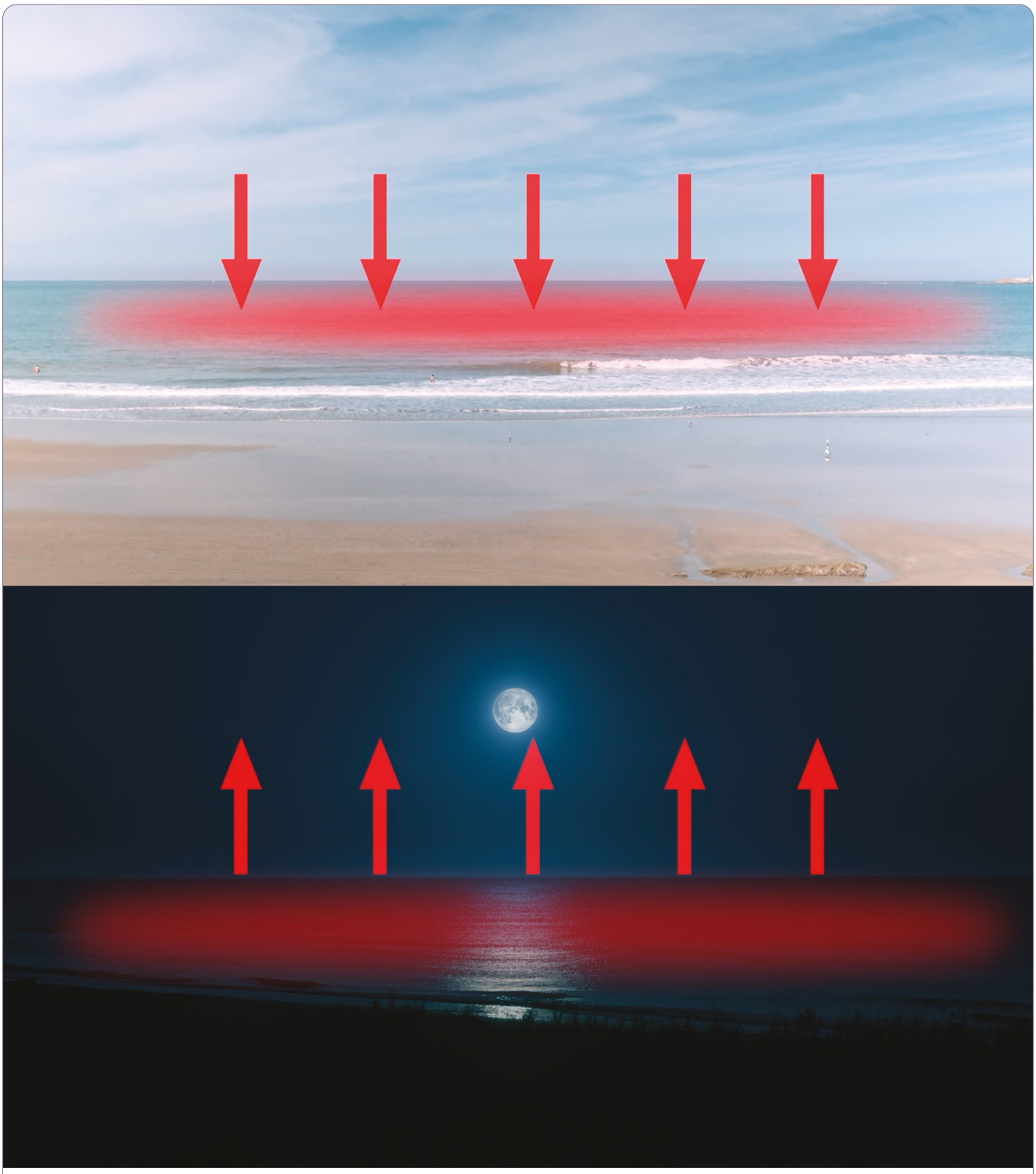


Рисунок 39. Схематическое отображение суточного теплообмена: океан поглощает тепло днём и отдаёт его ночью, сглаживая перепады температуры воздуха

Океанические течения переносят тёплую воду из тропиков к более холодным регионам, например, к северным широтам. Это помогает смягчать климат в прибрежных зонах. Холодные течения, наоборот, возвращают охлаждённую воду обратно к экватору. Таким образом океан регулирует климат на планете.

Океан оказывает значительное влияние на атмосферные процессы, играя ключевую роль в образовании облаков и осадков. Каждый день с его поверхности испаряется огромное количество воды, которая затем конденсируется в облака и возвращается на Землю в виде дождя или снега. Этот процесс является важным для пополнения водных ресурсов рек, озёр и почвы пресной водой.

Микроскопические водоросли в океане, такие как фитопланктон (рис. 40), производят более 50 % кислорода[136]. Многие модели химии и биологии океана предсказывают, что по мере нагревания поверхности океана в ответ на увеличение парниковых газов в атмосфере, производительность фитопланктона будет снижаться[137,138] (рис. 41).

Рисунок 40. Фитопланктон чрезвычайно разнообразен: от фотосинтезирующих бактерий (цианобактерий) до диатомовых водорослей, похожих на растения, и панцирных кокколитофорид (рисунки не в масштабе). (Коллаж адаптирован из рисунков и микрофотографий Салли Бенсусен, Научное бюро проекта NASA EOS.)
NASA. What are Phytoplankton? https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton

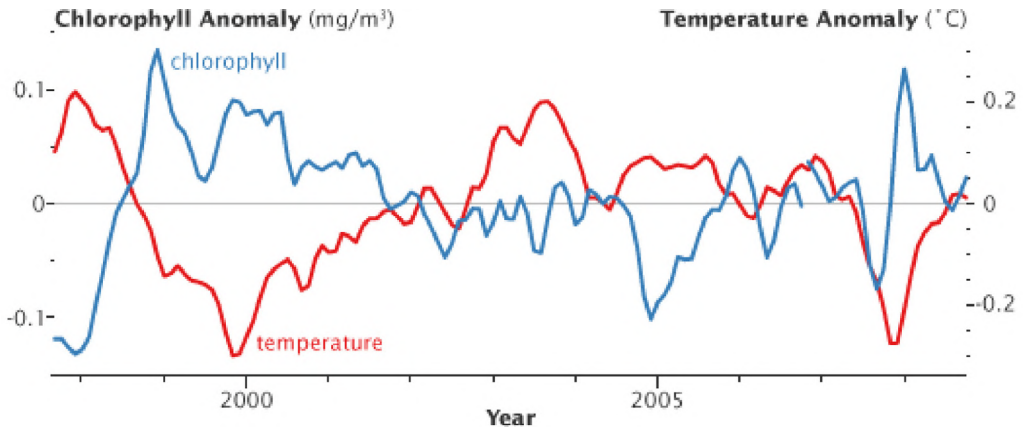


Рисунок 41. Около 70 % океана постоянно стратифицировано на слои, которые плохо смешиваются. В период с конца 1997 года до середины 2008 года спутники наблюдали, что более высокие, чем в среднем, температуры (красная линия) приводили к концентрации хлорофилла ниже среднего (синяя линия) в этих областях. (График адаптирован из Behrenfeld et al. 2009 Роберта Симмона) https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton

[136]NOAA. How much oxygen comes from the ocean? https://oceanservice.noaa.gov/facts/ocean-oxygen.html (Дата доступа 01.05.2025)
[137]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
[138]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

Изменение температурного режима океана

Доклад о состоянии Мирового океана за 2024 год демонстрирует тревожную картину — беспрецедентный нагрев океана. Исследования показывают, что в период с 1960 по 1986 год наблюдался устойчивый рост температуры океанов. Однако в последние несколько десятилетий этот процесс ускорился в два раза[139] (рис. 42).

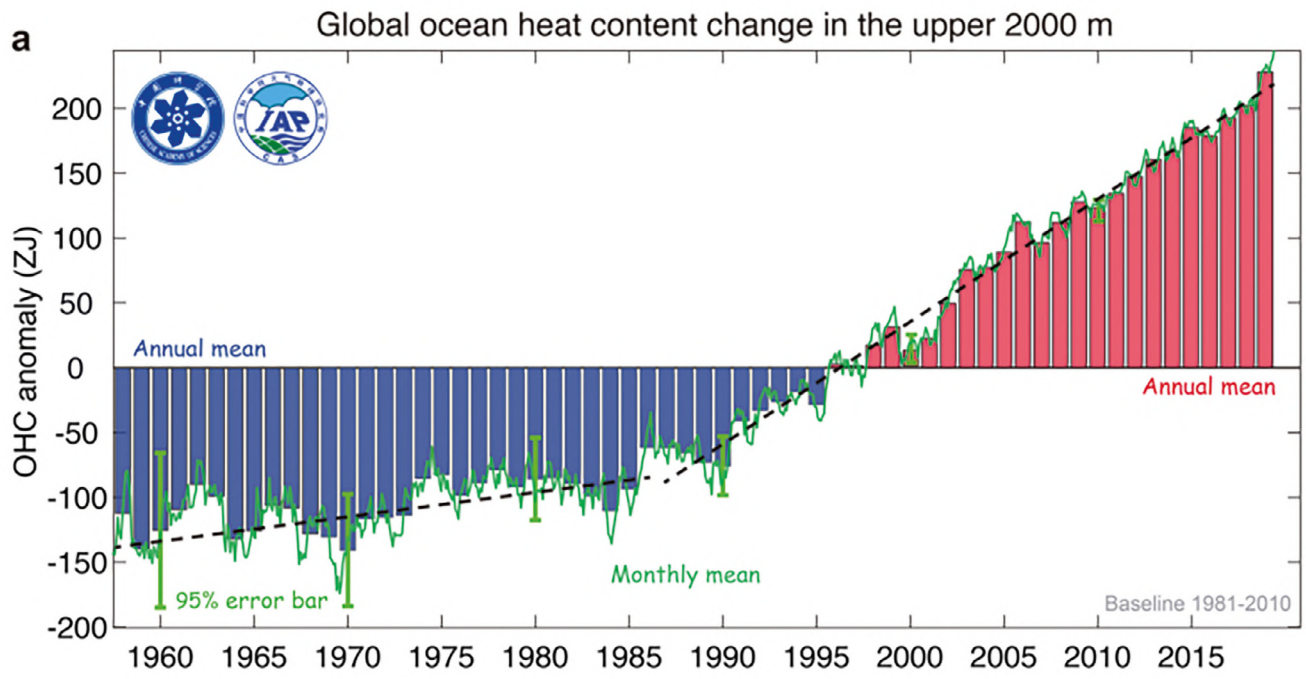


Рисунок 42. Изменение теплосодержания в верхних 2 000 метров Мирового океана
Источник: Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J., Trenberth, K. E., Fasullo, J., Boyer, T., Locarnini, R., Zhang, B., Yu, F., Wan, L., Chen, X., Song, X., Liu, Y., & Mann, M. E. (2020). Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. Advances in Atmospheric Sciences, 37(2), 137–142. https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7

2023 год стал самым тёплым годом за всю историю наблюдений, превзойдя предыдущий рекорд, установленный в 2016 году. Также был зафиксирован абсолютный рекорд температуры поверхности океана[140]. Этот тренд продолжился — 2024 год побил рекорды 2023 года (рис. 43) и стал самым тёплым за весь период наблюдений[141]. В этот период температура поверхности океана оставалась рекордно высокой в течение 15 месяцев подряд, что подчёркивает устойчивость наблюдаемого потепления.

[139]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
[140]NOAA. Earth had its warmest year on record; Upper-ocean heat content was record high while Antarctic sea ice was record low. https://www.ncei.noaa.gov/news/global-climate-202312 (Дата доступа 01.05.2025)
[141]World Meteorological Organization (WMO) confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level.

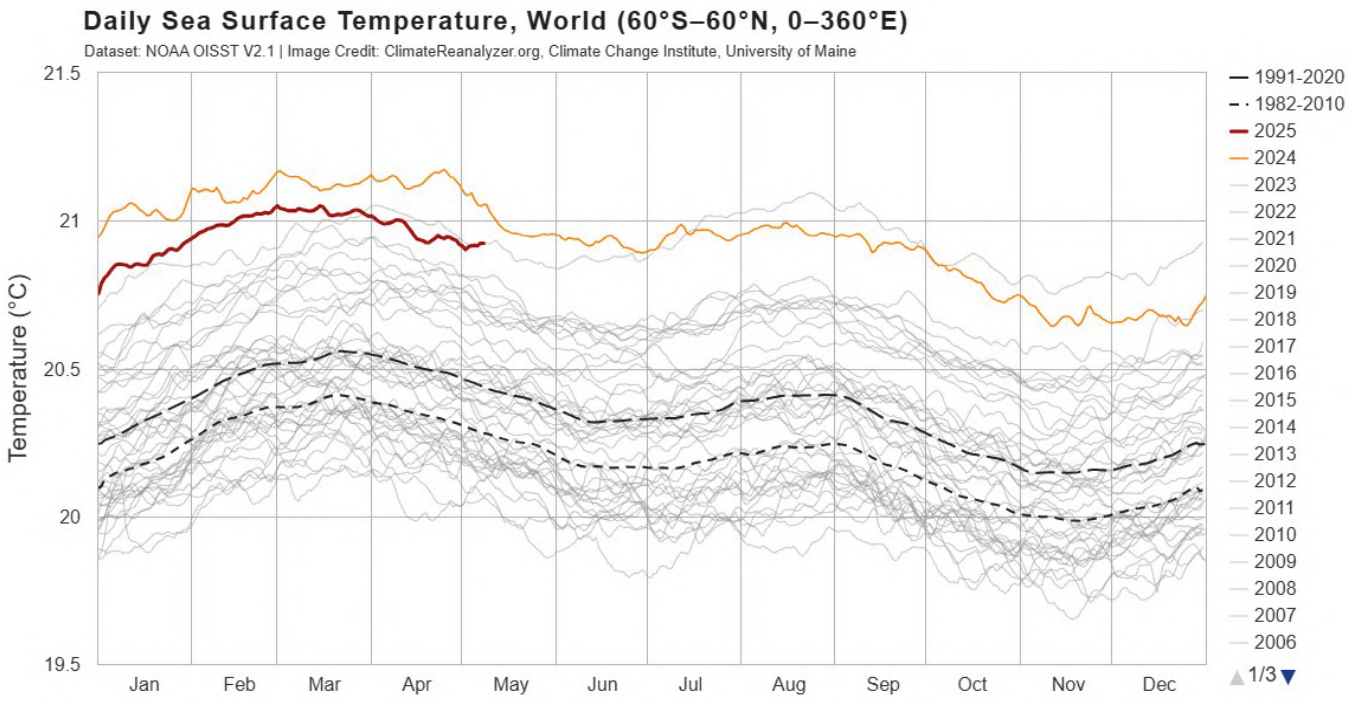


Рисунок 43. Ежедневные значения температуры поверхности моря: графическое отображение изменений температуры верхнего слоя океана, отражающее сезонные колебания по годам

Источник: NOAA OISST V2.11 Image Credit: Climate Reanalyzer.org, Climate Change Institute. University of Maine https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2

Впервые в истории среднегодовая температура на 1,5 °C превысила уровень доиндустриального периода[142] (рис. 44). Этот показатель по мнению экспертов, является критическим порогом, после которого человечество ожидают масштабные климатические потрясения[143].

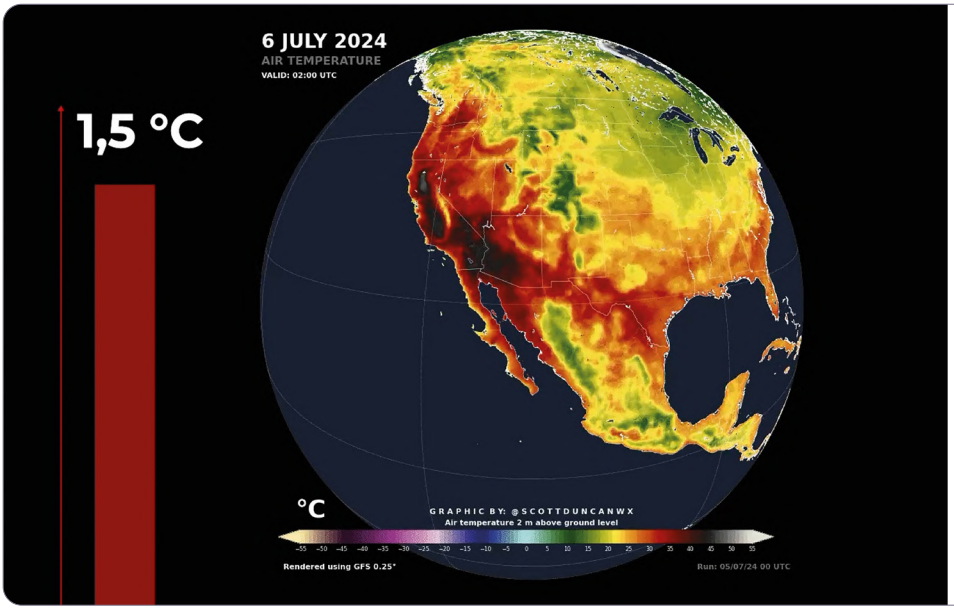


Рисунок 44. Схематическое отображение климатического рубежа: в 2024 г. среднегодовая глобальная температура впервые превысила порог в 1,5 °C по сравнению с доиндустриальным уровнем

[142]World Meteorological Organization (WMO). State of the Global Climate 2024. https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024 (Дата доступа 01.05.2025)
[143]IPCC. Global Warming of 1.5°C. (Cambridge University Press, 2022). https://doi.org/10.1017/9781009157940 (Дата доступа 01.05.2025)

Такое повышение температуры ожидалось к середине 21 века[144], однако этот порог уже пересечён. По оценкам ООН, если нынешние тенденции сохранятся, глобальная температура может повыситься почти на 3 °C в течение этого столетия[144].

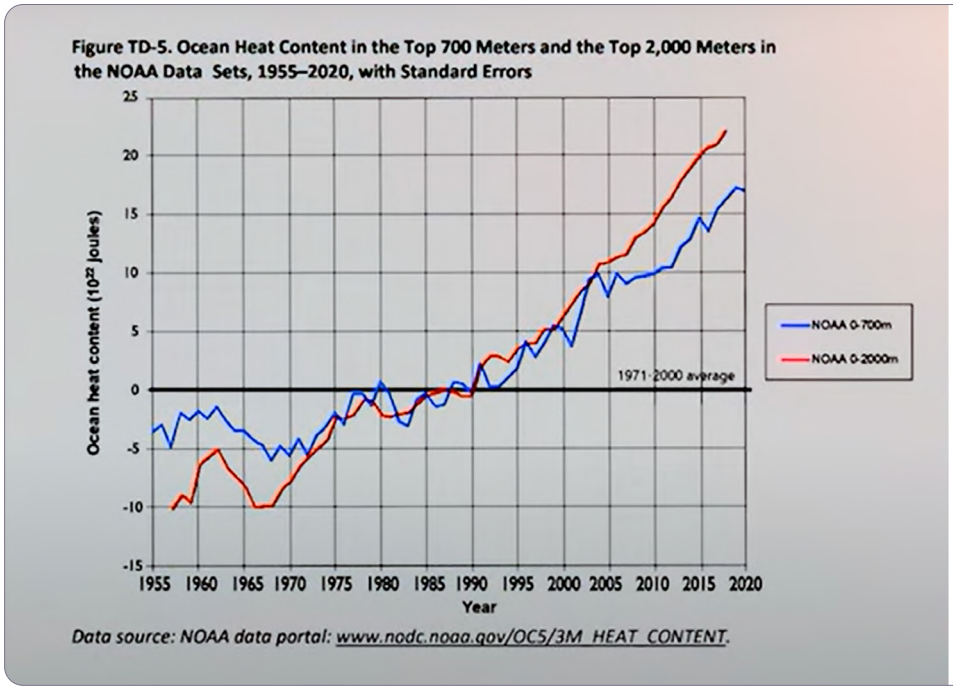


Рисунок 45. Теплосодержание океана в верхних 700 метрах и верхних 2000 метрах. Наборы данных NOAA, 1955-2020 гг., стандартные.

Источник: портал данных NOAA www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT

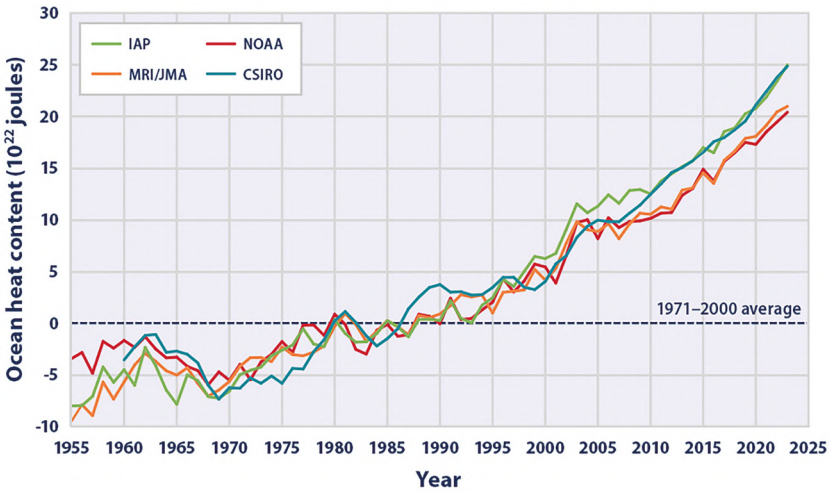


Рисунок 46. Данная диаграмма показывает изменения теплового содержания верхних 700 метров мирового океана с 1955 по 2023 год. Тепловое содержание океана измеряется в джоулях — единице энергии и сравнивается со средним значением за период 1971–2000 гг., которое установлено как ноль для ориентировки. Выбор другого базового периода не изменит формы данных с течением времени. Линии были независимо вычислены с использованием разных методов государственными организациями четырёх стран: Национальной океанической и атмосферной администрацией США (NOAA), Содружественной организацией научных и промышленных исследований Австралии (CSIRO), Институтом атмосферной физики Китая (IAP) и Метеорологическим исследовательским институтом Японского метеорологического агентства (MRI/JMA).
Источник: CSIRO, 2024;5 IAP, 2024;6 MRI/JMA, 2024;7 NOAA, 20248

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

За последние 60 лет океаны на средних глубинах нагрелись в 15 раз быстрее, чем за предыдущие 10 000 лет[145] (рис. 45–46). Это свидетельствует о том, что процессы глобального потепления затрагивают не только верхние слои воды, но и более глубокие части океана, куда не проникают солнечные лучи. Для нагрева воды на таких глубинах требуется огромная энергия, что подчёркивает масштабы проблемы. Согласно оценкам учёных, для того чтобы океан нагревался с нынешней скоростью, необходимо выделение энергии, эквивалентной взрыву 7 атомных бомб каждую секунду в течение года[146] — это колоссальные цифры, вызывающие вопрос: откуда берётся такая энергия?

Повышение температуры воды неизбежно приводит к росту уровня Мирового океана, что угрожает поглотить целые побережья. За последние два столетия уровень океана поднялся на 21 см, а за последние 30 лет — на 10,1 см[147]. Текущий темп роста в 2,5 раза превышает прежний, и эта тенденция продолжится. Если ситуация не изменится, миллионы людей станут беженцами, вынужденными покидать свои дома и искать убежища вдали от побережья.

«Подъём, который мы увидели в 2024 году, оказался выше, чем мы ожидали, — сказал Джош Уиллис, исследователь уровня моря в Лаборатории реактивного движения NASA в Южной Калифорнии. — Каждый год немного отличается, но ясно, что океан продолжает подниматься, и скорость подъёма становится всё быстрее и быстрее»[148] (рис. 47).

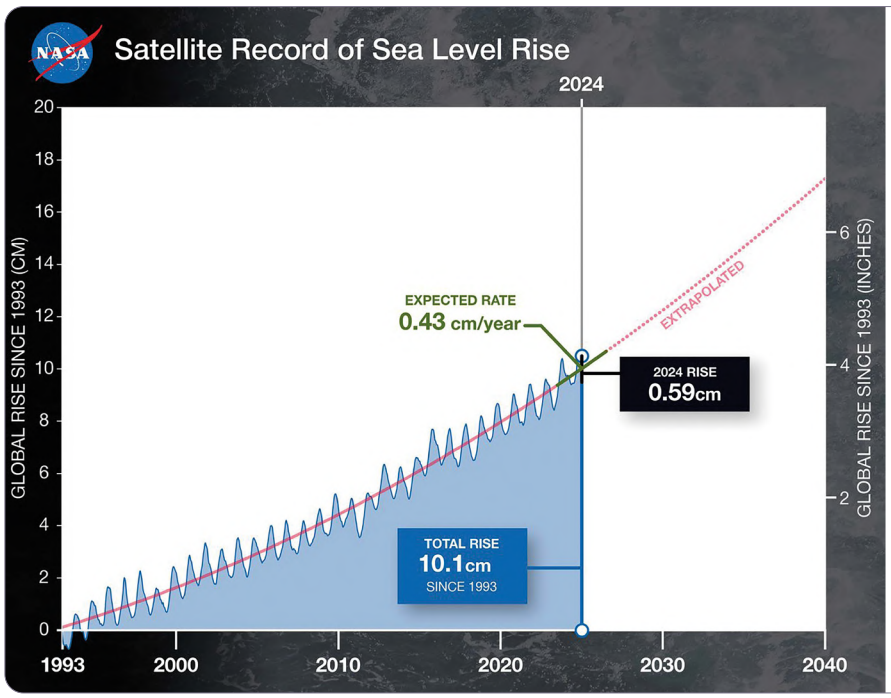


Рисунок 47. На этом графике показан средний уровень мирового моря (синим цветом) с 1993 года, измеренный серией из пяти спутников. Сплошная красная линия указывает траекторию этого повышения, которое более чем удвоилось за последние три десятилетия. Пунктирная красная линия прогнозирует будущее повышение уровня моря. Кредит: NASA/JPL-Caltech. Источник: 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

Нагрев океана также способствует более частым и интенсивным экстремальным погодным явлениям, таким как наводнения, тайфуны и аномальные осадки. Эти изменения угрожают экосистемам планеты и жизни миллиардов людей, и с каждым годом они становятся всё более ощутимыми.

[145]Rosenthal, Y., Linsley, B. K., & Oppo, D. W. (2013). Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. Science, 342(6158), 617–621. https://doi.org/10.1126/science.1240837; Oppo, D. (2013, October 31). Is Global Heating Hiding Out in the Oceans? https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130 (Дата доступа 01.05.2025)
[146]Взят прирост энергии океана в 1022 джоулей в 2022 году по сравнению с 2021 годом (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) и энергия ядерного взрыва 6.3×10^{13} джоулей.
[147]NASA. Tracking 30 Years of Sea Level Rise https://earthobservatory.nasa.gov/images/150192/tracking-30-years-of-sea-level-rise (Дата доступа 01.05.2025)
[148]NASA. NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024 https://sealevel.nasa.gov/news/282/nasa-analysis-shows-unexpected-amount-of-sea-level-rise-in-2024 (Дата доступа 01.05.2025)

Почему океан нагревается? Гипотеза

Основными общепризнанными факторами, которые влияют на нагрев океана, являются парниковые газы, такие как CO_2, которые удерживают тепло в атмосфере и повышают температуру верхних слоёв океанических вод. Однако существуют и другие факторы, которые также могут оказывать значительное влияние на этот процесс. Дополнительный фактор нагрева океана также будет рассмотрен в главе «Фактор X. Воздействие микро- и нанопластика на динамику цикла природных катаклизмов».

Со второй половины 20 века наблюдается резкий рост количества пластика в океанах, что совпадает с периодом ускоренного промышленного развития и массового производства пластиковых изделий (рис. 48). С 1960 по 2019 год также наблюдается изменение температуры океана. График (рис. 49) показывает параллельный рост средней температуры поверхности океанов, который также наблюдается с середины XX века.

При сопоставлении двух графиков (рис. 48–49) можно заметить корреляцию между ростом концентрации пластика в океанах и повышением температуры вод. Это даёт возможность предположить, что загрязнение океанов пластиком может быть одним из значительных, но недостаточно изученных факторов, влияющих на нагрев океанических вод.

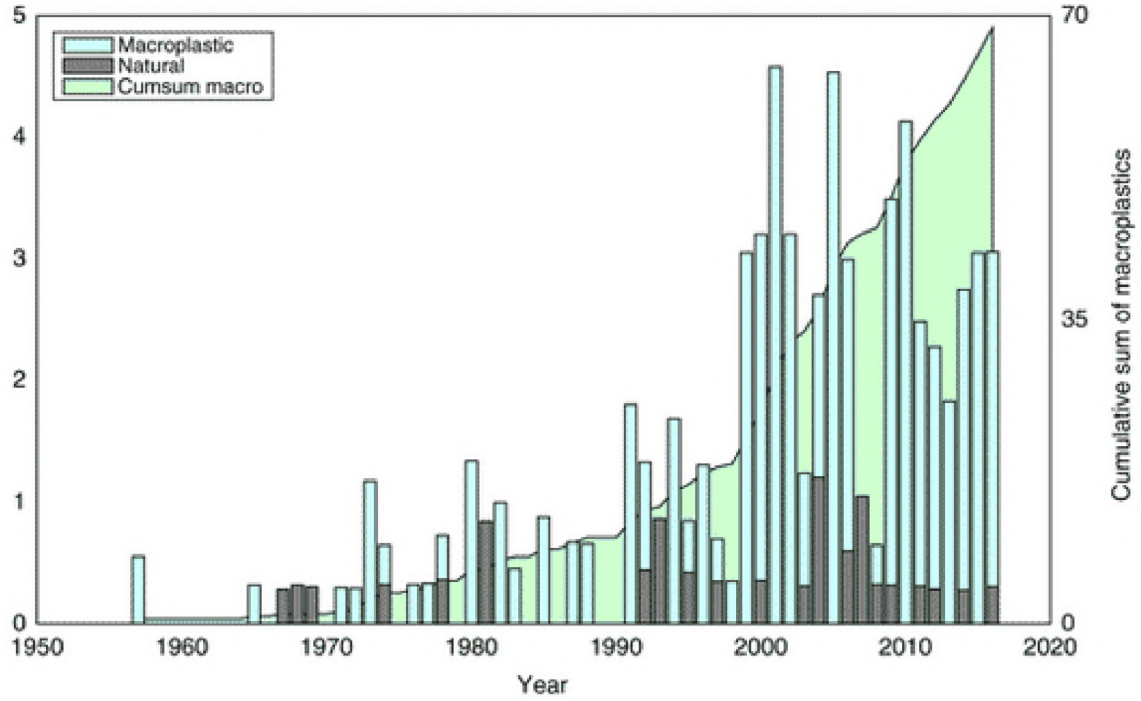


Рисунок 48. График роста концентрации пластика в океанах за последние десятилетия. Суммарное количество макропластика в океане и годовые показатели

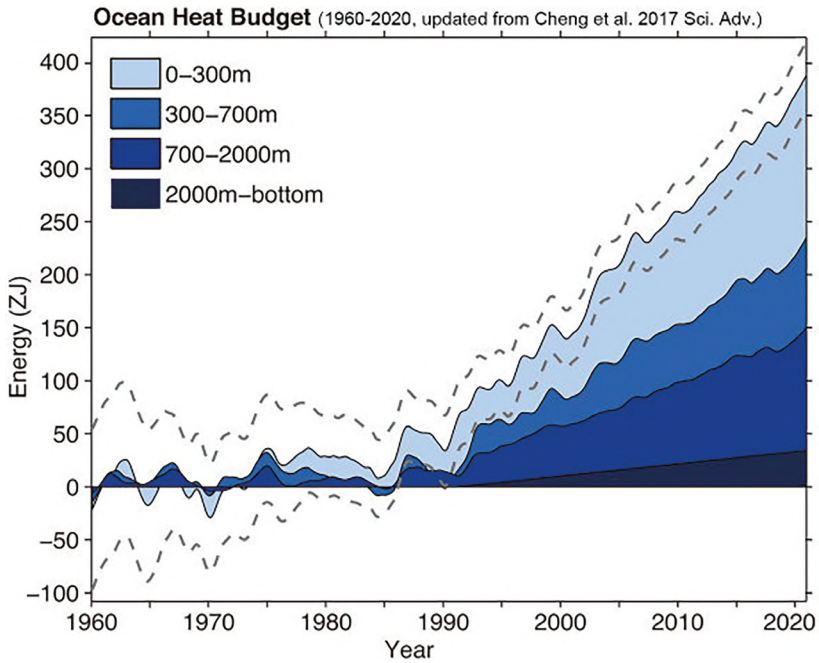


Рисунок 49. График изменения температуры Мирового океана за тот же период (1960–2019 гг.)

Для дальнейшего изучения этого вопроса важно понять, способен ли пластик влиять на физические свойства океанической воды, такие как теплопроводность и теплоёмкость. И могут ли эти изменения способствовать повышению температуры океана? Чтобы лучше понять эти процессы, углубимся в основные характеристики воды и её взаимодействие с загрязнителями.

Основные характеристики воды

Молекула воды имеет симметричную V-образную форму, где два атома водорода расположены с одной стороны относительно более крупного атома кислорода (рис. 50).

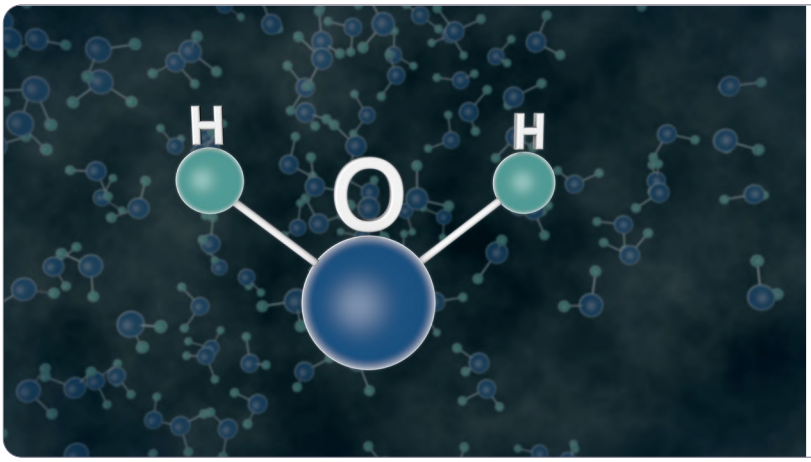


Рисунок 50.
Схематическое изображение молекулы воды: два атома водорода (H) соединены с одним атомом кислорода (O) под углом ~104,5°, образуя диполь с положительным и отрицательным зарядами

Эта структура отличается от линейных молекул, например таких как CO_2, где все атомы располагаются в цепочку. Такая форма молекулы воды делает её особенной и важной для многочисленных процессов на Земле. Особенности молекул воды позволяют воде оставаться жидкостью при температурах, которые обычно приводят к газообразованию других трёхатомных молекул (рис. 51).

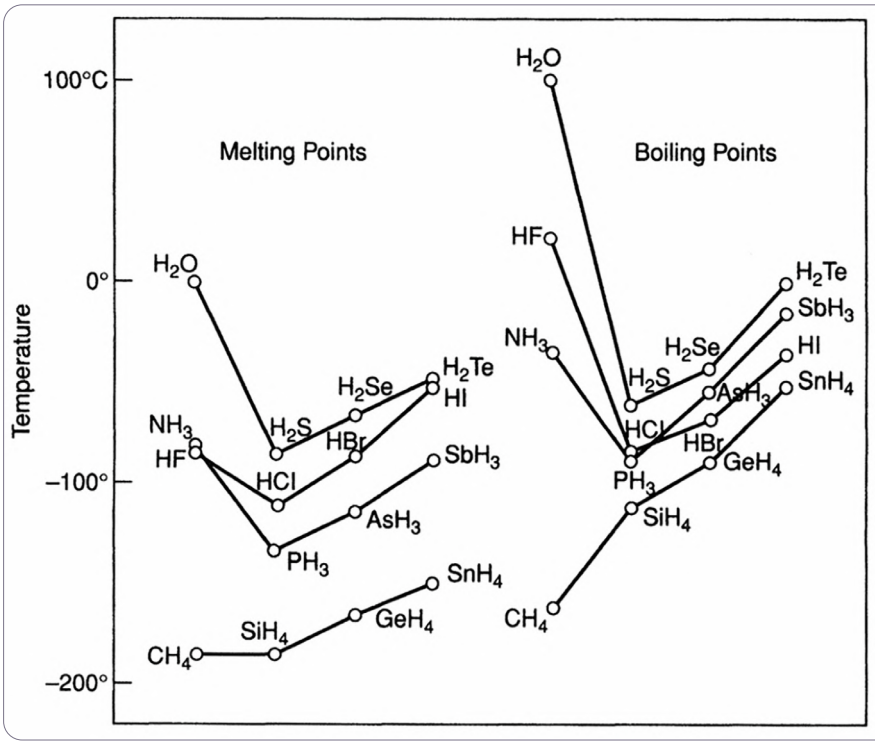


Рисунок 51. Температуры плавления (слева) и кипения (справа) изоэлектронных последовательностей молекул гидридов. Температуры для воды существенно выше, чем получается при экстраполировании температур аналогичных соединений. Источник: Pauling, L. The Nature of the Chemical Bond, 3rd edn, Chapter 12-2 (Cornell Univ. Press, 1960).)

Это происходит благодаря водородным связям[149], которые связывают молекулы воды, образуя прочную и упорядоченную структуру.

Большинство водородных связей являются слабыми притяжениями с прочностью связи, составляющей около одной десятой от прочности обычной ковалентной связи. Тем не менее, они очень важны. Без них все деревянные конструкции рухнули бы, цемент рассыпался бы, океаны испарились бы, а всё живое распалось бы на неживую материю[150].

Поэтому вода обладает способностью формировать кластеры, что объясняет её аномальные свойства (рис. 52–53). Кластеры воды могут охватывать более 95 % сети водородных связей, среди которых некоторые кластеры максимально охватывают тысячи молекул, простирающихся за пределы 3,0 нм[151].

[149] Pauling, L. The Nature of the Chemical Bond, 3rd edn, Chapter 12-2 (Cornell Univ. Press, 1960).
[150] Jeffrey, G. A. An Introduction to Hydrogen Bonding (Oxford University Press, New York, 1997). https://books.google.com/books?vid=ISBN0195095499
[151] Gao, Y., Fang, H., Ni, K. & Feng, Y. Water clusters and density fluctuations in liquid water based on extended hierarchical clustering methods. Sci Rep 12, 8036 (2022). https://doi.org/10.1038/s41598-022-11947-6

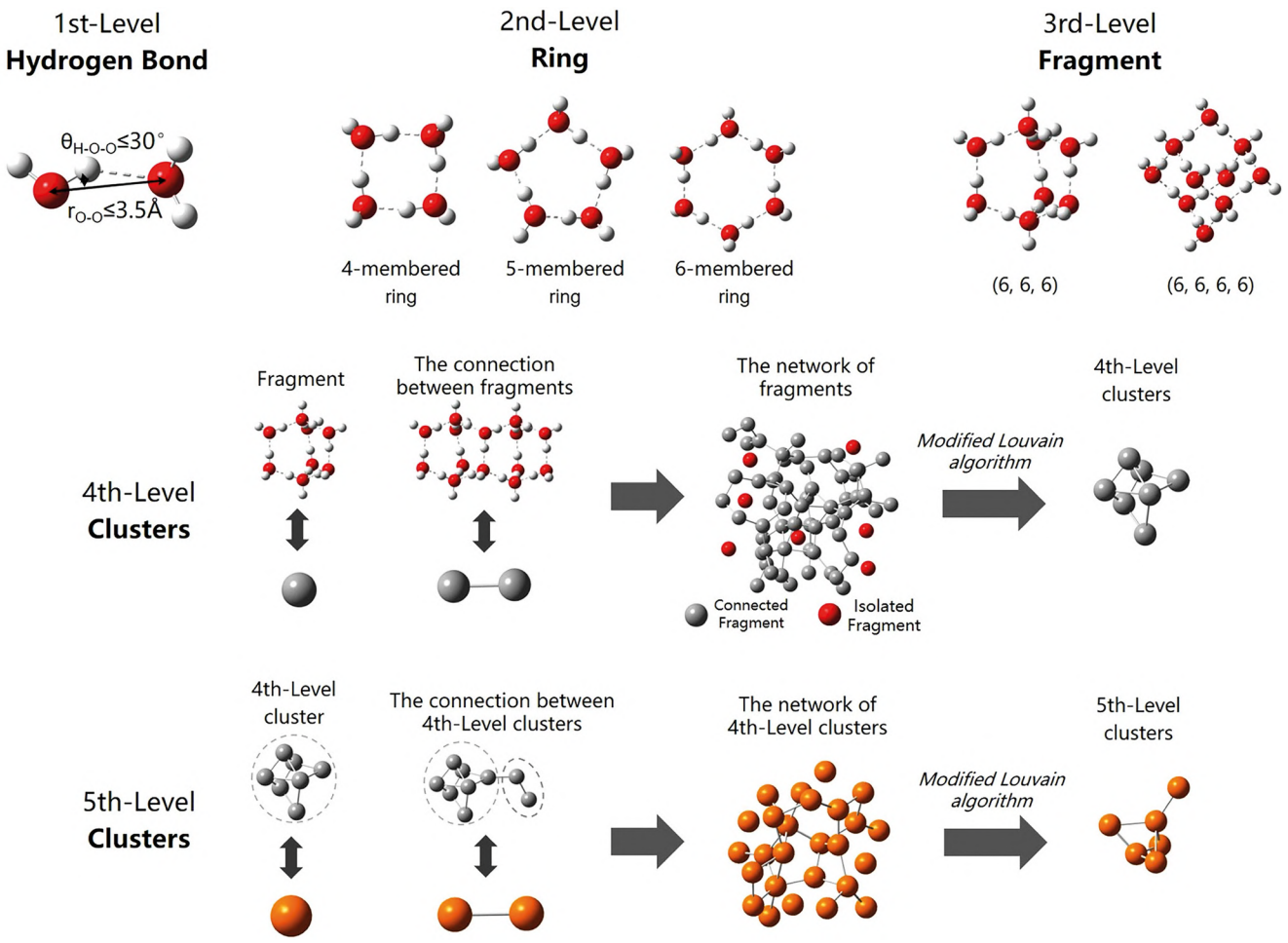


Рисунок 52. Схемы метода иерархической кластеризации. Водородные связи, кольца и фрагменты рассматриваются как структуры 1-го, 2-го и 3-го уровней, которые являются шаростержневыми моделями с химической точки зрения, а красные и белые шары обозначают атомы кислорода и водорода соответственно. Сплошные и пунктирные палочки обозначают ковалентные связи O–H и водородные связи соответственно. Кластеры 4-го и 5-го уровней проиллюстрированы с топологической точки зрения. Шары представляют структуру последних уровней. Структуры на рисунке являются лишь выбором среди рассмотренных алгоритмом кластеризации.

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

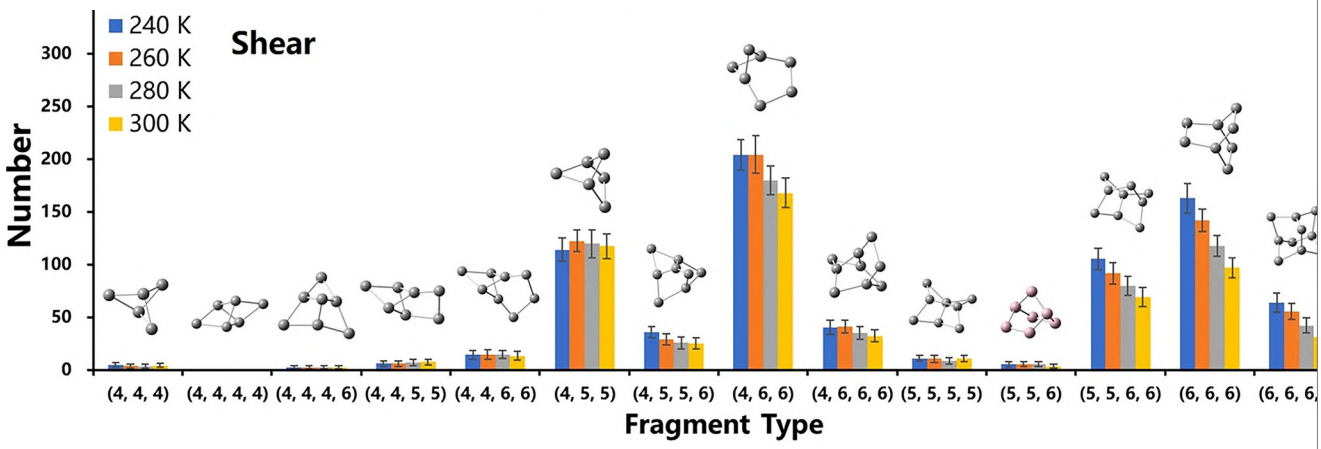


Рисунок 53. Распределение иерархических структур на 1-м, 2-м и 3-м уровнях в сети в различных случаях. (a) Распределение водородных связей (структуры 1-го уровня) при различных температурах. (b) Распределение колец (структуры 2-го уровня) при различных температурах. (c) Распределение фрагментов (структуры 3-го уровня) при различных температурах. Обратите внимание, что (4, 4, 4) обозначает символ фрагмента, включающего три 4-членных кольца.

Источник: 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

Теплоёмкость, теплопроводность и плотность воды и их функциональное значение

1. Высокая теплоёмкость воды

Вода обладает самой высокой удельной теплоёмкостью среди жидкостей и твёрдых веществ при нормальных условиях, уступая лишь некоторым газам, таким как водород[152]. Это означает, что она способна поглощать, удерживать и передавать большое количество тепловой энергии при относительно небольшом изменении собственной температуры.

Теплоёмкость воды определяется количеством тепла, необходимым для повышения температуры 1 грамма воды на 1 градус Цельсия, и составляет около 4,18 Дж/(г·°C) при стандартных условиях. Это свойство является одним из ключевых факторов для климатической регуляции: вода в океанах накапливает тепло в течение дня и медленно отдаёт его ночью. Летом океан поглощает избыточное тепло, а зимой оно постепенно высвобождается, действуя как гигантский термостат и смягчая перепады температур на планете.

2. Теплопроводность воды

Вода обладает относительно низкой теплопроводностью по сравнению с металлами, но она выше, чем у многих других жидкостей. Теплопроводность отражает способность вещества передавать тепло от одной его части к другой без перемещения самой массы вещества. Теплопроводность воды составляет около 0,6 Вт/(м·К) при стандартных условиях (25 °C), что делает её эффективным проводником тепла в природных процессах, таких как распределение тепла в океанах и других водоёмах.

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

Наблюдения показывают, что теплопроводность воды увеличивается с ростом температуры до определённого предела[152]. Кроме того, это значение может изменяться при наличии примесей или растворённых веществ[153, 154]. Эти характеристики влияют на распределение тепла в воде, что имеет решающее значение для понимания взаимодействий между океаном и атмосферой.

3. Аномальное поведение плотности воды

В отличие от большинства веществ, плотность воды ведёт себя необычно при изменении температуры. При охлаждении до 4 °C её плотность увеличивается, но при дальнейшем охлаждении (от 4 °C до 0 °C) плотность начинает уменьшаться (рис. 54). Когда вода замерзает, её плотность уменьшается на 8–9 %. Это объясняет, почему лёд не тонет, а остаётся на поверхности. Этот феномен критически важен для жизни в водоёмах, так как лёд защищает воду и живые организмы от полного замерзания, не давая всей воде замерзать до дна.

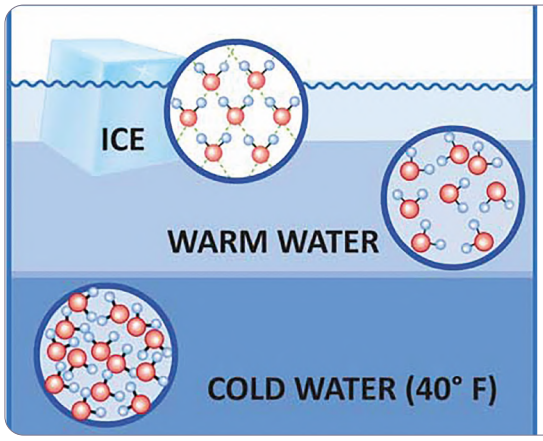


Рисунок 54. Схематическое изображение изменения плотности воды при охлаждении: по мере охлаждения молекулы воды сближаются, увеличивая плотность и достигая максимума при 4°C. При дальнейшем охлаждении водородные связи начинают преобладать, молекулы воды выстраиваются в кристаллическую структуру льда, что приводит к расширению воды и снижению плотности льда, который становится примерно на 10 % менее плотным, чем жидкая вода.
Источник: https://askascientistblog.wordpress.com/2015/11/04/if-molecules-in-colder-things-get-denser-why-does-ice-float/

Влияние свойств воды на климат и экосистемы

Изменения в температуре воды могут существенно повлиять на тепловой баланс Мирового океана и его способность аккумулировать и передавать тепло. Это, в свою очередь, отразится на климатической системе Земли.

Таким образом, физико-химические свойства воды, особенно её теплоёмкость и теплопроводность, играют важную роль в поддержании экологического баланса на планете и регулировании климатических процессов (рис. 55).

[152] Lide, D. R. (ed.) CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85th edn (CRC Press, 2004).
[153] 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
[154] 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

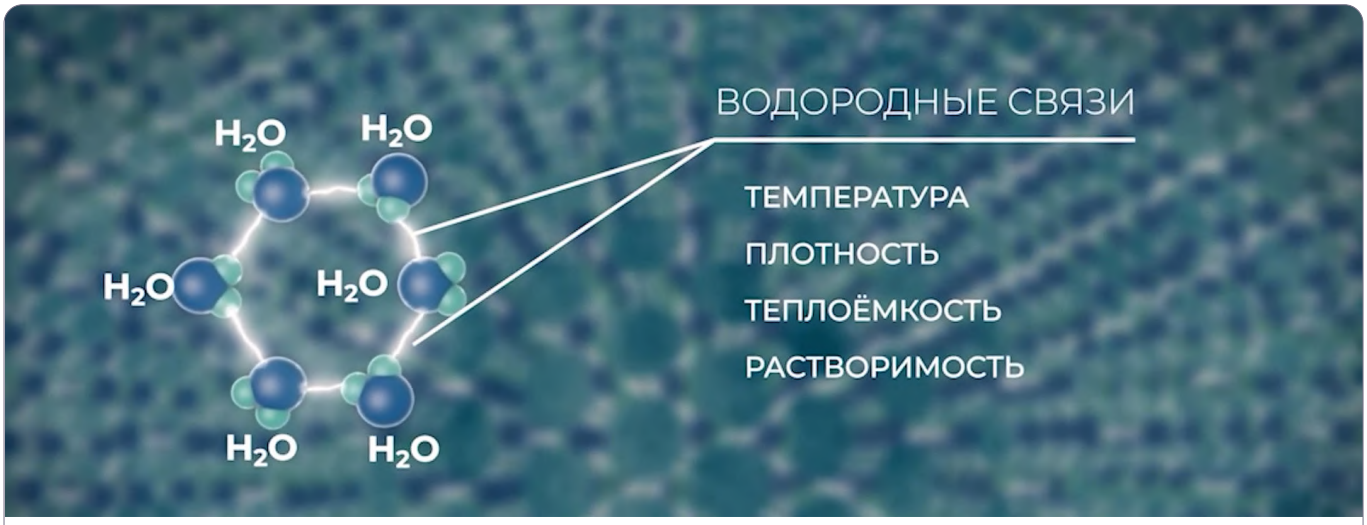


Рисунок 55. Схематическое изображение водородных связей в молекулах воды и их влияние на ключевые свойства воды: водородные связи способствуют высокой теплоёмкости воды, что позволяет ей эффективно поглощать и удерживать тепло. Эти связи также определяют плотность воды, максимальную при 4°C, а также её способность растворять полярные и ионные вещества, что делает воду универсальным растворителем.

Роль МНП в изменении физических свойств морской воды

Пластик, являющийся продуктом нефтехимической промышленности, не разлагается в природе, а распадается на более мелкие частицы, такие как микро- и нанопластик[155]. Эти частицы, особенно нанопластик, могут оказывать значительное влияние на физико-химические свойства воды, что в свою очередь может воздействовать на экосистемы и климатические процессы. Нанопластик представляет собой частицы размером в нанометры, что меньше размера вируса (рис. 56).

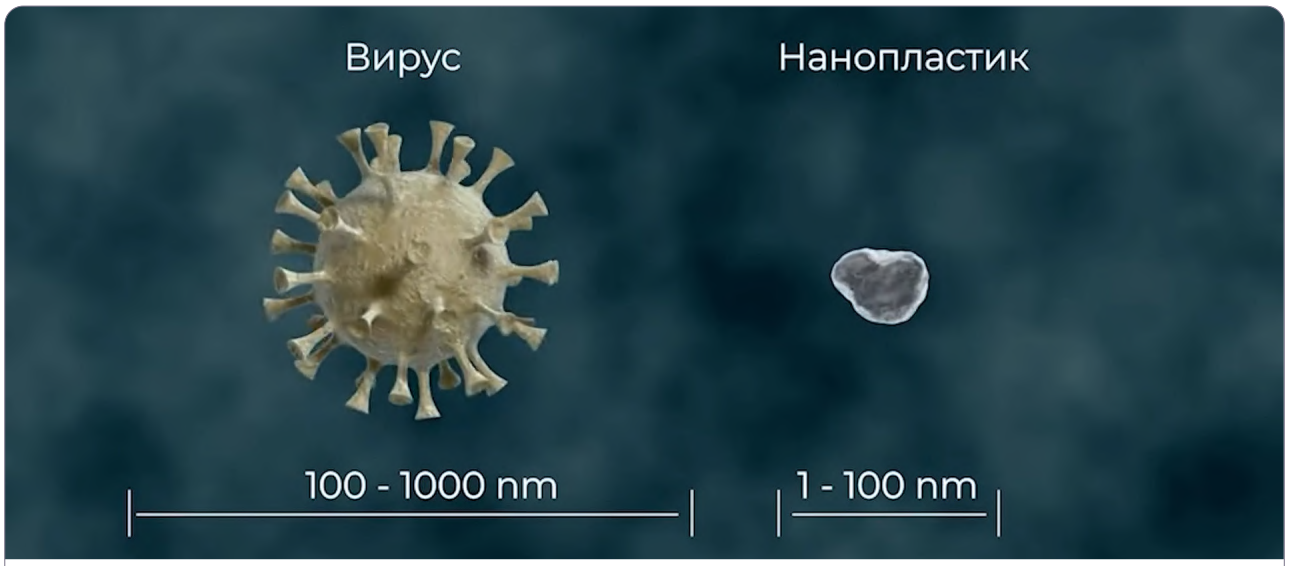


Рисунок 56. Схематическое сравнение размеров вируса и частицы нанопластика

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

Например, нанопластик из нейлона (полиамида), содержащий азот и кислород, способен образовывать водородные связи с водой[156]. Когда частицы нанопластика попадают в воду, они нарушают упорядоченную структуру воды, основанную на водородных связях между молекулами воды, что может изменять её физико-химические свойства (рис. 57). В частности, молекулы воды теряют подвижность, что снижает их способность эффективно участвовать в процессах теплообмена. Кроме того, в водных растворах, содержащих различные вещества, нанопластиковые частицы могут приобретать электрический заряд[157].

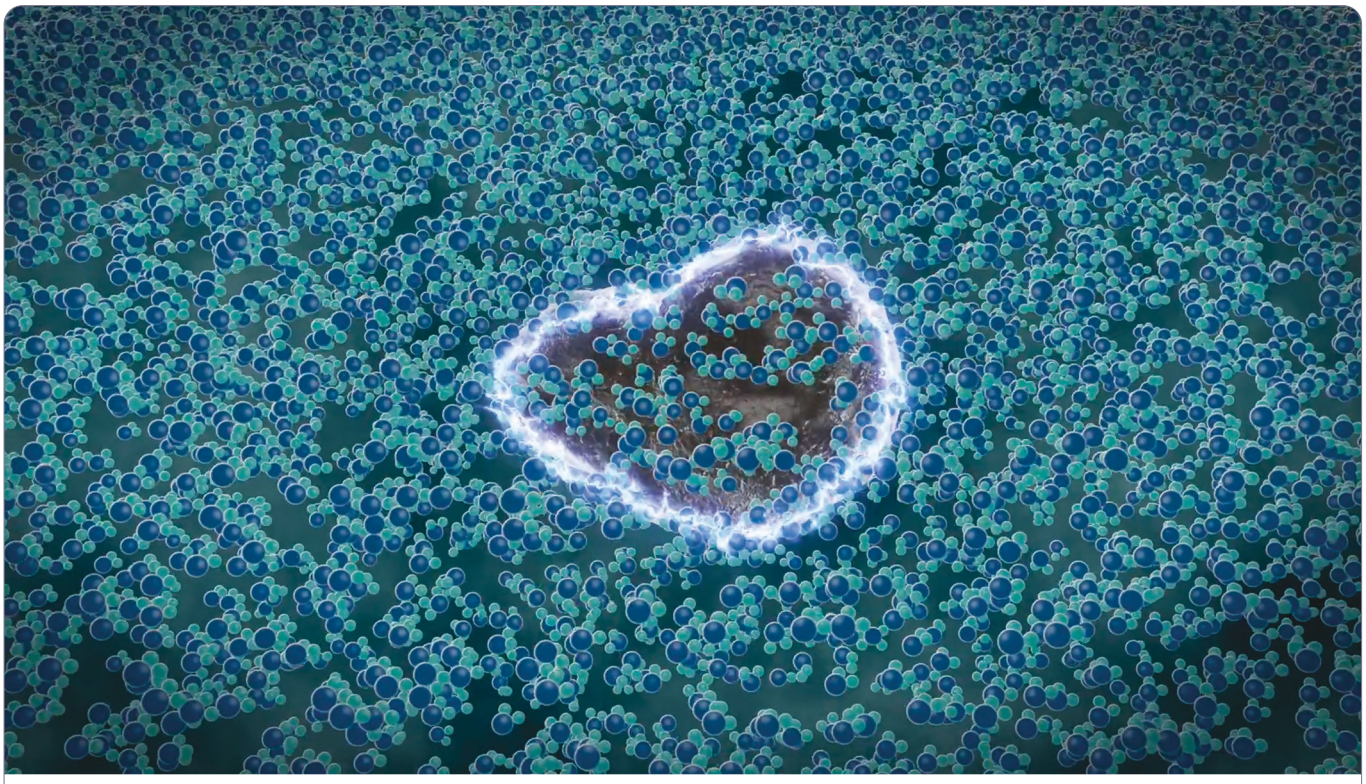


Рисунок 57. Схематическое изображение заряженных наночастиц пластика в воде: при воздействии нестабильных водных условий — таких как наличие органических или синтетических примесей, изменение pH, температуры или солёности — поверхность нанопластика становится потенциально активной и способна генерировать электрические заряды в водной среде.

Источник: 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

Это происходит вследствие химических изменений на его поверхности, таких как окисление, а также из-за адсорбции ионов, например натрия (Na^+) и хлора (Cl^-), в морской воде. Заряженные наночастицы пластика, окружённые ионами, притягивают молекулы воды и формируют вокруг себя гидратную оболочку[158] (рис. 58).

[156]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
[157]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
[158]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

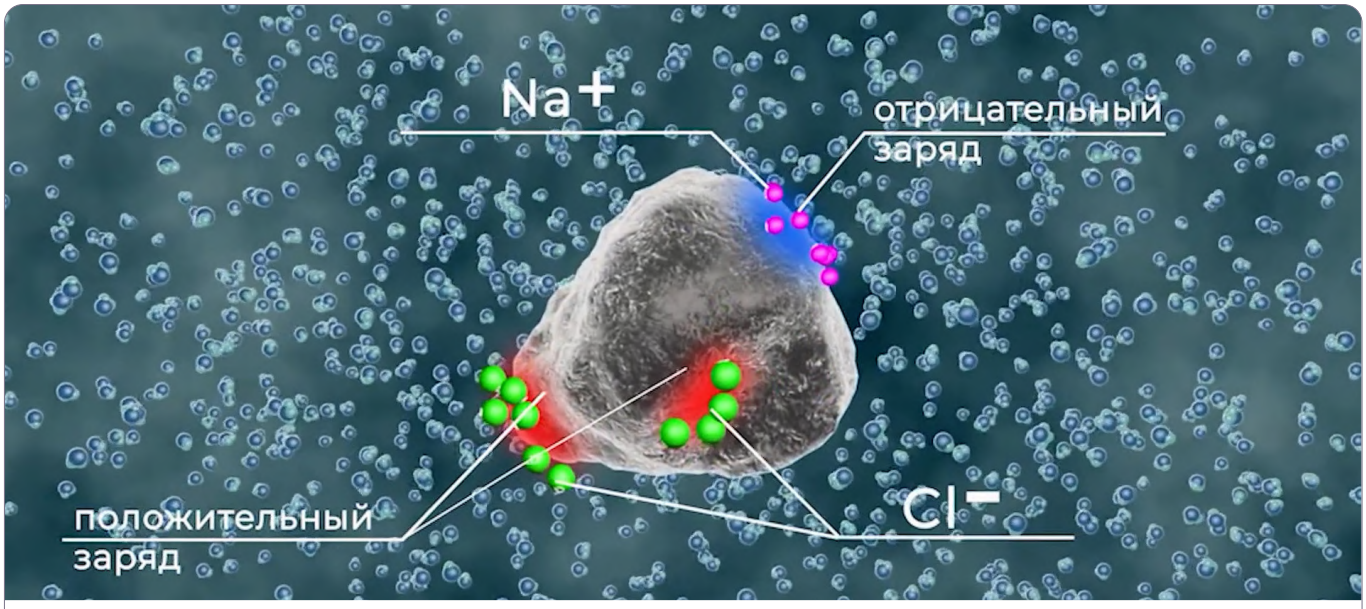


Рисунок 58. Схематическое изображение процесса формирования гидратной оболочки вокруг заряженных наночастиц пластика: в данном процессе наночастицы, обладая зарядом, притягивают ионы, что способствует образованию вокруг них молекул воды, создавая защитную гидратную оболочку.
Источник: https://doi.org/10.1126/sciadv.1501891

Исследователи из Политехнической школы в Лозанне решили выяснить, насколько велик размер этой гидратной оболочки у ионов, то есть сколько молекул воды реагируют на ион. Оказалось, что один ион может влиять приблизительно на миллион окружающих его молекул воды. Этот эффект усиливается, если частица имеет большой поверхностный заряд и высокую концентрацию адсорбированных ионов. В результате одна частица нанопластика может изменять свойства миллионов молекул воды[158] (рис. 59). Связанные в гидратной оболочке молекулы менее подвижны[159]. В результате снижается общая теплоёмкость воды[160,161].

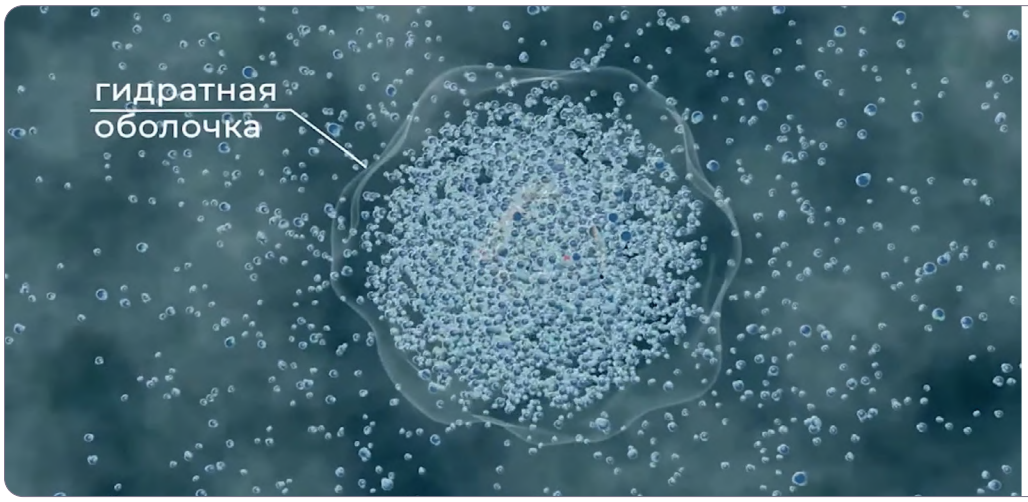


Рисунок 59. Схематическое изображение гидратной оболочки вокруг частицы нанопластика

[158]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
[159]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
[160]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
[161]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

Нарушение структуры водородных связей также приводит к снижению теплопроводности[162]. В результате вода вблизи нанопластика может оставаться нагретой, поскольку теряет способность эффективно передавать тепло.

Зоны концентрации микро- и нанопластика в океане

Микро- и нанопластик могут быть распределены по всему океану благодаря течениям, а более плотные частицы или загрязнённый пластик могут оседать на морском дне. Также скопление нанопластика наблюдается в зонах термоклина — это переходный слой, который находится между тёплыми поверхностными водами и более холодными глубинными слоями[163](рис. 60).

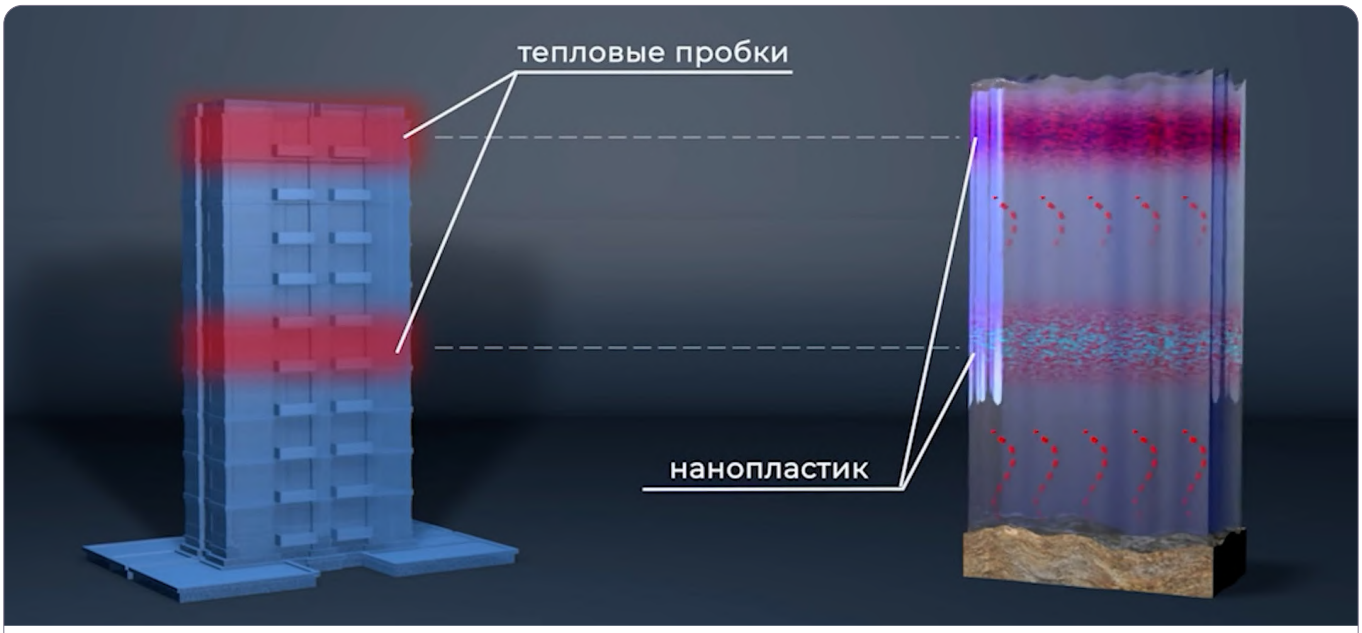


Рисунок 60. На изображении показано образное сравнение зон концентрации микро- и нанопластика в океане и многоэтажного здания с тепловыми пробками на 5-м и 10-м этажах. Эти пробки мешают нормальному теплообмену, и вместо равномерного распределения тепла, оно скапливается на этих этажах. Тепловизор покажет, что температура внутри здания значительно выше, чем в таком же здании, но без пробок. Аналогично нанопластик в воде нарушает естественные механизмы теплообмена, создавая «тепловые пробки» в океане.

Увеличение концентрации нанопластика в океанах может привести к изменениям в глобальном тепловом балансе. Это может влиять на повышение температуры океанов, а значит, вызвать изменения климата. Важно отметить, что даже незначительное количество нанопластика может оказать значительное воздействие на экосистемы. Повышение температуры поверхности океана ускоряет фрагментацию пластикового мусора на микро- и нанопластик (рис. 61). В результате увеличивается количество этих частиц, которые вместе с водяным паром попадают в атмосферу. Присутствие микро- и нанопластика в атмосфере способствует дополнительному её нагреву, что, в свою очередь, усиливает нагрев океана. Таким образом, формируется замкнутый круг, где процессы взаимно усиливают друг друга.

[162]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
[163]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

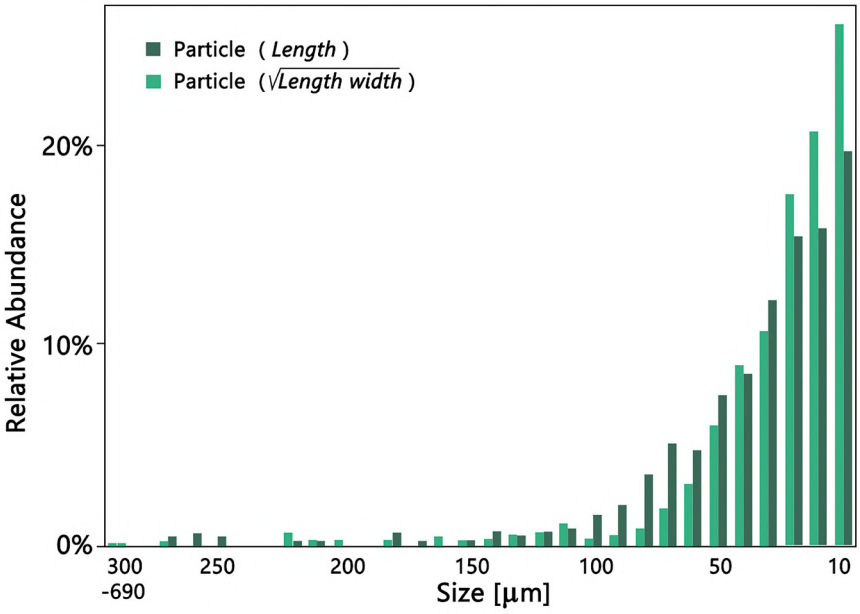


Рисунок 61. Относительное распределение частиц микропластика по размерам для всех проанализированных станций (np = 543). На изображениях показаны самые маленькие (справа) и самые большие (слева) частицы MP, обнаруженные и подтвержденные с помощью Раман-микроспектрометрии.
Источник: Enders, K., Lenz, R., Stedmon, C. A. & Nielsen, T. G. Abundance, size and polymer composition of marine microplastics ≥ 10 µm in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution. Marine Pollution Bulletin 100, 70–81 (2015). https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.027

Связь между электростатическим зарядом МНП и атмосферными явлениями

Микро- и нанопластик попадают в атмосферу различными путями. Водяной пар, испаряющийся с поверхности океанов и других водоёмов, уносит микрочастицы в воздух[164]. На континентах основными источниками атмосферного пластика являются заводы, мусоросжигательные станции и свалки. Кроме того, микропластик поднимается в воздух, когда сельскохозяйственные удобрения и пластиковая мульча высыхают и разносятся ветром. Микрочастицы пластика выделяются при трении автомобильных шин.

Эти и многие другие источники вносят значительный вклад в загрязнение атмосферы. Эти процессы способствуют накоплению и распространению микропластика в атмосфере, создавая серьёзные экологические и климатические угрозы. Оказавшись в атмосфере, микро- и нанопластиковые частицы могут служить ядрами конденсации для водяного пара. Чем больше таких ядер, тем быстрее происходит конденсация водяного пара в капли. Воздушные микропластики были обнаружены в пробах облачной воды, собранных на горных вершинах в Японии[165] (рис. 62).

[164]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
[165]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

Рисунок 62. Воздушные гидрофильные микропластики в облачной воде на больших высотах и их роль в образовании облаков
Источник: Hiroshi Okochi from Waseda University
https://www.sustainableplastics.com/news/scientists-find-microplastics-clouds-above-mount-fuji

> *«В загрязненной окружающей среде с большим количеством аэрозольных частиц, таких как микропластик, вся вода распределяется между этим большим количеством аэрозольных частиц, образуя более мелкие капельки вокруг каждой из них. Когда капель больше, получается меньше осадков. Но поскольку капли выпадают только тогда, когда становятся достаточно крупными, в облаке собирается больше воды. Как следствие, выпадают более обильные осадки»,* — сказала Мириам Фридман, профессор химии департамента метеорологии и атмосферных наук Университета штата Пенсильвания[166].

Это объясняет то, что в последние годы в разных регионах стали наблюдаться аномальные осадки.

[166]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

Электрические заряды в облаках

Атмосфера Земли является сложной электрической системой, в которой важную роль играют молекулы воды. С 1752 года, когда Бенджамин Франклин впервые доказал, что атмосфера электрифицирована и что грозы имеют электрическую природу, стало понятно, что взаимодействие воды (в парах, жидкостях и льде) играет ключевую роль в этих процессах. Вода в своей чистой форме нейтральна, но во время фазовых переходов, таких как таяние и замерзание, а также при столкновениях молекул, она может передавать ионы другим частицам, что приводит к электрическим эффектам.

В атмосфере столкновения между кристаллами льда, переохлаждёнными каплями воды и другими частицами в присутствии естественных электрических полей приводят к разделению зарядов. Этот процесс играет ключевую роль в формировании атмосферного электричества, включая грозовые облака. Это явление важно для формирования облаков и осадков. Заряженные капли начинают притягиваться друг к другу, ускоряя процесс их объединения в более крупные капли, что в итоге приводит к образованию облаков, способных вызвать осадки, такие как дождь, снег или град.

> ***«Заряды чрезвычайно важны, а в процессе образования облаков это практически всё. И мы обнаружили, что заряды играют ключевую роль»*** — сказал Джеральд Х. Поллак, PhD, профессор биоинженерии в Вашингтонском университете, главный редактор и основатель междисциплинарного исследовательского журнала WATER[167].

Также в 1843 году Майкл Фарадей обнаружил, что электричество возникает из-за трения капель воды о металл, что заряжает воду. Это открытие привело к дальнейшему изучению заряда воды при трении, фазовых переходах и контактной электризации, а также к попыткам использовать этот эффект для создания новых источников энергии.

Известно, что влажный воздух может нейтрализовать поверхностный заряд, образуя водяную пленку, которая позволяет ионам перемещаться и рассеивать накопленный заряд. Однако в некоторых случаях поверхности, адсорбирующие воду, могут накапливать заряд от влажной атмосферы, что также влияет на электрическое состояние окружающей среды[168]. Исследования показали, что тяжёлые металлы могут легко прикрепляться к микропластику и что эта комбинация может потенциально нанести вред экосистемам планеты.

---

[167] AllatRa TV. Anthropogenic factor in the oceans' demise: Popular science film. Time 55:00, (2025). https://allatra.tv/en/video/anthropogenic-factor-in-the-oceans-demise-popular-science-film (Дата доступа 01.05.2025).

[168] 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

Более того, микропластик и смесь веществ на его поверхности могут не только прилипать к другим загрязнителям, но и взаимодействовать друг с другом, изменяя их химические свойства[169]. Когда в атмосферу вмешиваются микро- и нанопластиковые частицы, они могут нарушать хрупкий баланс в атмосферных процессах. Пластиковые частицы могут нести заряд, что усиливает притяжение полярных молекул воды, способствуя образованию капель. Частицы пластика становятся не обычными ядрами конденсации, такими как пыльца, морская соль или сажа, а могут собираться каплями более эффективно, чем нейтральные частицы[170].

Это означает, что вокруг заряженных частиц капли воды начинают формироваться быстрее, что влияет на структуру облаков и может привести к образованию больших капель и даже аномально крупных кристаллов льда[171]. Например, недавно группа исследователей обнаружила в облаках на вершинах гор в Японии пластиковые гранулы, имеющие водопритягивающую поверхность[172].

Влияние на формирование облаков и осадков

Микропластик может повлиять на характер осадков, прогнозирование погоды, моделирование климата и даже безопасность полётов, влияя на то, как кристаллы атмосферного льда формируют облака.

Исследование[173] показало, что капли воды с микропластиком замерзают при температуре на 4-10 градусов выше, чем капли без него, то есть на более низких высотах. Обычно капля воды без каких-либо примесей замерзает при температуре около −38 °C. Однако в случае с микропластиком 50 % капель замёрзли при температуре от −18 до −24 градуса Цельсия в зависимости от вида пластика.

Капли воды, содержащие микропластик, замерзают быстрее, образуя более крупные ледяные частицы. Эти частицы поднимаются восходящими потоками воздуха, многократно покрываются слоями льда и затем выпадают на землю. Такое явление может привести к увеличению размеров градин (рис. 63–64), усилению их разрушительного воздействия, а также к активизации процесса формирования ледяных облаков. Как следствие, изменяется частота и интенсивность осадков, включая дожди и снегопады. Это способно вызвать каскадные эффекты, затрагивающие климат, гидрологический цикл и экосистемы.

---

[169]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

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

[171]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

[172]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

[173]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

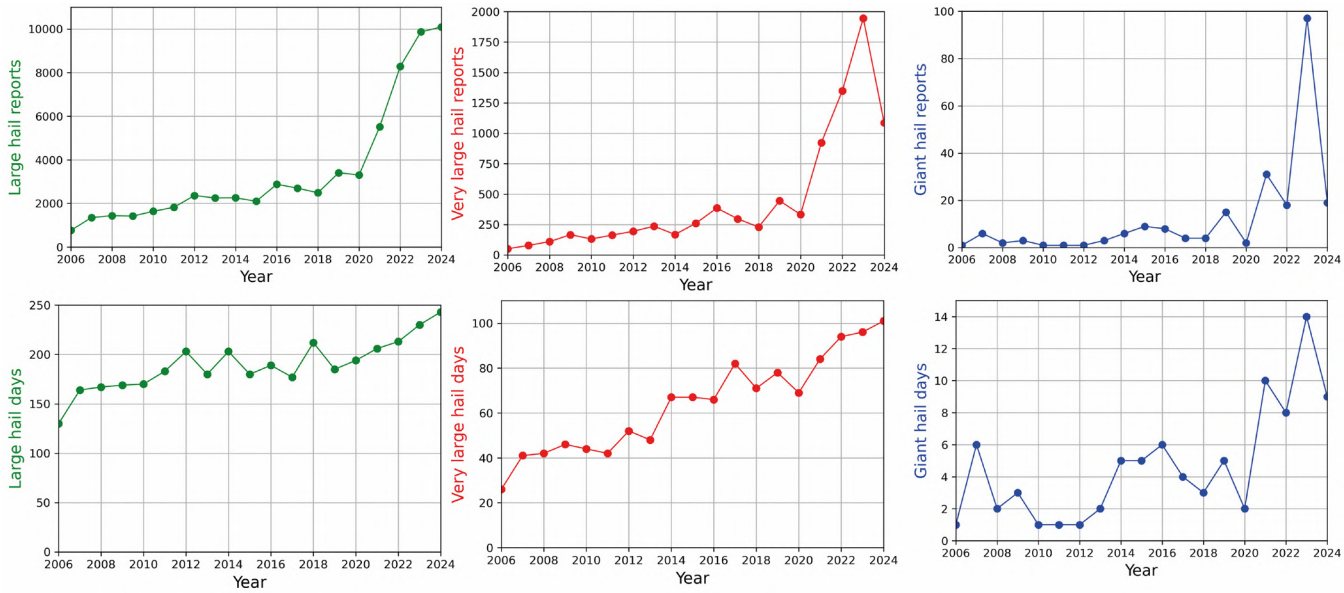


Рисунок 63. Количество сообщений и дней с крупным (2+ см), очень крупным (5+ см) и гигантским (10+ см) градом в период с 2006 по 2024 год.

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

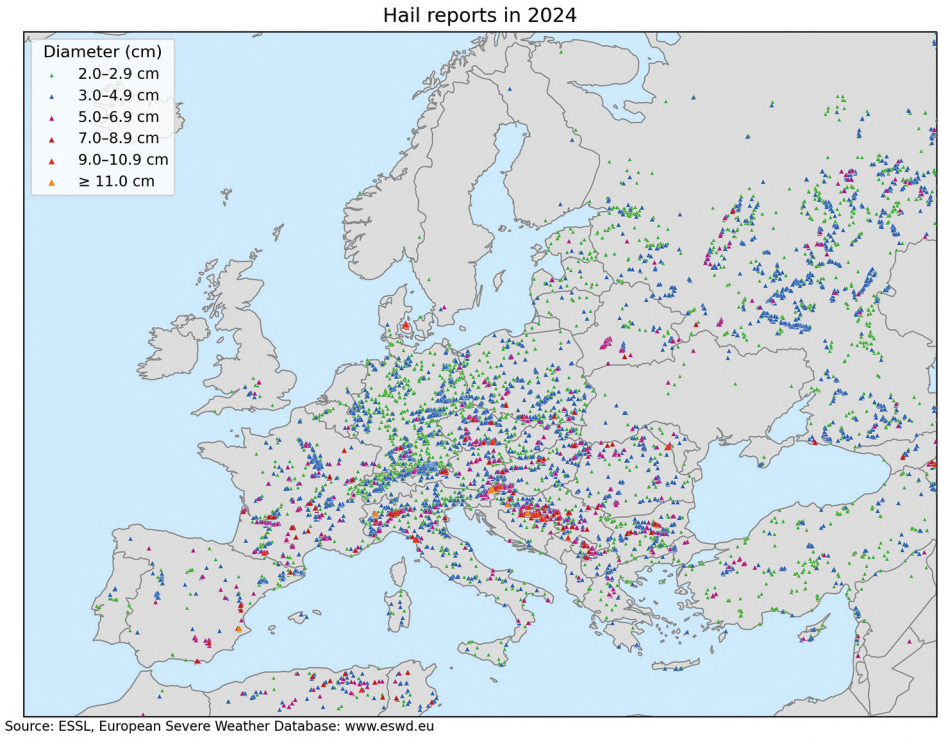


Рисунок 64. Пространственное распределение сообщений о крупном граде по Европе и прилегающим территориям в 2024 году.

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

Когда в атмосфере присутствуют частицы нанопластика, облака начинают формироваться на меньших высотах — обычно ниже 2 км. Это приводит к тому, что облака оказываются менее подвижными, что мешает нормальному распределению осадков. В результате в одних районах может наблюдаться засуха, а в других — чрезмерные осадки.

Роль МНП в нарушении климатического баланса планеты

Более плотные облака начинают удерживать тепло в нижних слоях атмосферы, подобно покрывалу поглощая и возвращая часть теплового излучения обратно к поверхности Земли. Это уменьшает утечку тепла в космическое пространство и способствует нагреву атмосферы. Повышение температуры способствует дополнительному испарению воды из океанов, а большее количество влаги в атмосфере приводит к дальнейшему потеплению. Это замкнутый круг. Важно отметить, что на каждый градус потепления количество влаги в воздухе увеличивается примерно на 7 %[174], а частота молний возрастает на 12 %[175].

> Как отмечает Кевин Тренберт, заслуженный климатолог Национального центра атмосферных исследований США (NCAR), ведущий автор докладов МГЭИК, *«Сочетание повышенной температуры и увеличенного содержания водяного пара в атмосфере вызывает её большую нестабильность. Это приводит к усилению конвекции и увеличению количества штормов. Некоторые из них, самые сильные, перерастают в грозы. При таких условиях увеличивается риск возникновения сильных гроз.*
>
> *Когда грозы начинают объединяться и взаимодействовать, как это происходит в тропических штормах, они могут перерастать в более мощные ураганы. Все эти факторы суммируются, повышается риск возникновения штормов, сильных гроз, особенно штормов-суперъячеек, которые вызывают град, а в некоторых местах, при соответствующих условиях, могут вызвать торнадо».*

Таким образом, экстремальный нагрев океана, избыток электричества и тепла в атмосфере усугубляют климатическую ситуацию, приводя к более разрушительным климатическим явлениям, таким как сильные грозы, ураганы, молнии и спрайты.

Пластик в атмосфере не только загрязняет окружающую среду, но и меняет климатические процессы, влияя на формирование облаков и осадков. Он усиливает электростатический заряд в атмосфере, ускоряет конденсацию водяного пара и влияет на плотность облаков, что может привести к повышению интенсивности штормов, гроз и других разрушительных природных явлений. Мы стоим на пороге понимания масштабных последствий этого воздействия на климат, что требует срочных и комплексных мер по уменьшению загрязнения пластиковыми частицами в океанах и атмосфере.

---

[174] NASA. Steamy relationships: How atmospheric water vapor amplifies Earth's greenhouse effect. (2022) https://science.nasa.gov/earth/climate-change/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifies-earths-greenhouse-effect

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

Взаимодействие океана с магнитным полем Земли

Океаны занимают около 70 % поверхности Земли и представляют собой не просто гигантские резервуары воды, но и важные элементы в сложных электрических процессах планеты. Они взаимодействуют с магнитным полем Земли, участвуя в её электромагнитных процессах.

Магнитное поле Земли защищает поверхность планеты от солнечного ветра и космического излучения, действуя как естественный щит. Без этого поля атмосфера была бы разрушена. Геомагнитное поле создаётся в глубине планеты, где жидкое внешнее ядро, состоящее из металлов, движется вокруг твёрдого внутреннего ядра, создавая природный генератор — процесс, называемый геодинамо (рис. 65).

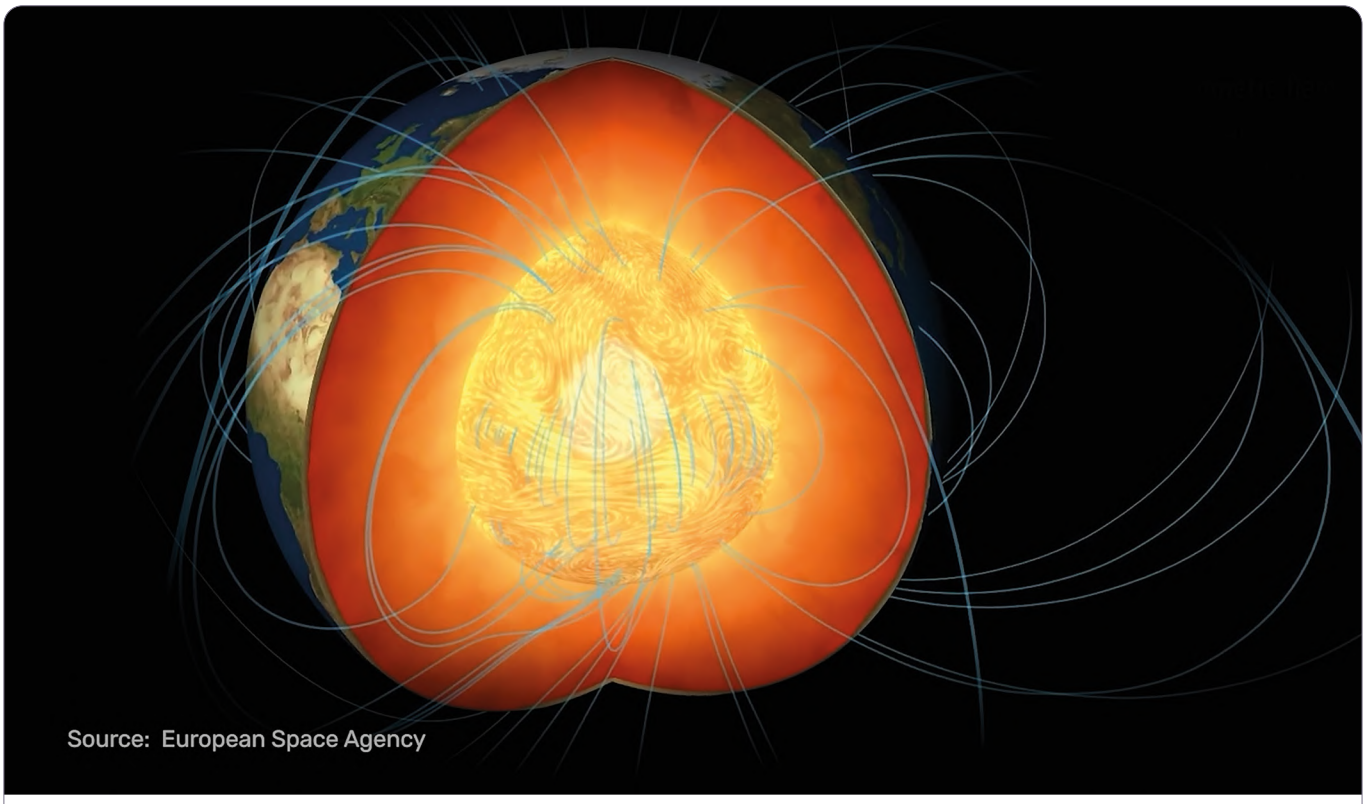


Рисунок 65. Схематическое изображение процесса образования геомагнитного поля: жидкое внешнее ядро Земли вращается вокруг твёрдого внутреннего ядра, формируя природный генератор — геодинамо, благодаря которому создаётся магнитное поле планеты.

Источник: European Space Agency (ESA) https://www.esa.int/

Магнитное поле Земли взаимодействует с электрическими явлениями в океанах и атмосфере. Морская вода, благодаря содержанию солей и растворённых ионов, обладает значительной электропроводностью, что позволяет ей проводить электрические токи. Эти токи, в свою очередь, взаимодействуют с магнитным полем, создавая сложные электромагнитные процессы, которые играют роль в динамике планетарного магнитного поля.

Как ранее рассматривалось, загрязнение океанов, особенно микро- и нанопластиком, может изменять химические и электрические свойства воды. Чем выше концентрация загрязняющих веществ, тем сильнее нарушаются естественные электромагнитные процессы. При испарении загрязнённая вода уносит с собой металлы, микропластик и другие вещества, что может оказывать влияние на атмосферные процессы.

При испарении загрязнённой воды микроскопические капли и аэрозоли могут переносить микро- и нанопластик, тяжёлые металлы[176] и другие вещества в атмосферу, что может оказывать влияние на локальные электромагнитные процессы. Это похоже на то, как металлический объект, расположенный рядом с магнитом, изменяет распределение магнитного поля, ослабляя его силу в определённой области.

Влияние загрязнения океанов на магнитное поле Земли требует дальнейшего изучения, особенно в контексте глобальных климатических изменений. Понимание этих процессов может помочь оценить их потенциальное воздействие на климатическую систему и экосистемы планеты.

[176]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

ВОЗДЕЙСТВИЕ МИКРО- И НАНОПЛАСТИКА НА ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА

> *«Пластик не только загрязняет наши океаны и водные пути и убивает морскую жизнь — он есть во всех нас, и мы не можем избежать потребления пластика. Глобальные действия являются срочными и необходимыми для борьбы с этим кризисом.»*
>
> Марко Ламбертини
> генеральный директор WWF International

Микро- и нанопластик как новый фактор риска в развитии эпидемий XXI века

Последние 30 лет наблюдается непрерывный рост инфарктов, инсультов, онкологических заболеваний, сахарного диабета, аллергий, воспалительных заболеваний кишечника. Снижение иммунитета наблюдается как у детей, так и у взрослых по всему миру. Растет распространенность бесплодия. Даже несмотря на ограниченность данных о количестве бесплодных людей и пар, по оценке Всемирной организации здравоохранения, с бесплодием сталкиваются уже около 17,5 % взрослых[177], то есть примерно каждый шестой человек в мире.

С 2010 года наблюдается снижение интеллектуальных способностей у людей. Даже в развитых странах 25 % взрослых не справляются с базовыми математическими задачами; к примеру, в США этот показатель достигает 35 %. Снижается способность к концентрации внимания, логическому мышлению и решению элементарных задач. Растет распространенность различных форм деменции и нарушения когнитивных способностей[178].

Рост психических расстройств опережает рост соматических заболеваний[179]. Тревожные расстройства, аутизм, депрессия и биполярное расстройство, синдром дефицита внимания и гиперактивности (СДВГ) приобретают масштаб пандемии.

Всё больше данных указывает на участие микро- и нанопластика в патогенезе различных заболеваний.

---

[177] World Health Organization. 1 in 6 people globally affected by infertility. (2023) https://www.who.int/news/item/04-04-2023-1-in-6-people-globally-affected-by-infertility (Дата доступа 01.05.2025).
[178] Financial Times. Have humans passed peak brain power? https://www.ft.com/content/a8016c64-63b7-458b-a371-e0e1c54a13fc (Дата доступа 01.05.2025).
[179] The Guardian. Mental health overtakes cancer and obesity as Britons' biggest health worry. (2024) https://www.theguardian.com/society/2024/sep/20/mental-health-overtakes-cancer-and-obesity-as-britons-biggest-health-worry (Дата доступа 01.05.2025).

Молекулярные механизмы токсичности МНП. Повреждение ДНК, митохондрий и клеточных мембран

Микро- и нанопластик (МНП) является одной из наиболее широко распространённых форм антропогенного загрязнения окружающей среды. Благодаря своим физико-химическим свойствам, частицы пластика способны перемещаться на значительные расстояния, преодолевая географические и экологические барьеры. Основные пути поступления микро- и нанопластика в организм человека — это проглатывание (с водой и пищей)[180], вдыхание с воздухом и проникновение через кожу (рис. 66).

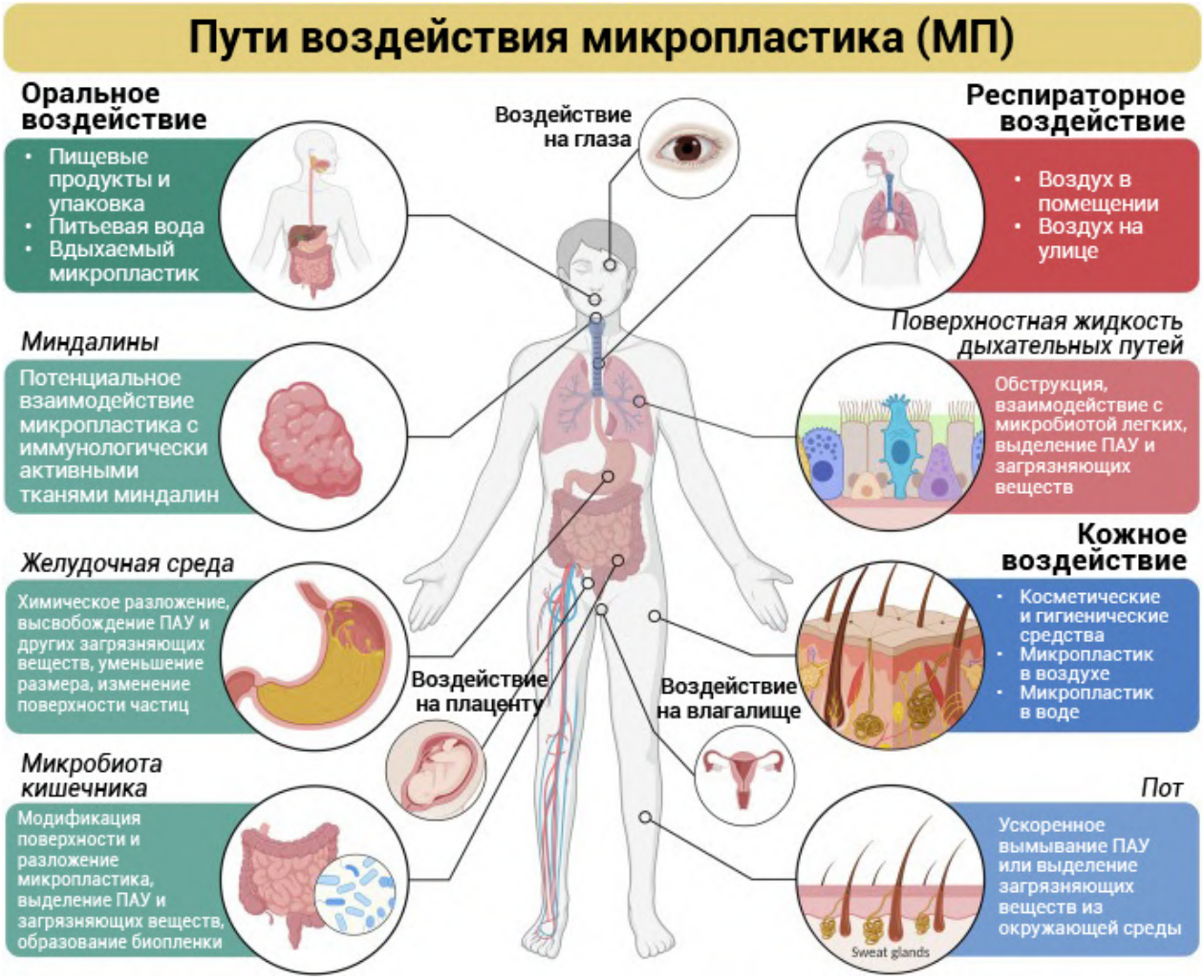


Рисунок 66. Обзор путей воздействия микропластика (МП) на человека и общих событий, которые могут формировать воздействие частиц МП, химических веществ, связанных с пластиком (ХАП), и адсорбированных загрязнителей окружающей среды на здоровье человека.

Источник: 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

[180]ScienceDirect. Ingestion. ScienceDirect Topics. https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/ingestion (Дата доступа 01.05.2025).

Как упоминалось в разделе: *«Последствия пластикового загрязнения: микро- и нанопластик (МНП) как новый фактор планетарного кризиса»*, морская среда служит значительным источником вторичного микропластика. Согласно оценкам, морской бриз переносит около 136 тысяч тонн микропластика на прибрежные территории ежегодно. Кроме того, открытые водоёмы в урбанизированных районах, включая сточные и дождевые системы, становятся значимыми центрами накопления и дальнейшего распространения пластиковых частиц, количество которых может превышать предыдущие оценки на 90 %.

Пищевые продукты представляют собой важный путь поступления МНП в организм человека. Растения способны аккумулировать нанопластик через корневую систему: при поливе или во время осадков частицы проникают в почву и поглощаются вместе с водой, продвигаясь по ксилеме и накапливаясь в тканях листьев и плодов[181]. Наибольшее содержание пластиковых частиц обнаружено в таких культурах как яблоки, груши, морковь и брокколи.

Морепродукты также служат одним из путей переноса МНП. Заглатывание микропластика морскими организмами фиксируется на всех трофических уровнях. Согласно исследованию Ньюкаслского университета, среднестатистический человек может потреблять до 250 г микропластика в год, что эквивалентно примерно 5 г в неделю — массе одной пластиковой карты. Кроме того, при нагревании пластиковых контейнеров, в том числе детского питания, в микроволновых печах может высвобождаться в пищу свыше 2 миллиардов наночастиц и 4 миллионов микрочастиц пластика на каждый квадратный сантиметр поверхности.

Микропластик широко распространён в питьевой воде. Исследования показывают, что до 90 % образцов водопроводной воды в США содержат частицы МНП. Основными путями его поступления в водные системы являются стоки, промышленные выбросы и атмосферные осадки, содержащие пластик, улавливаемый из воздуха. При испарении загрязнённой воды частицы пластика могут подниматься в атмосферу и затем выпадать с дождём или снегом. В ходе исследования, проведённого в 11 национальных парках США, за 14 месяцев было зафиксировано выпадение свыше 1000 тонн пластиковых частиц с осадками — объём, достаточный для производства 120 миллионов пластиковых бутылок.

Аэрозольное распространение МНП является одним из наиболее опасных механизмов его воздействия на человека. Частицы пластика поднимаются с поверхностей морей и водоёмов, транспортируются воздушными массами и становятся компонентом атмосферного аэрозоля. Оценки показывают, что в условиях мегаполиса за двухчасовую прогулку взрослый человек может вдыхать до 106 тысяч частиц микропластика, а в районах, прилегающих к водоёмам, эта цифра возрастает в 10 раз.

[181] 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

Новое исследование, представленное на конференции *Американского колледжа кардиологии* (ACC.25), выявило, что более высокое воздействие микропластика, который может быть непреднамеренно потреблён или вдыхаем, связано с повышенной распространённостью хронических неинфекционных заболеваний. Исследование показало, что в сообществах, расположенных вдоль восточного, западного побережья залива, а также некоторых берегов озёр в США, более высокие концентрации микропластика в окружающей среде ассоциируются с повышенной распространённостью хронических неинфекционных заболеваний, таких как гипертония, диабет и инсульт.

> ***«Это исследование даёт первоначальные доказательства того, что воздействие микропластика влияет на здоровье сердечно-сосудистой системы, особенно на хронические неинфекционные заболевания, такие как высокое кровяное давление, диабет и инсульт»,*** — сказал Сай Рахул Поннана, магистр наук, научный сотрудник по данным исследований в Медицинской школе Case Western Reserve в Огайо и ведущий автор исследования. ***«Когда мы включили в наш анализ 154 различных социально-экономических и экологических характеристики, мы не ожидали, что микропластик войдёт в первую десятку по прогнозированию распространённости хронических неинфекционных заболеваний»***[182]

Микро- и нанопластик способен проникать через биологические барьеры, включая барьеры кишечника, лёгких, головного мозга и плаценты[183]. Микропластик, подвергшийся воздействию пресной или морской воды, легче проникает в клетки (рис. 67) благодаря оседанию биомолекул на его поверхности. Эти биомолекулы, формируя покрытие, способствуют прохождению его через пищеварительный тракт и включению микропластика в ткани. Такое покрытие действует как механизм, облегчающий проникновение пластика в клетки, подобно троянскому коню[184].

[182] American College of Cardiology. New evidence links microplastics with chronic disease. (2025) https://www.acc.org/About-ACC/Press-Releases/2025/03/25/10/19/New-Evidence-Links-Microplastics-with-Chronic-Disease (Дата доступа 01.05.2025).
[183] 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
[184] Ramsperger, A. F. R. M. et al. Environmental exposure enhances the internalization of microplastic particles into cells. Sci. Adv. 6, eabd1211 (2020). https://doi.org/10.1126/sciadv.abd1211

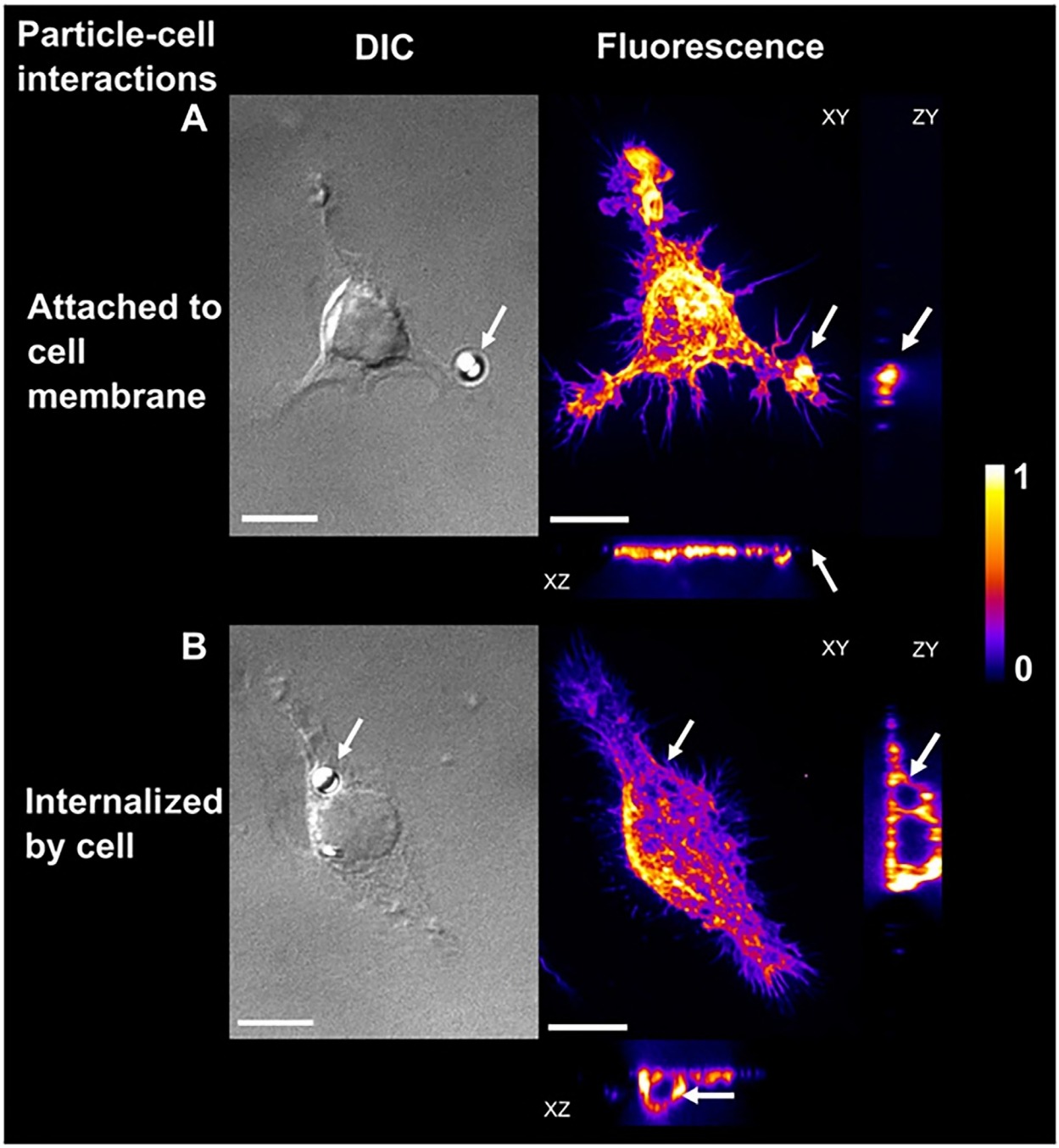


Рисунок 67. Изображения взаимодействия частиц с клеткой микропластиковых частиц, подвергавшихся воздействию пресной воды в течение 2 недель
DIC: Дифференциально-интерференционные контрастные микроскопические изображения взаимодействий частиц и клеток. Флуоресценция: Конфокальные изображения вращающегося диска клеток с флуоресцентно меченым нитевидным актином (изображение в ложных цветах, максимальная проекция интенсивности, показывающая условные единицы). Проекции XY, YZ и XZ трёхмерных конфокальных изображений позволяют дифференцировать микропластиковые частицы (A), прикреплённые к клеточным мембранам, или (B) интернализованные микропластиковые частицы. Стрелки указывают положение микропластиковых частиц. Масштабные линейки: 10 мкм.

Источник: 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

Токсичность микропластика зависит от множества факторов: размера, формы, поверхностного заряда, степени выветривания, времени воздействия, состава добавок и других характеристик[185]. Более мелкие частицы легче проникают в клетки и вызывают более выраженный окислительный стресс. Поверхностный заряд микропластика — ключевой параметр, определяющий эффективность клеточного поглощения (влияет на адгезию). Кроме того, микропластик состоит из полимеров и различных добавок, усиливающих его негативное воздействие[186].

Частицы микро- и нанопластика, химические соединения в составе пластика и загрязняющие вещества окружающей среды, которые пластик адсорбирует на себя, оказывают комплексное[187] негативное воздействие на здоровье человека (рис. 68), представляя значительную угрозу.

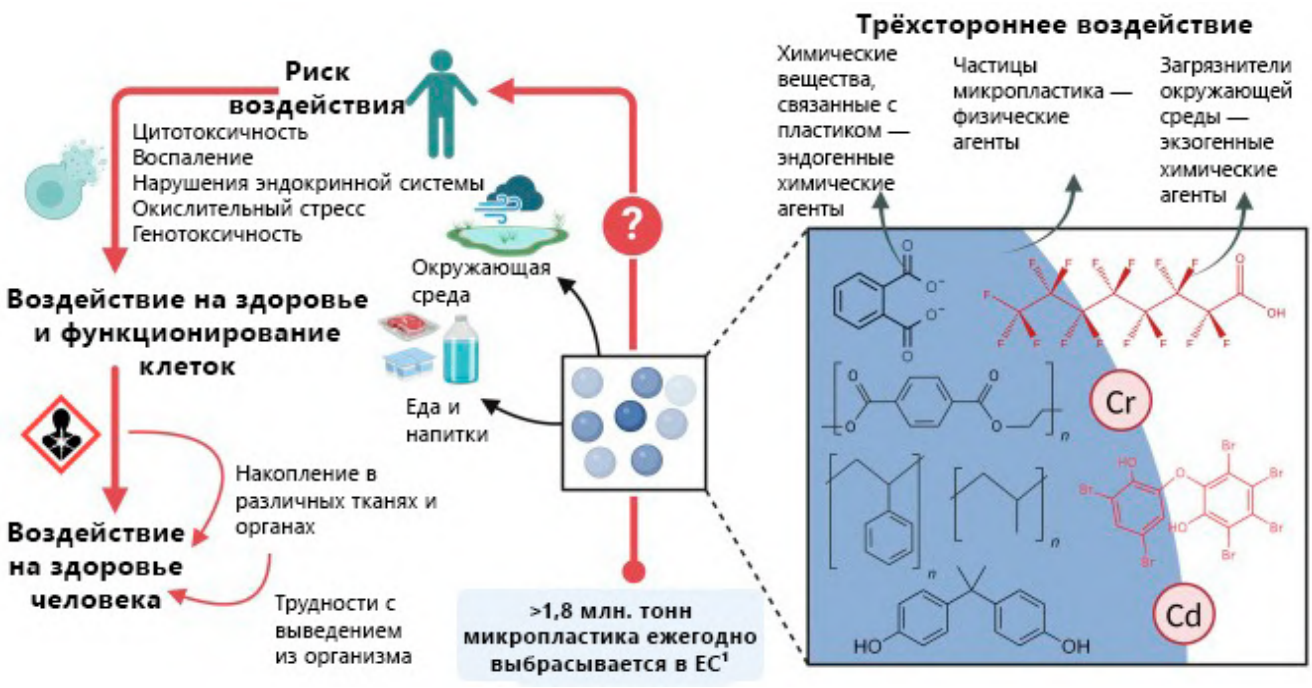


Рисунок 68. Тройная взаимосвязь воздействия между частицами микропластика (МП), химическими веществами, связанными с пластиком, и загрязнителями окружающей среды и её потенциальное воздействие на здоровье и благополучие человека.

Источник: 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

[185] 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

[186] 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

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

1 грамм микропластика может содержать до 24 000 нанограммов стойких органических загрязнителей[187]. Эти вещества отличаются высокой токсичностью, накапливаются в организмах и способны причинять вред даже в малых концентрациях.

Микропластик может сделать другие загрязняющие вещества более вредными[188], так как микропластик и смесь веществ на его поверхности могут не только прилипать к другим загрязнителям, но и взаимодействовать друг с другом, изменяя их химические свойства.

Исследования демонстрируют, что воздействие микро- и нанопластика вызывает токсические эффекты на различных уровнях биологической организации:

- **Макромолекулы:** Повреждение ДНК, нарушение экспрессии генов и изменения в транскрипции белков.
- **Клетки и органеллы:** Нарушение клеточного деления, цитотоксичность, апоптоз, окислительный стресс, дисрегуляция метаболизма и повышение внутриклеточной концентрации кальция.
- **Ткани:** Воспалительные процессы, фиброз, остеолиз костной ткани.
- **Органы:** Иммунные реакции, дисфункция органов, нейротоксичность, канцерогенез, изменения метаболизма и энергетического баланса.
- **Популяции животных и человека:** Снижение фертильности, замедление роста, депопуляция.

Эти эффекты подчёркивают многоуровневое воздействие микро- и нанопластика на биологические системы[189].

1. Нарушение клеточных функций

Разрушение организма под воздействием МНП начинается на клеточном уровне[190]. МНП взаимодействуют с клеточными мембранами через разнообразные механизмы, включая водородные, галогенные связи, а также гидрофобные, ван-дер-ваальсовы и электростатические взаимодействия. Действуя как дестабилизирующий фактор, МНП нарушает целостность и функционирование клеточных мембран (рис. 69).

---

[187] Shanwei Government. Content on environmental health. Microplastics found in the human body for the first time, are they harmful to health? Here's the answer. https://www.shanwei.gov.cn/swhbj/467/503/content/post_550539.html (Дата доступа 01.05.2025).
[188] Ho, W.-K. et al. Sorption Behavior, Speciation, and Toxicity of Microplastic-Bound Chromium in Multisolute Systems. Environ. Sci. Technol. Lett. 10, 27–32 (2023). https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00689
[189] Kaushik, A., Singh, A., Kumar Gupta, V. & Mishra, Y. K. Nano/micro-plastic, an invisible threat getting into the brain. Chemosphere 361, 142380 (2024). https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142380
[190] Khan, A. & Jia, Z. Recent insights into uptake, toxicity, and molecular targets of microplastics and nanoplastics relevant to human health impacts. iScience 26, 106061 (2023). https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106061

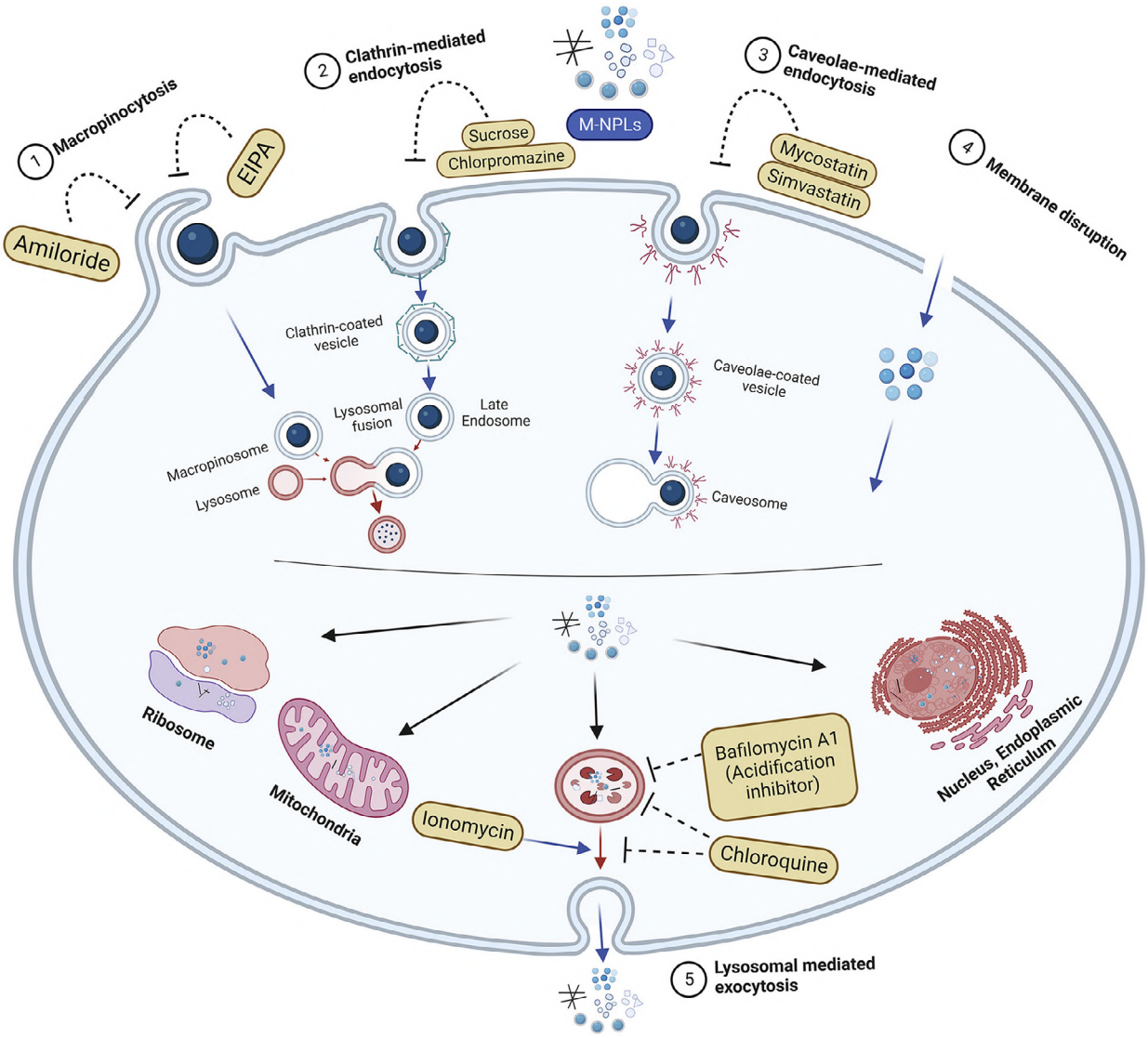


Рисунок 69. Клеточное поглощение и высвобождение M-NPL. M-NPL используют различные типы эндоцитоза.

(1) Макропиноцитоз, (2) Эндоцитоз, опосредованный клатрином, (3) Эндоцитоз, опосредованный кавеолами, и разрушение клеточной мембраны для интернализации. M-NPL высвобождаются из клеток посредством 4) эндоцитоза, опосредованного лизосомами.

Источник: 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

Благодаря своим малым размерам МНП способны проникать в клетки организма (рис. 70). Малые размеры и электростатический заряд, накопленный на МНП, обусловливают их системное воздействие на организм[191].

[191]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

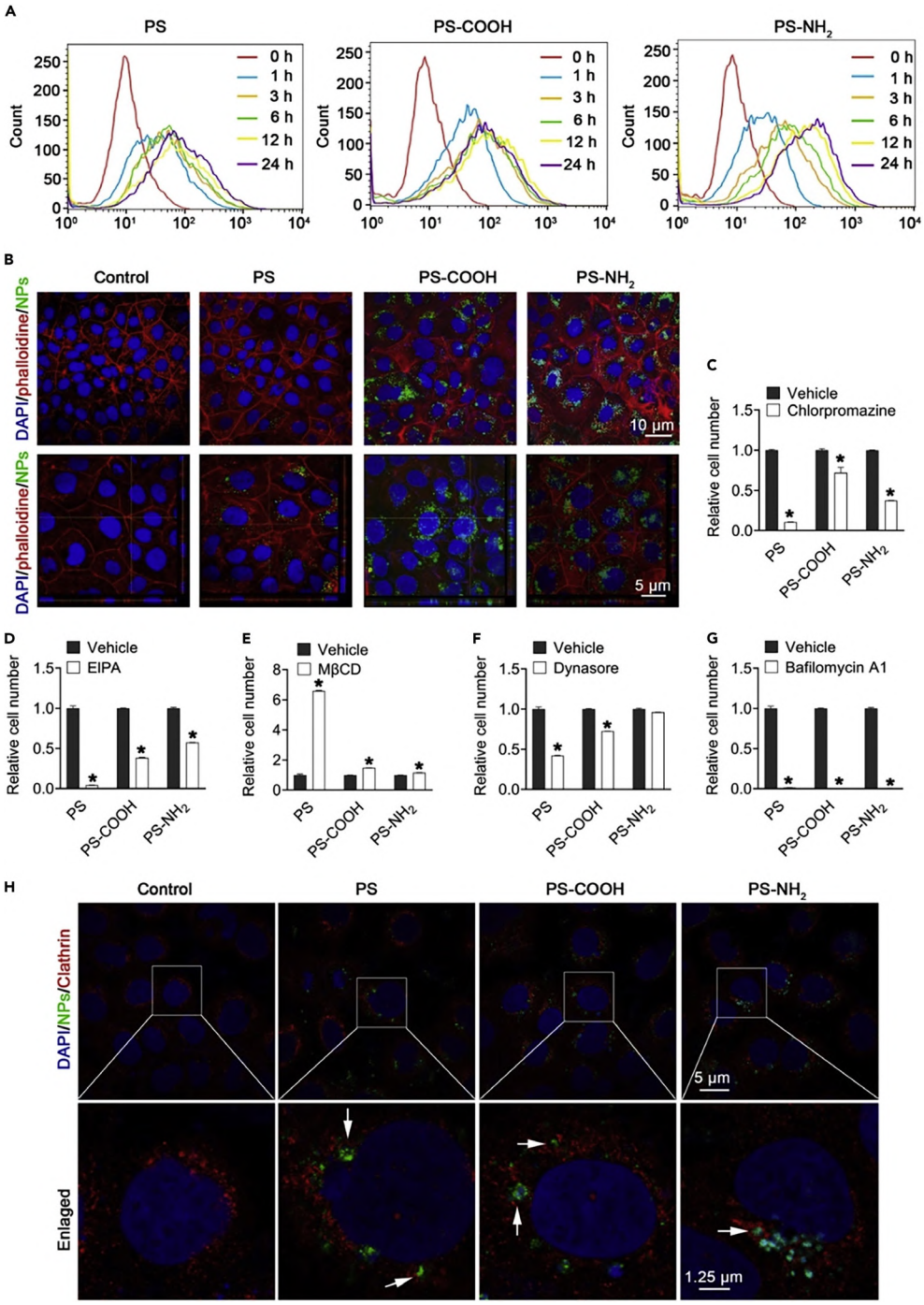


Рисунок 70. Клетки Caco-2, интернализирующие НП.

(A–G) Анализ интернализации НП клетками Caco-2 с использованием проточной цитометрии (A) и конфокальной микроскопии (B). Анализ проточной цитометрии клеток Caco-2, предварительно обработанных в течение 1 ч хлорпромазином (C), EIPA (D), MβCD (E), dynasore (F) и бафиломицином A1 (G), с последующей обработкой НП в течение 24 ч. Локализация НП в везикулах, опосредованных клатрином, исследованная с помощью конфокальной микроскопии (H).

Источник: 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

Ключевым моментом разрушающего действия на клеточном уровне является повреждение клеточных мембран, митохондрий и разрушение ДНК. Электростатически заряженные частицы микро- и нанопластика способны дестабилизировать мембранный потенциал клеток, особенно нейронов, вызывая спонтанные электрические сигналы, сбои в передаче информации между клетками или клеточную смерть.

Внутри клетки основной удар разрушительного действия нанопластика приходится на митохондрии — ключевые органеллы, обеспечивающие выживание и восстановление клетки (рис. 71). Митохондрии, помимо роли «энергетических станций», выполняют многофункциональные задачи, определяя здоровье организма, устойчивость к стрессу, развитие хронических заболеваний и процессы старения.

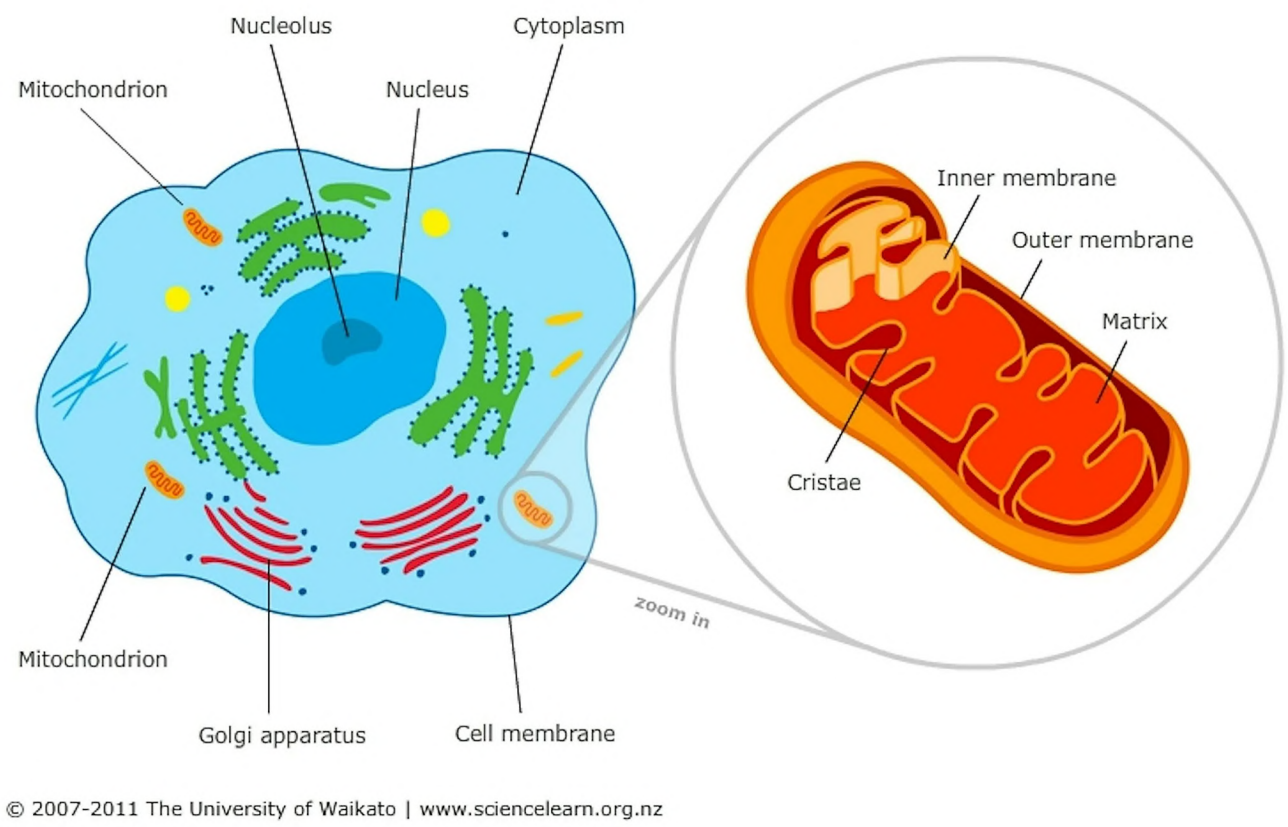


Рисунок 71. Схематическое изображение клетки, митохондрии

Правильное функционирование митохондрий имеет решающее значение для выживания клеток, гомеостаза и биоэнергетики. Структура и функция митохондрий поддерживаются системой контроля качества митохондрий, которая состоит из процессов митохондриального биогенеза, митохондриальной динамики (слияние/деление), митофагии и реакции митохондриального развернутого белка UPR MT. Дисфункция и/или повреждение митохондрий связаны с возникновением и прогрессированием нескольких заболеваний человека, включая нейродегенеративные, сердечно-сосудистые, возрастные заболевания, диабет и рак. Экологический стресс и загрязняющие вещества могут усиливать чувствительность митохондрий к повреждениям, что вызывает митохондриальную дисфункцию. Появляется все больше доказательств влияния нанопластика и микропластика на здоровье и функцию митохондрий. Сообщалось, что МНП вызывают окислительный стресс и выработку активных форм кислорода, что в конечном итоге изменяет потенциал митохондриальной мембраны. МНП могут проникать через биологические барьеры в организме человека и усваиваться клетками, потенциально изменяя митохондриальную динамику, биоэнергетику и сигнальные пути, тем самым влияя на клеточный метаболизм и функцию.

Учитывая критическую роль митохондрий в клеточном и организменном здоровье, МНП представляют значительную угрозу для здоровья и функции митохондрий. Текущие данные подчеркивают срочность решения всеобъемлющей проблемы загрязнения МНП не только для защиты окружающей среды, но и для здоровья человека[192].

Митохондрии синтезируют АТФ — универсальную молекулу энергии, обеспечивающую все биологические процессы: от мышечного сокращения и передачи нервных импульсов до гормонального синтеза и деления клеток. Они участвуют в обмене углеводов, жиров и аминокислот, а также поддерживают метаболический баланс в организме.

Митохондрии контролируют клеточную гибель (апоптоз) — критически важный процесс, предотвращающий накопление повреждённых или потенциально опасных клеток. Нарушения в этой системе связаны с развитием онкологических, аутоиммунных и нейродегенеративных заболеваний. Митохондрии играют ведущую роль в антиоксидантной защите, регулируя уровень реактивных форм кислорода (ROS). При сбоях в этой системе накапливаются повреждения, ускоряется старение, повышается риск хронических воспалений и заболеваний (рис. 72).

[192]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

Рисунок 72: Нарушение функции митохондрий, вызванное загрязнением окружающей среды, может привести к различным заболеваниям

Митохондрии имеют собственную ДНК, передаваемую по материнской линии, что делает их уникальными участниками наследуемых заболеваний. Они регулируют активность ядерных генов и адаптацию клеток к изменениям внешней среды. Также митохондрии участвуют в синтезе стероидных гормонов — кортизола, эстрогенов и тестостерона. Именно нарушение митохондриальных функций в результате воздействия на них нанопластика лежит в основе каскада патологических процессов, способных привести к тяжёлым и потенциально необратимым последствиям как в работе отдельных органов и систем, так и всего организма в целом (Таблица 1).

Неврологические заболевания	Болезнь Паркинсона, Болезнь Альцгеймера, Боковой амиотрофический склероз (БАС), Эпилепсия, Мигрени, Митохондриальные энцефаломиопатии (например, синдром MELAS)
Сердечно-сосудистые заболевания	Кардиомиопатии, Сердечная недостаточность, Атеросклероз (через окислительный стресс)
Иммунные и воспалительные заболевания	Аутоиммунные заболевания (например, системная красная волчанка), Хронические воспалительные состояния (через дисфункцию ROS и цитокиновых сигналов)
Метаболические нарушения	Сахарный диабет 2 типа, Ожирение, Метаболический синдром, Нарушения обмена жирных кислот и лактата
Онкологические заболевания	При митохондриальной дисфункции возникает повышенный риск мутаций и злокачественной трансформации клеток
Мышечные заболевания	Митохондриальные миопатии, Хроническая мышечная слабость и усталость
Болезни органов чувств	Пигментный ретинит, Оптическая нейропатия Лебера (наследственная потеря зрения)
Генетические митохондриальные синдромы	Синдром Лея, Синдром Kearns-Sayre, Синдром Барта

Таблица 1. Обзор некоторых заболеваний, связанных с митохондриальной дисфункцией

Участие МНП в механизмах преждевременного старения и онкогенеза

Воздействие нанопластика может вызывать преждевременное старение, вмешиваясь в работу митохондрий и нарушая генетические программы организма. Повреждение митохондрий приводит к избыточной выработке реактивных форм кислорода, вызывающих окислительный стресс. Это разрушает ДНК, нарушает генетическую стабильность, активирует воспаление и ускоряет старение тканей. Кроме того, нанопластик способствует укорочению теломер, что ограничивает способность клеток к делению.

> *«Мы также смогли продемонстрировать, что у людей даже одно изменение в нуклеотиде митохондриальной ДНК, связанное с ухудшением работы митохондрий и детскими митохондриальными заболеваниями, может ускорять процессы старения» ,* — рассказал Таошэн Хуан, доктор медицины, доктор философии, профессор и руководитель отдела генетики на кафедре педиатрии в Школе медицины и биомедицинских наук Джейкобса в Университете Буффало. *«Мы обнаружили, что активные формы кислорода из-за плохой функции митохондрий приводят к увеличению повреждения ДНК с течением времени»*[193].

Эпигенетическое старение — это изменения в регуляции генов, которые происходят на уровне ДНК-модификаций (включения/выключения генов), но без изменения самой ДНК. Это тонкий «молекулярный таймер», который можно измерить и который может идти быстрее или медленнее обычного старения. Высокая активность митохондриальной ДНК связана с ускоренным эпигенетическим старением. У некоторых людей уже в 20–30 лет биологический возраст клеток может быть значительно выше хронологического. То есть организм стареет быстрее, чем должен.

У людей с митохондриальными нарушениями уже в молодом возрасте часто появляются возрастные болезни, такие как: деменция, сердечно-сосудистые заболевания, аритмии, сердечная недостаточность. Шотландские учёные установили, что чем позже человек родился, тем выше у него риск заболеть к 50 годам. Например, у людей, родившихся в 1956–1960 годах, в среднем больше болезней, чем у тех, кто родился раньше — в 1951-1955 или 1946–1950 годах[194] (рис. 73).

[193]Medindia. Study unravels how mitochondrial dysfunction leads to premature aging. (2022) https://www.medindia.net/news/study-unravels-how-mitochondrial-dysfunction-leads-to-premature-aging-208364-1.htm (Дата доступа 01.05.2025).
[194]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

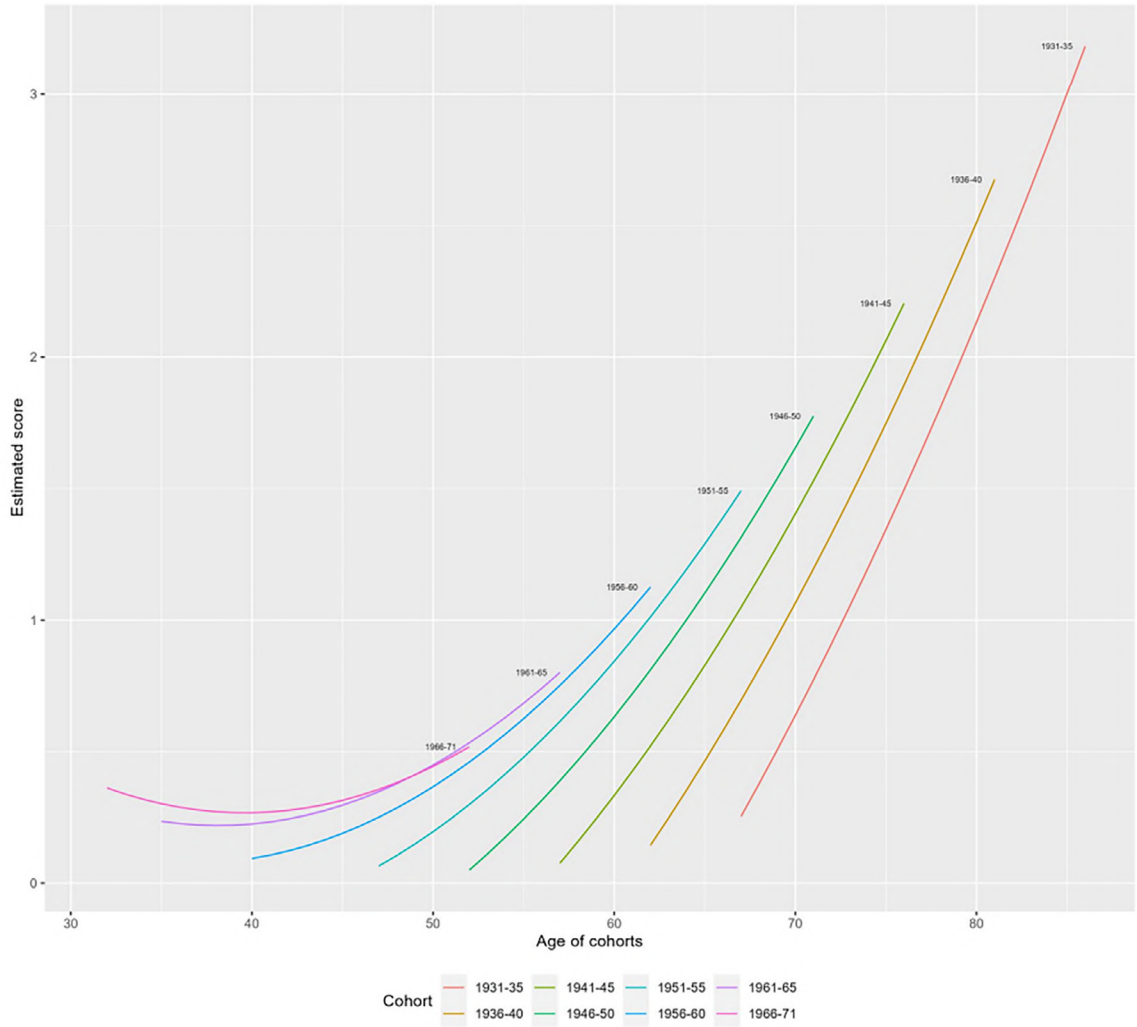


Рисунок 73. Прогнозируемые показатели мультиморбидности по когортам и возрасту (на основе оценок модели 1 в Дополнительная таблица S3).

Источник: 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

Мутации митохондриальной ДНК при старении и раке

Ключевые механизмы, лежащие в основе старения и развития онкологических заболеваний, во многом совпадают. Одним из центральных звеньев является нарушение функции митохондрий — клеточных органелл, отвечающих за выработку энергии. С возрастом в тканях человека накапливаются мутации митохондриальной ДНК (мтДНК), и схожие изменения давно обнаружены при различных формах рака[195].

Когда в клетке происходит мутация, это может изменить её работу. Например, клетка начинает расти и делиться быстрее, не умирает, даже когда должна, становится «невидимой» для иммунной системы, лучше переносит нехватку кислорода или пищи.

Такие клетки получают преимущество перед нормальными клетками — они живут дольше, делятся чаще, заполняют всё больше места и начинают доминировать над другими. Когда таких клеток накапливается много, может начаться развитие опухоли.

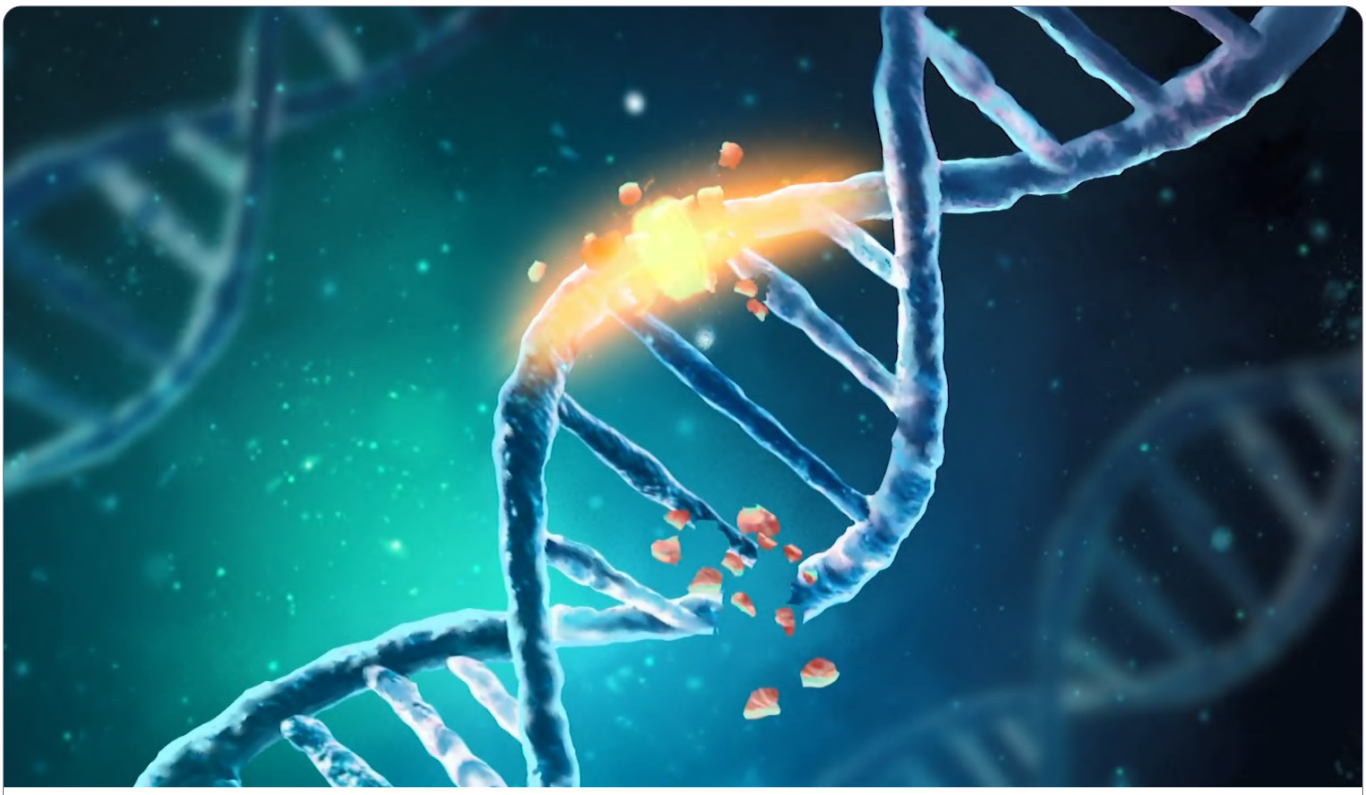


Рисунок 74. Повреждения ДНК, приводящие к мутациям.

Особенно уязвимы к митохондриальным повреждениям постмитотические клетки — нейроны, кардиомиоциты и некоторые мышечные клетки. Они не делятся, поэтому накопленные с возрастом мутации, особенно в митохондриальной ДНК (рис. 74), остаются в клетке на протяжении всей её жизни.

[195]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

Постмитотические клетки — очень активные: нейроны потребляют много энергии для передачи сигналов, а клетки сердца постоянно качают кровь, а значит, митохондрии работают на пределе, производя большое количество активных форм кислорода (АФК). Активные формы кислорода повреждают митохондрии, усиливая выработку новых АФК и запуская порочный круг разрушений.

Повреждения накапливаются, что может привести к запуску патологических процессов (например, нейродегенеративных, сердечно-сосудистых заболеваний, онкологии) и даже смерти.

Возможно, этим объясняется то, что болезни сердечно-сосудистой системы, инфаркты, инсульты и онкологические заболевания являются основными причинами смерти среди всех других заболеваний. А токсическое действие нанопластика на организм человека, которое многократно усилилось за последние 10 - 20 лет, объясняет, почему эти болезни помолодели и обрели масштабы пандемии, унося десятки миллионов человеческих жизней ежегодно. Ведь нанопластик прежде всего разрушает работу митохондрий, провоцирует окислительный стресс и мутации в митохондриальной и ядерной ДНК.

Дестабилизация гормональной системы под влиянием МНП

При производстве пластмасс используются химические вещества, которые нарушают работу эндокринной системы и гормональный баланс. Они способны имитировать, блокировать или изменять действие естественных гормонов, что может приводить к различным проблемам со здоровьем.

В организме человека обнаружено более 3 тыс. химических веществ, используемых в упаковке[196]. Около 100 из этих химикатов классифицируются как представляющие «высокую опасность» для здоровья человека.

Бисфенол

Бисфенол А (БФА, $C_{15}H_{16}O_2$) — синтетический пластификатор, который широко используется в поликарбонатном пластике (бутылки, контейнеры), эпоксидных смолах (покрытие консервных банок) и медицинских изделиях.

При нагревании БФА мигрирует в пищу и напитки.

[196]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

> ***«БФА действует как «неконтролируемый» гормон, чтобы вытеснить естественный гормон, который обычно участвует в этом пути»*** — сказал профессор Ян Рэй, эксперт по химическим веществам окружающей среды из Школы химии Мельбурнского университета (рис. 75)[197].

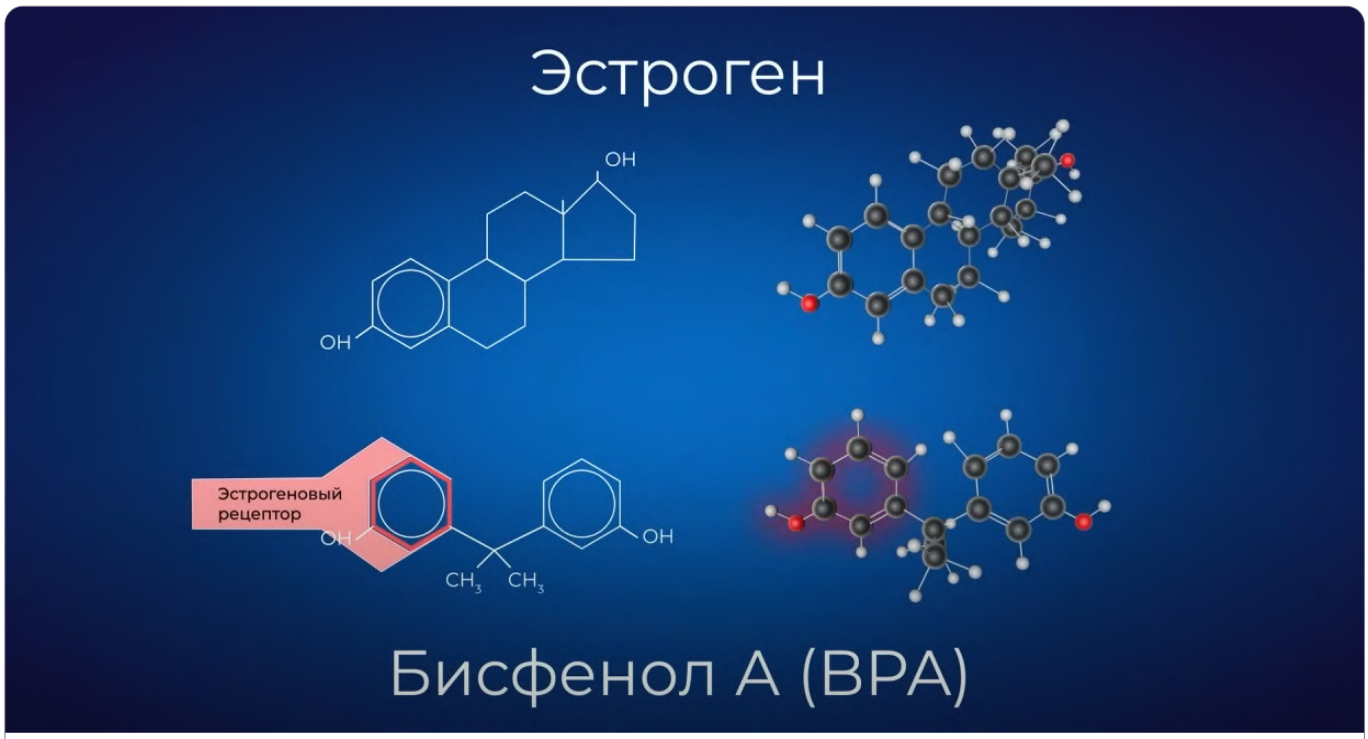


Рисунок 75. БФА (BPA, $C_{15}H_{16}O_2$) оказывает эндокринное разрушительное действие из-за его структурного сходства с гормоном эстрогеном.

Ежегодно во всём мире производится 8 миллионов тонн бисфенола А и 100 тонн каждый год выбрасываются в биосферу[198].

Исследования демонстрируют, что БФА и его замена — бисфенол S (BPS) — нарушают координацию возбуждающих и тормозных сигналов в нервной системе[199]. Оба соединения в высоких концентрациях индуцируют сходные патологические эффекты (рис. 76). Эксперименты с клетками мозга выявили, что даже низкие дозы БФА/BPS при воздействии в течение месяца изменяют химическую и электрическую передачу сигналов через синапсы[200].

[197]New Atlas. Autism in boys linked to common plastic exposure in the womb. (2024) https://newatlas.com/health-wellbeing/prenatal-bisphenol-a-bpa-autism-boys (Дата доступа 01.05.2025).
[198]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
[199]Glausiusz, J. Toxicology: The plastics puzzle. Nature 508, 306–308 (2014). https://doi.org/10.1038/508306a
[200]News-Medical. Plasticizers can impair important brain functions in humans. (2021) https://www.news-medical.net/news/20210412/Plasticizers-can-impair-important-brain-functions-in-humans.aspx (Дата доступа 01.05.2025).

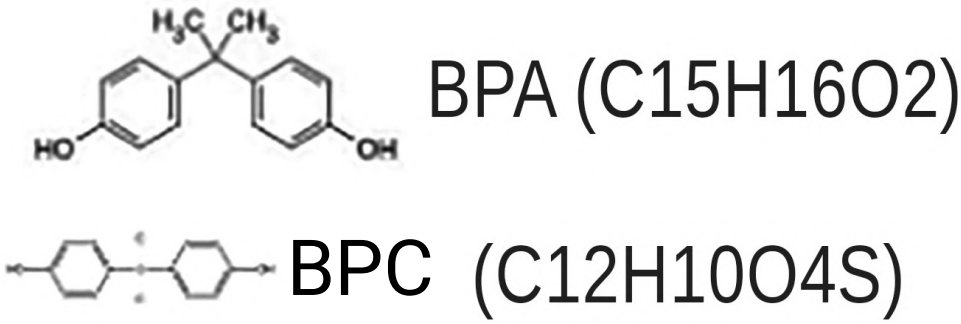


Рисунок 76. Молекулярные структуры и химические формулы бисфенола А (BPA) и бисфенола-С (BPC).

В 2023 году в ходе исследования было обнаружено, что у детей с синдромом дефицита внимания и гиперактивности были более высокие уровни бисфенола-А и фталата по сравнению с детьми, не имеющими этого состояния[201].

Учёные из Института неврологии и психического здоровья Флори в Мельбурне выявили шестикратное увеличение риска аутизма к 11 годам у мальчиков, чьи матери имели высокий уровень БФА на поздних сроках беременности[202].

> *«БФА может нарушить гормонально-контролируемое развитие мозга плода мужского пола несколькими способами, включая подавление ключевого фермента ароматазы, который контролирует нейрогормоны и особенно важен для развития мозга плода мужского пола»,* — сказала профессор Понсонби.
>
> ***«Похоже, это часть головоломки аутизма»[203].***

Подавление фермента ароматазы может объяснить половую диспропорцию при аутизме: 4–5 мальчиков на 1 девочку[204]. Девочки аутизмом заболевают реже, но при этом они переносят его в более тяжёлой форме[205].

Бисфенол А (БФА) также способствует развитию диабета 2-го типа, вызывая гипергликемию и инсулинорезистентность[206]. Глобальная смертность от сахарного диабета продолжает неуклонно расти (рис. 77).

---

[201] EarthDay.org. Babies vs. Plastics Report. (2023) https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know (Дата доступа 01.05.2025)
[202] 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
[203] 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
[204] 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
[205] 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

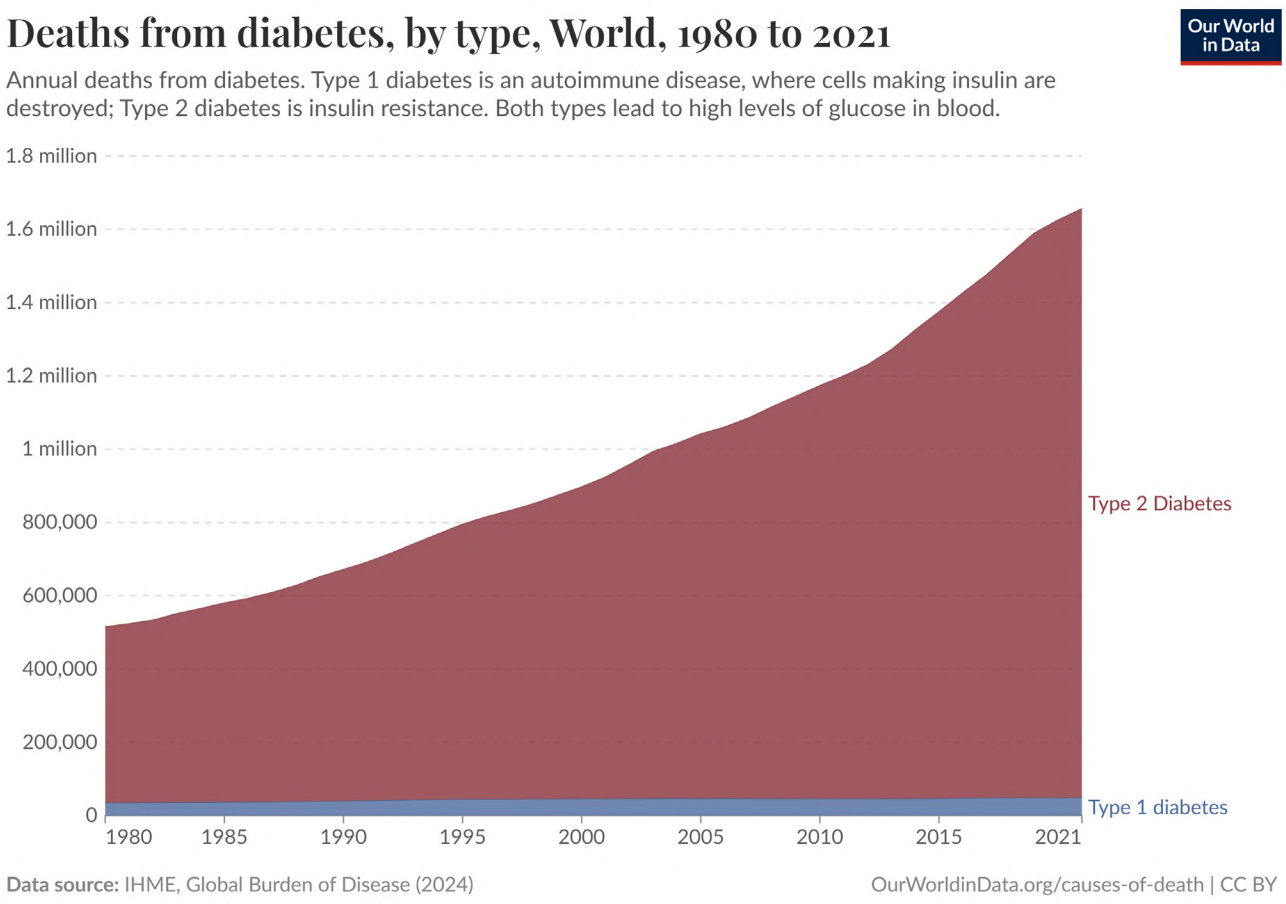


Рисунок 77. Смертность от сахарного диабета по типу, мир. 1980–2021 гг.

Источник: https://ourworldindata.org/grapher/deaths-from-diabetes-by-type

Фталаты

Фталаты — это группа химических соединений, используемых в основном как пластификаторы, то есть вещества, которые делают пластмассы, такие как поливинилхлорид (ПВХ), более гибкими, мягкими и долговечными.

Фталаты широко применяются в промышленности и быту, но их способность вмешиваться в работу эндокринной системы вызывает обеспокоенность[206].

Молекулярная формула (рис. 78). Фталаты не являются гормонами, но могут подавлять действие андрогенов (например, тестостерона), что особенно критично для мужского развития. При их воздействии наблюдается уменьшение подвижности сперматозоидов, аномалии развития половых органов (например, крипторхизм у новорождённых). У мужчин, признанных бесплодными, обнаружена более высокая концентрация фталатов.

[206] 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

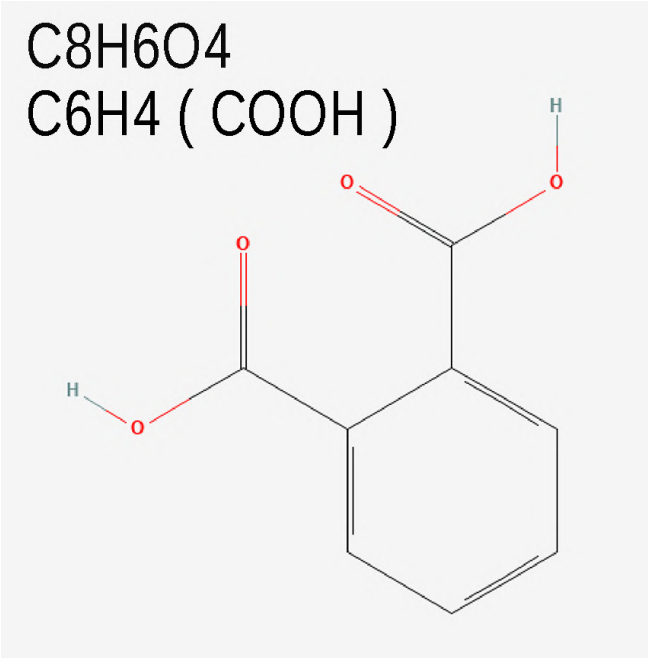


Рисунок 78. Изображение химической структуры фталата

Источник: PubChem. https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1017#section=2D-Structure (accesso: 1 Maggio 2025).

У женщин нарушается менструальный цикл, увеличивается риск выкидышей и преждевременных родов. Воздействие на плод во время беременности может привести к задержке развития мозга, снижению IQ, проблемам с поведением[207].

Учёные продемонстрировали причинно-следственную связь между фталатами окружающей среды (токсичные химикаты, которые содержатся в повседневных потребительских товарах) и повышенным ростом фибромиом матки, наиболее распространённых опухолей среди женщин[208].

Воздействие фталатов, содержащихся в пластике, повышает риск развития детских онкозаболеваний на 20%, с трёхкратным ростом случаев злокачественных образований костей и двукратным увеличением заболеваемости лимфомой и лейкемией[209].

Исследование с участием более 5 000 американских матерей показало, что фталаты связаны с риском рождения детей с низким весом и раньше срока[210]. Авторы отмечают, что эти факторы умеренно повышают вероятность смерти младенцев, а также могут влиять на успеваемость детей и увеличивать риск сердечных заболеваний и диабета, а также психических расстройств, таких как аутизм и СДВГ[211] у детей.

[207] Welch, B. M. et al. Associations Between Prenatal Urinary Biomarkers of Phthalate Exposure and Preterm Birth: A Pooled Study of 16 US Cohorts. JAMA Pediatrics 176, 895–905 (2022). https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2022.2252
[208] Iizuka, T. et al. Mono-(2-ethyl-5-hydroxyhexyl) phthalate promotes uterine leiomyoma cell survival through tryptophan-kynurenine-AHR pathway activation. Proceedings of the National Academy of Sciences 119, e2208886119 (2022). https://doi.org/10.1073/pnas.2208886119
[209] Ahern, T. P. et al. Medication–Associated Phthalate Exposure and Childhood Cancer Incidence. JNCI: Journal of the National Cancer Institute 114, 885–894 (2022). https://doi.org/10.1093/jnci/djac045
[210] Trasande, L. et al. Prenatal phthalate exposure and adverse birth outcomes in the USA: a prospective analysis of births and estimates of attributable burden and costs. The Lancet Planetary Health 8, e74–e85 (2024). https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00270-X
[211] Baker, B. H. et al. Ultra-processed and fast food consumption, exposure to phthalates during pregnancy, and socioeconomic disparities in phthalate exposures. Environment International 183, 108427 (2024). https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108427

Химические добавки в пластиках способствуют развитию ожирения[212]. Согласно данным ВОЗ, в период с 1990–2020 гг. во всём мире уровень ожирения среди взрослых увеличился более чем вдвое, а среди подростков — в четыре раза[213].

Тенденции ожирения среди взрослых и молодежи в США (рис. 79–80)

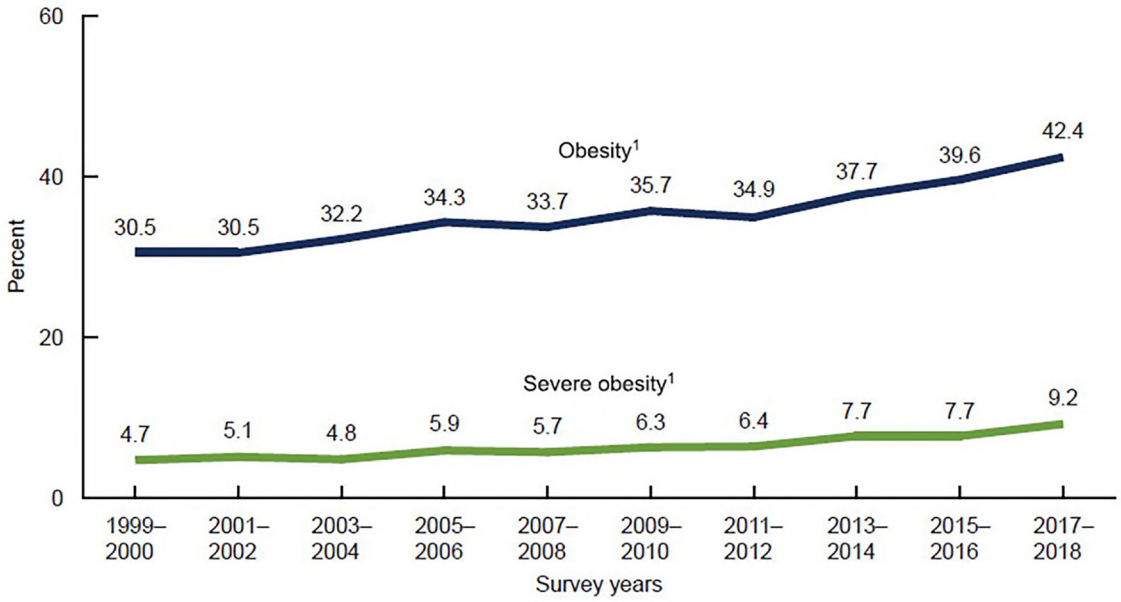


Рисунок 79. Тенденции распространённости ожирения и тяжелой формы ожирения среди взрослых в возрасте 20 лет и старше с поправкой на возраст: Соединённые Штаты, 1999–2000–2017–2018 гг.

Источник: National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. Overweight & Obesity Statistics. NIDDK (2021) https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity (Дата доступа: 1 мая 2025 года).

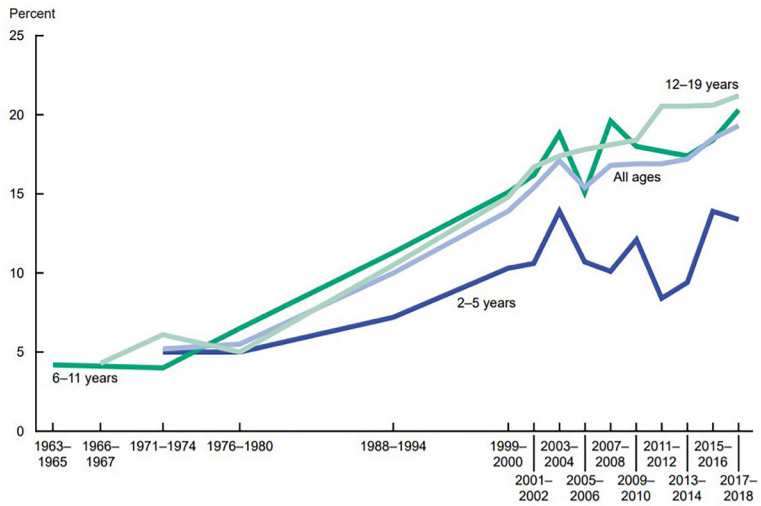


Рисунок 80. Тенденции ожирения среди детей и подростков в возрасте 2–19 лет, по возрастам: США, 1963–1965–2017–2018 гг.

Источник: National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases. Overweight & Obesity Statistics. NIDDK (2021) https://www.niddk.nih.gov/health-information/health-statistics/overweight-obesity (Дата доступа: 1 мая 2025 года).

[212]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

[213]World Health Organization. Obesity and overweight. WHO Fact Sheets. (2025) https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight (дата доступа 10 мая 2025).

Электростатический заряд нанопластика как ключевой фактор его повышенной токсичности для организма человека

Организм человека постоянно производит биоэлектрическую энергию. Все физиологические процессы — от сердечной деятельности и сенсорного восприятия до высших когнитивных функций — обусловлены химическими реакциями, инициируемыми перемещением электрических зарядов. Внутриклеточные и внеклеточные жидкости, в которых находятся белки, состоят преимущественно из воды, обладающей электрополярными свойствами. В связи с этим электростатические взаимодействия, включая водородные связи, ионные связи и гидрофобную упаковку, играют ключевую роль в формировании структур клеточных белков, необходимых для их функционирования и, как следствие, для поддержания жизнедеятельности организма[214].

Биоэлектричество играет непосредственную роль в функционировании клеток через взаимодействие ионных каналов и мембранных потенциалов. Каждая клетка поддерживает разность электрических потенциалов между своей внутренней и внешней средой — мембранный потенциал покоя, который обеспечивается различием в концентрации ионов внутри и снаружи клетки (рис. 81). Основные типы ионных каналов, присутствующих в организме человека, включают натриевые, калиевые, кальциевые и хлоридные каналы. Эти каналы, совместно с мембранным потенциалом, обеспечивают ключевые функции различных типов клеток (рис. 82, 83).

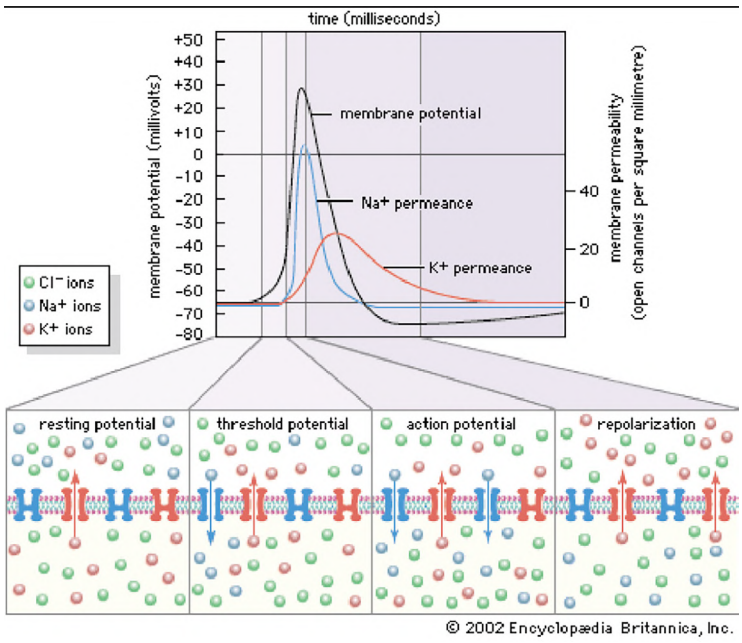


Рисунок 81. Ионная проницаемость и потенциал действия. Изменения ионной проницаемости, лежащие в основе потенциала действия. Электрический потенциал градуируется слева в милливольтах, ионная проницаемость справа в открытых каналах на квадратный миллиметр. При потенциале покоя мембранный потенциал близок к E_K, равновесному потенциалу K^+. Когда натриевые каналы открываются, мембрана деполяризуется. Когда деполяризация достигает порогового потенциала, она запускает потенциал действия. Генерация потенциала действия приближает мембранный потенциал к E_{Na}, равновесному потенциалу Na^+. Когда натриевые каналы закрываются (снижая проницаемость Na^+), а калиевые каналы открываются (повышая проницаемость K^+), мембрана реполяризуется.
Источник: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). https://www.britannica.com/science/neuron

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

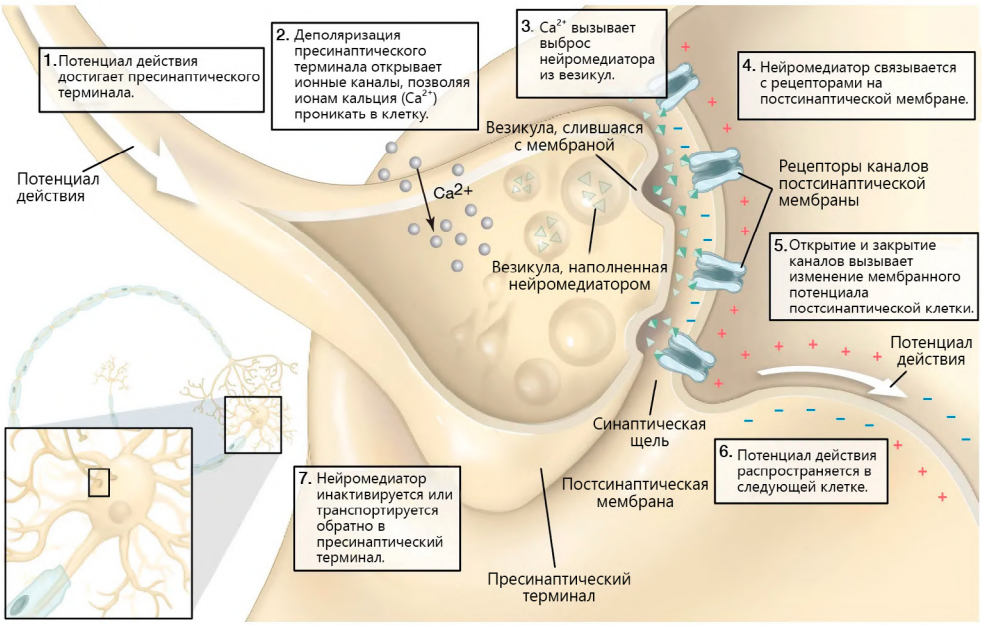


Рисунок 82. Синапс Химическая передача нервного импульса в синапсе. Поступление нервного импульса в пресинаптическое окончание стимулирует высвобождение нейромедиаторов в синаптическую щель. Связывание нейромедиаторов с рецепторами на постсинаптической мембране стимулирует регенерацию потенциала действия в постсинаптическом нейроне.
Источник: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). https://www.britannica.com/science/neuron

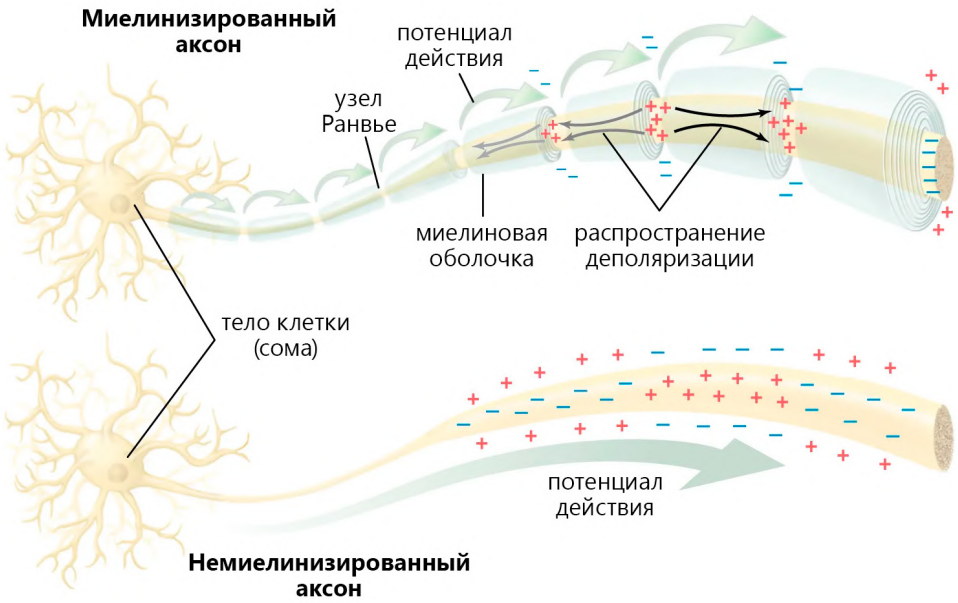


Рисунок 83. Нейрон: проведение потенциала действия.
В миелинизированном аксоне миелиновая оболочка препятствует локальному току (маленькие черные стрелки) протекать через мембрану. Это заставляет ток перемещаться вниз по нервному волокну к немиелинизированным перехватам Ранвье, которые имеют высокую концентрацию ионных каналов. При стимуляции эти ионные каналы распространяют потенциал действия (большие зеленые стрелки) к следующему узлу. Таким образом, потенциал действия скачет вдоль волокна, поскольку он регенерируется в каждом узле, процесс, называемый скачкообразной проводимостью. В немиелинизированном аксоне потенциал действия распространяется вдоль всей мембраны, затухая по мере того, как он диффундирует обратно через мембрану в исходную деполяризованную область.)
Источник: Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025). https://www.britannica.com/science/neuron

Биоэлектричество, возникающее в организме человека (например, при работе мышц или передаче нервных импульсов), не вредит человеку, так как является естественной частью физиологических процессов. Но микро- и нанопластики, попадая в организм, приносят с собой электростатический заряд, который они способны удерживать долгое время. И именно этот заряд может навредить здоровью, вмешиваясь во все биологические процессы.

Нанопластик представляет собой частицы пластика размером менее 1 микрометра, которые благодаря своей уникальной структуре обладают способностью накапливать электростатические заряды, что делает их объектом пристального внимания учёных.

Когда частицы микро- и нанопластика электризуются в результате *трибоэлектрического эффекта* (при контакте и трении с другими поверхностями), они приобретают электростатический заряд — положительный или отрицательный. Этот заряд влияет на то, как частицы ведут себя в организме и окружающей среде.

Уникальная структура частиц нанопластика позволяет им адсорбировать загрязняющие вещества, ионы и органические молекулы, что усиливает их роль как переносчиков токсинов в экосистемах[215, 216].

Химический состав нанопластика играет ключевую роль в формировании его электростатических свойств: такие полимеры, как полистирол (PS), полиэтилен (PE) или полипропилен (PP), часто содержат функциональные группы — карбоксильные (-COOH), сульфатные (-SO3H) или аминогруппы (-NH2), — которые могут ионизироваться в зависимости от условий среды. Например, исследование, опубликованное в журнале Langmuir, показало, что полистирольные наночастицы с карбоксильными группами (PS-COOH) имеют отрицательный зета-потенциал, а с аминогруппами (PS-NH2) — положительный, что подтверждает влияние функциональных групп на заряд нанопластика[217].

Процесс накопления зарядов не ограничивается только химическими свойствами. Во время производства или механического воздействия, такого как трение, нанопластик может приобретать заряд через контактную электризацию. Исследование, проведённое на пластиковых контейнерах, выявило, что полистирол способен накапливать заряд до -10 кВ, который сохраняется длительное время и притягивает противоположно заряженные частицы, такие как пыль или споры бактерий[218]. Более того, вариации в структуре полимера — например, наличие полярных групп — позволяют нанопластику проявлять как положительный, так и отрицательный заряд в зависимости от pH среды. В кислой среде аминогруппы могут придавать частицам положительный заряд, тогда как в щелочной среде преобладают отрицательные заряды за счёт карбоксильных групп, что подтверждено исследованиями на растениях *Arabidopsis thaliana*[219].

---

[215]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

[216]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

[217]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

[218]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

[219]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

Таким образом, понимание структуры нанопластика и его электростатических характеристик не только раскрывает его физическую природу, но и закладывает основу для анализа того, как эти частицы могут влиять на экосистемы и организмы, что будет рассмотрено далее в контексте их патогенных механизмов.

Благодаря высокой диэлектрической проницаемости (способности удерживать электрический заряд) нанопластик, попадая внутрь организма продолжает накапливать новые вредоносные заряды, которые в норме нейтрализуются или рассеиваются через естественные проводящие системы организма.

Это нарушает процессы саморегуляции организма, создавая риск для клеточных структур из-за длительного воздействия аномальной электростатической энергии.

Чтобы оценить масштаб угрозы попадающего в организм нанопластика, можно снова обратиться к биоэлектрическим системам организма — сложным механизмам, где электрические импульсы служат языком межклеточной коммуникации.

Эти невидимые токи, отточенные миллионами лет эволюции превращают биоэлектрические импульсы в язык жизни. Но их гармонию нарушают чуждые элементы — микроскопические частицы нанопластика.

Нанопластики, попадая в организм, способны адсорбировать ионы и формировать зоны с аномальной электропроводностью, нарушая естественный ионный баланс и процессы нейтрализации локальных зарядов, которые регулируются межклеточной жидкостью. Адсорбция ионов на поверхности нанопластиков приводит к накоплению электростатического заряда на этих частицах. Это явление может провоцировать окислительный стресс за счёт генерации активных форм кислорода (АФК), а также нарушать электрохимическую коммуникацию между клетками, что негативно влияет на их функции.

Это подтверждается исследованием[220], где частицы полистирола размером 100 нм, даже в присутствии ионов натрия (Na^+), сохраняли стабильность и адсорбировались на поверхности бактерий, несмотря на их отрицательный заряд. Например, эксперименты с *Staphylococcus aureus* и *Klebsiella* pneumoniae показали, что нанопластик значительно изменяет дзета-потенциал клеток, делая их поверхность более отрицательной, что нарушает естественный электростатический баланс.

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

Заряженные частицы нанопластика могут влиять на электрические поля вокруг клеток, искажая передачу сигналов. Это похоже на помехи в радиосвязи: вместо чётких команд — хаотичный шум, который мешает клеткам обмениваться информацией. Хотя прямое влияние на нервные клетки в исследовании не изучалось и выводы о влиянии на человека носят предварительный характер и требуют дополнительных исследований, но изменение поверхностного заряда бактерий указывает на то, что нанопластик способен модифицировать электрохимические свойства мембран. Например, при концентрациях выше 64 микрограмм на миллиметр частицы полистирола вызывали значительные сдвиги дзета-потенциала, что потенциально может нарушать работу ионных каналов или рецепторов, критичных для межклеточной коммуникации.

Способность наночастиц «прилипать» к поверхностям, как показали снимки атомно-силовой микроскопии в вышеупомянутом исследовании (рис. 84), создаёт риск долговременного воздействия. Частицы, оседая в тканях, могут формировать устойчивые электростатические аномалии, которые ионы натрия и калия не могут полностью нейтрализовать, особенно если нанопластик проникает внутрь клеток, минуя защитные механизмы межклеточной жидкости.

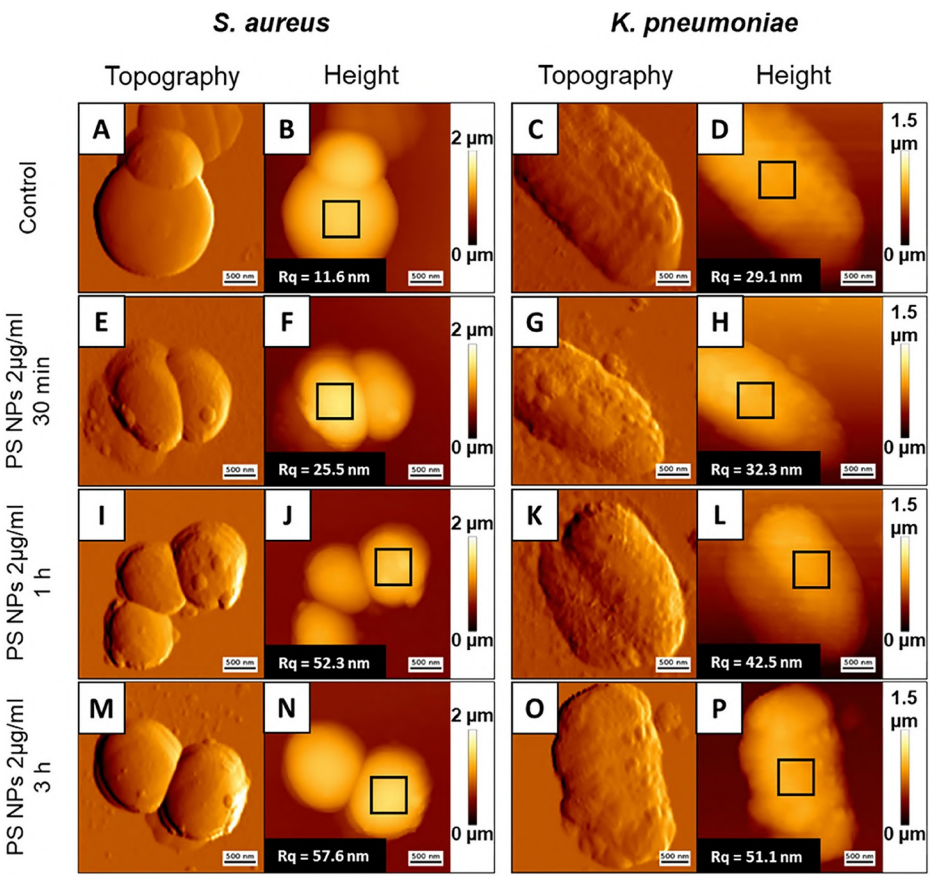


Рисунок 84. Топография поверхности (A, C, E, G, I, K, M, O) и изображения высоты (B, D, F, H, J, L, N, P) штамма S. aureus ATCC 6538 и штамма K. pneumoniae ATCC 4352, подвергнутых воздействию наночастиц полистирола размером 100 нм в дозах 2 мкг/мл в течение 0,5 ч (E – H), 1 ч (I – L) и 3 ч (M – P) по сравнению с необработанным контролем (A – D). Масштабная линейка — 500 нм. Внутри панелей отмечены области (чёрные квадраты), из которых были рассчитаны среднеквадратическая шероховатость поверхности, и значения шероховатости (параметр Rq) измеренных поверхностей бактерий (среднеквадратичный корень высот профиля по длине оценки).

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

Также опасность патогенного заряда, накопленного на нанопластике, заключается в том, что он может создавать вокруг иммунных клеток электрические помехи, что подтверждается исследованием[221], в котором показано, что положительно заряженные нанопластики ($PS\text{-}NH_2$) значительно снижают жизнеспособность иммунных клеток и стабильность лизосомальных мембран по сравнению с отрицательно заряженными (PS-COOH), что указывает на важность заряда в их взаимодействии с клетками.

Электростатически заряженные частицы МНП обладают повышенной способностью адсорбироваться на клеточных мембранах, тканях и других биологических поверхностях, буквально прилипая к ним — это повышает риск механических и химических повреждений клеток, нарушая их структуру и функции.

Электростатический заряд может облегчить проникновение частиц МНП через такие сложные биологические барьеры, как гематоэнцефалический или гематоплацентарный. В результате токсины могут достигать головного мозга или плода, что повышает риск нейротоксических эффектов и нарушений внутриутробного развития.

Электростатическое воздействие нанопластика может нарушать структуру и функционирование белков, ионных каналов, клеточных рецепторов, что, в свою очередь, будет вызывать сбои в передаче сигналов между клетками, запускать окислительный стресс и ослаблять иммунную защиту организма.

Эти изменения могут инициировать каскад патологических процессов, включая хроническое воспаление, нейродегенеративные расстройства, развитие злокачественных опухолей и системную дисфункцию организма, существенно повышая риск тяжелых заболеваний.

Таким образом, накопление электростатического заряда на нанопластике — это не просто физическое явление, а механизм, усиливающий опасность МНП. Особенно учитывая тот факт, что на МНП электростатический заряд способен удерживаться очень длительное время, а сами частицы микро- и нанопластика практически не выводятся из организма.

Изучение этого феномена на данный момент является крайне важным, так как ведёт к пониманию того, как заряды патогенного электричества накопленные на нанопластике могут стать макроскопической угрозой для жизни человеческого вида как такового.

До недавнего времени считалось, что основа клеточной энергетики — перенос протонов — определяется исключительно химией: протоны будто бы «перепрыгивают» от одной молекулы воды к другой. Однако новое исследование, опубликованное в *Proceedings of the National Academy of Sciences*, радикально меняет это представление. Оказалось, что транспорт протонов в живых организмах зависит не только от химических свойств, но и от квантовых — в частности, от спина электронов и хиральности биологических молекул (рис. 85).

---

[221]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

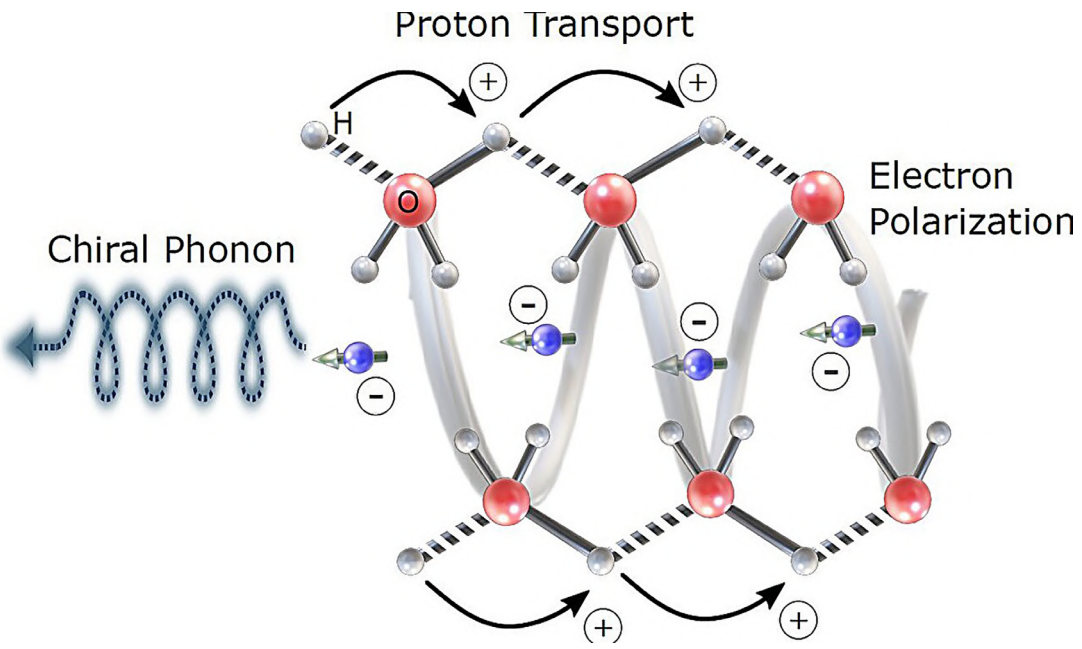


Рисунок 85. Схематическая игрушечная модель. Транспорт протонов сопровождается электронной поляризацией в хиральных средах. Из-за эффекта CISS эта электрическая поляризация производит спиновую поляризацию. Сохранение углового момента генерирует хиральные фононы, которые усиливают перенос протонов.

Источник: Naama Goren. 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

Исследование, проведённое израильскими учёными из Еврейского университета, продемонстрировало: в белках, таких как лизоцим, перенос протонов существенно ускоряется при введении электронов с «правильным» спином и, наоборот, — тормозится при противоположном. Это связано с тем, что в живых системах протоны и электроны ведут себя как слаженный квантовый механизм. Даже минимальные изменения в их спиновой ориентации могут повлиять на фундаментальные процессы — выработку энергии, обмен веществ, регуляцию внутри клетки.

Как отметил руководитель исследования Наам Горен: ***«Наши результаты показывают, что способ перемещения протонов в биологических системах касается не только химии, но и квантовой физики»***. А значит, даже малейшие сбои в электрическом заряде или магнитной ориентации способны повлиять на метаболизм клеток, выработку энергии и общее состояние здоровья[222].

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

Системное воздействие МНП на органы и функциональные системы человека

После попадания в организм человека, МНП с кровотоком проникают во все органы и ткани (рис. 86). Пластиковые частицы были обнаружены в крови человека, сердечной и костной ткани, мозге, плаценте, лёгких, печени и других органах[223].

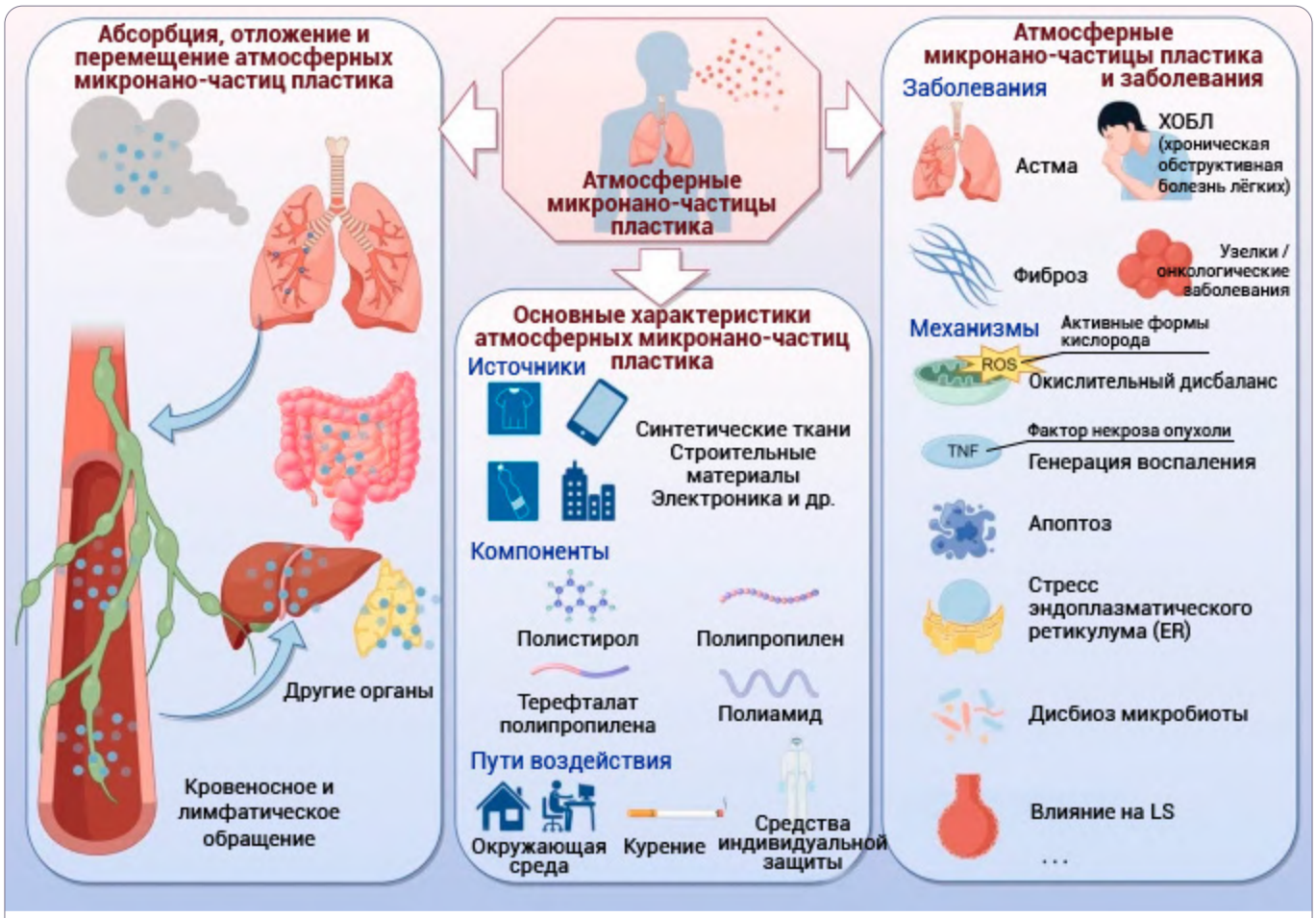


Рисунок 86. МНП: источники, пути попадания и токсические эффекты.

Источник: 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

[223]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

Механизмы поражения дыхательной системы при ингаляции МНП

Один из основных путей попадания МНП в организм человека — это дыхание.

Результаты исследования китайских ученых[224] показали, что за два часа активного времяпровождения на открытом воздухе взрослые вдыхают около 106 000 частиц микропластика, а дети около 73 700.

Частицы размером менее 0,1 мкм, благодаря своим термодинамическим свойствам, могут эффективно осаждаться по всему дыхательному пути (от верхних дыхательных путей до альвеол)[225].

Лёгкие имеют обширную альвеолярную поверхность (около 150 м²) и тонкий тканевый барьер (менее 1 мкм), что позволяет НП легко проникать в кровоток (рис. 87).

В 13 из 20 образцов лёгочной ткани человека обнаружен микропластик (МП)[226].

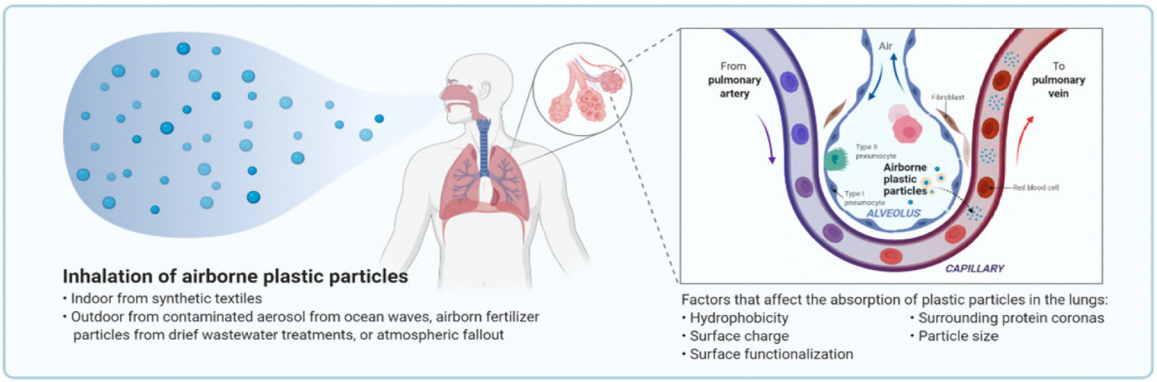


Рисунок 87. Ингаляционный путь попадания пластиковых частиц в организм человека[227]

По данным исследования у 22 пациентов с заболеваниями лёгких во всех образцах мокроты обнаружен микропластик [228]: от 18,75 до 91,75 частиц/10 мл[229].

Также установлена связь между аллергическим ринитом и микропластиком[230].

МНП тесно связаны с возникновением и развитием различных респираторных заболеваний, включая астму, фиброз лёгких, ХОБЛ и опухоли[229]. Исследование показало, что 97 % образцов злокачественных опухолей лёгких содержали волокна микропластика[231].

---

[224]Peking University Center for Environmental Science and Engineering. Prof. Yi Huang's team made new progress in atmospheric microplastic distribution and its human health risk. CESE. (2022) https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm (Дата доступа 01.05.2025).
[225]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
[226]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
[227]Yee, M. S.-L. et al. Impact of Microplastics and Nanoplastics on Human Health. Nanomaterials 11, 496 (2021). https://doi.org/10.3390/nano11020496
[228]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
[229]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
[230]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
[231]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

Возможные механизмы включают окислительный стресс, воспаление и дисбаланс микробиоты легких. МНП могут приводить к возникновению воспаления лёгких[232].

Согласно отчету ВОЗ, в настоящее время инфекции нижних дыхательных путей остаются наиболее смертоносным инфекционным заболеванием в мире и занимают пятое место среди всех причин смерти[233]. А число смертей от рака трахеи, бронхов и лёгких возросло и занимает шестое место среди ведущих причин смертности.

Нейротоксическое действие МНП. Поражение центральной и периферической нервной системы

Исследования подтверждают, что неврологические расстройства являются основной причиной физической и когнитивной инвалидности во всём мире, в настоящее время они затрагивают приблизительно 15 % населения мира. Абсолютное число пациентов значительно возросло за последние 30 лет[234]. Вдобавок ко всему, ожидается, что бремя хронических нейродегенеративных заболеваний как минимум удвоится в течение следующих двух десятилетий. Согласно данным ВОЗ, каждый восьмой человек в мире страдает психическим расстройством[235].

Заболеваемость биполярным расстройством среди подростков и молодых людей во всём мире увеличилась с 79,21 на 100 000 населения в 1990 году до 84,97 на 100 000 населения в 2019 году[236]. За последние три десятилетия наблюдался рост заболеваемости как среди мужчин, так и среди женщин (рис. 88). Исследования показывают увеличение психических расстройств среди детей и подростков в последние годы. Согласно отчёту 2022 года о национальном качестве и различиях в здравоохранении, с 2016 по 2019 год число обращений в отделения неотложной помощи по причинам, связанным с психическим здоровьем, среди детей 0–17 лет возросло с 784,1 до 869,3 на 100 000. Кроме того, с 2008 по 2020 год уровень смертности от суицидов среди лиц 12 лет и старше увеличился на 16 %, с 14,0 до 16,3 на 100 000[237].

По данным нового отчёта медицинской страховой компании *Blue Cross Blue Shield*, с 2013 года число диагнозов клинической депрессии, также известной как большая депрессия, возросло на 33 %. *«Некоторые источники уже начинают предсказывать, что к 2030 году депрессия станет основной причиной потери долголетия или жизни»*, — говорит доктор Трент Хейвуд, главный врач Ассоциации *Blue Cross Blue Shield*. Женщины и мужчины, страдающие депрессией, в среднем могут потерять до 9,7 лет здоровой жизни, говорится в отчёте[238].

---

[232]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
[233]World Health Organization. The top 10 causes of death. WHO Fact Sheets. (2024) https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death (Дата доступа 01.05.2025).
[234]Van Schependom, J. & D'haeseleer, M. Advances in Neurodegenerative Diseases. Journal of Clinical Medicine 12, 1709 (2023). https://doi.org/10.3390/jcm12051709
[235]World Health Organization. Mental disorders. WHO Fact Sheets. (2022) https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mental-disorders (Дата доступа 01.05.2025).
[236]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
[237]U.S. Department Of Health And Human Services. 2022 National Healthcare Quality and Disparities Report. Rockville, MD: Agency for Healthcare Research and Quality. (2022) https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK587174 (Дата доступа 01.05.2025).
[238]Lépine, J.-P. & Briley, M. The increasing burden of depression. NDT 7, 3–7 (2011). https://doi.org/10.2147/NDT.S19617

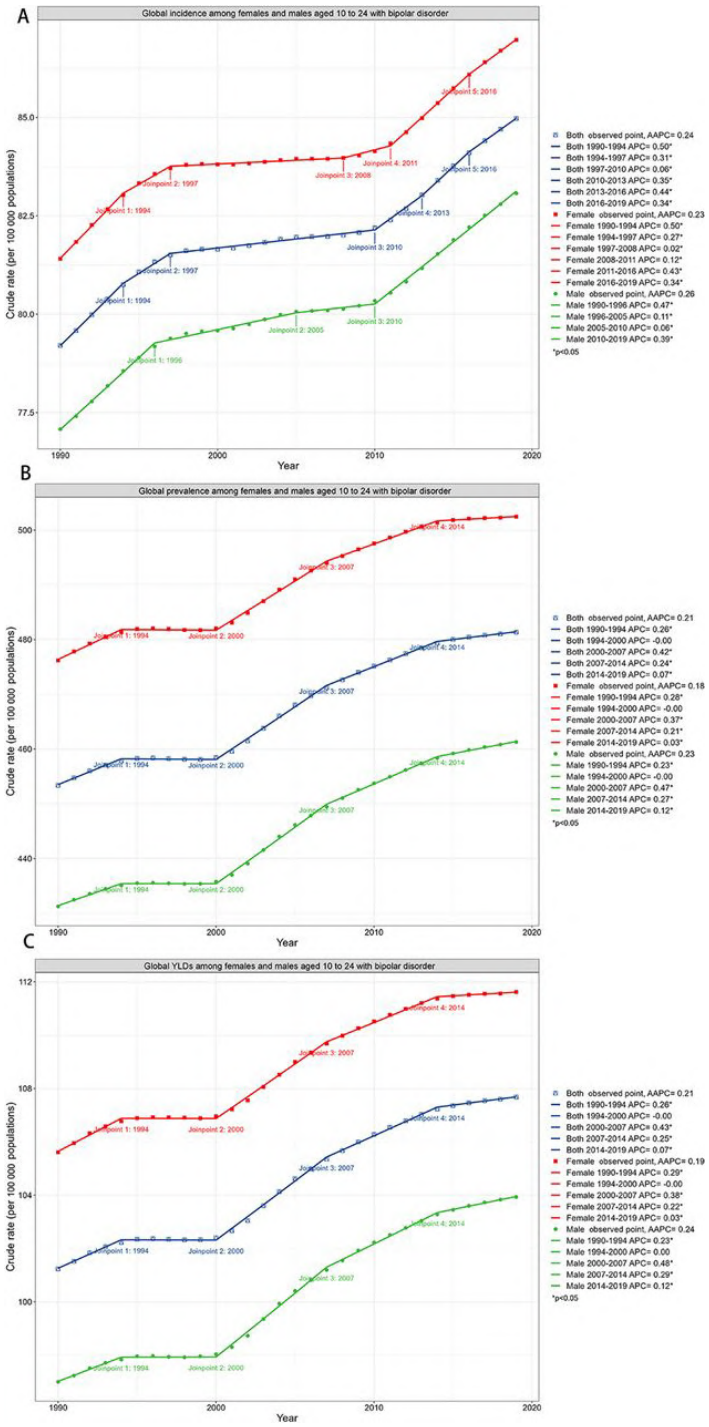


Рисунок 88. Регрессионный анализ точек соединения глобальной заболеваемости биполярным расстройством, распространённости и лет, прожитых с инвалидностью (YLDs) среди всех подростков и молодых людей в возрасте 10–24 лет с 1990 по 2019 год. *p<0,05; AAPC — среднегодовое процентное изменение; APC — годовое процентное изменение; YLDs — годы, прожитые с инвалидностью.

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

За последние десятилетия число диагнозов синдрома дефицита внимания и гиперактивности (СДВГ) неуклонно растёт. Национальные опросы населения США отражают рост распространённости с 6,1 % до 10,2 % за 20-летний период с 1997 по 2016 год[239](рис. 89).

Обзор 2023 года, который охватил 31 страну выявил, что уровень грамотности и навыков счёта снижается[240] (рис. 90).

[239]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
[240]Organisation for Economic Co-operation and Development. Do adults have the skills they need to thrive in a changing world? OECD Publications. (2024) https://www.oecd.org/en/publications/do-adults-have-the-skills-they-need-to-thrive-in-a-changing-world_b263dc5d-en.html (Дата доступа 01.05.2025).

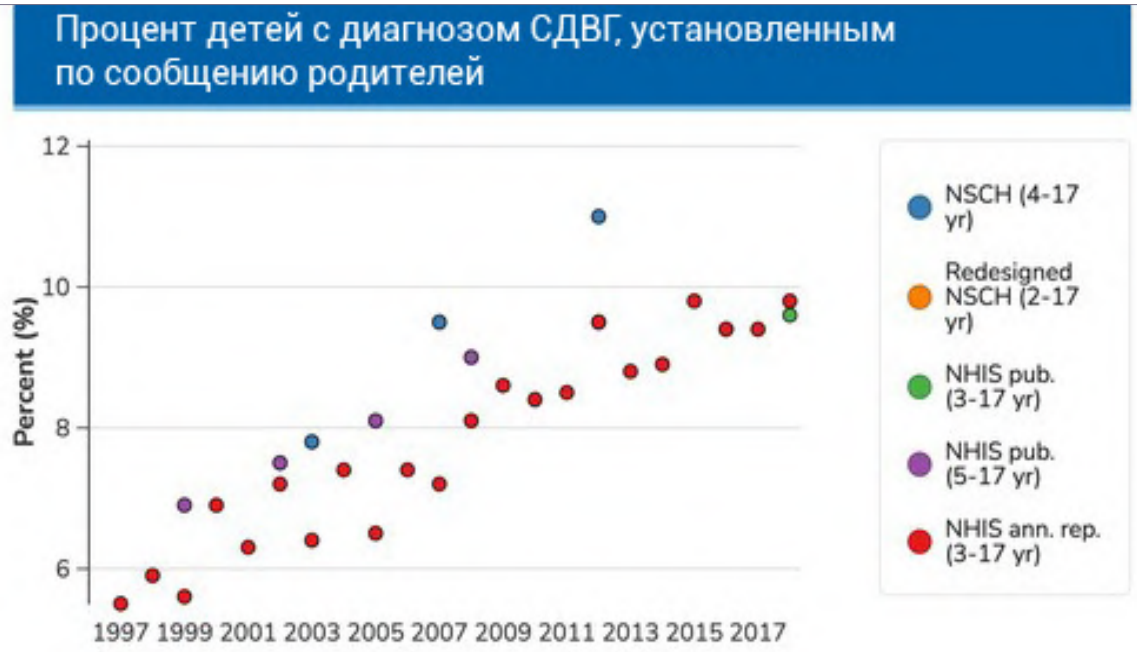


Рисунок 89. График роста СДВГ с 1997 - 2016 гг.
Источник: Xu, G., Strathearn, L., Liu, B., Yang, B. & Bao, W. Twenty-Year Trends in Diagnosed Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Among US Children and Adolescents, 1997–2016. JAMA Network Open 1, e181471 (2018). https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.1471

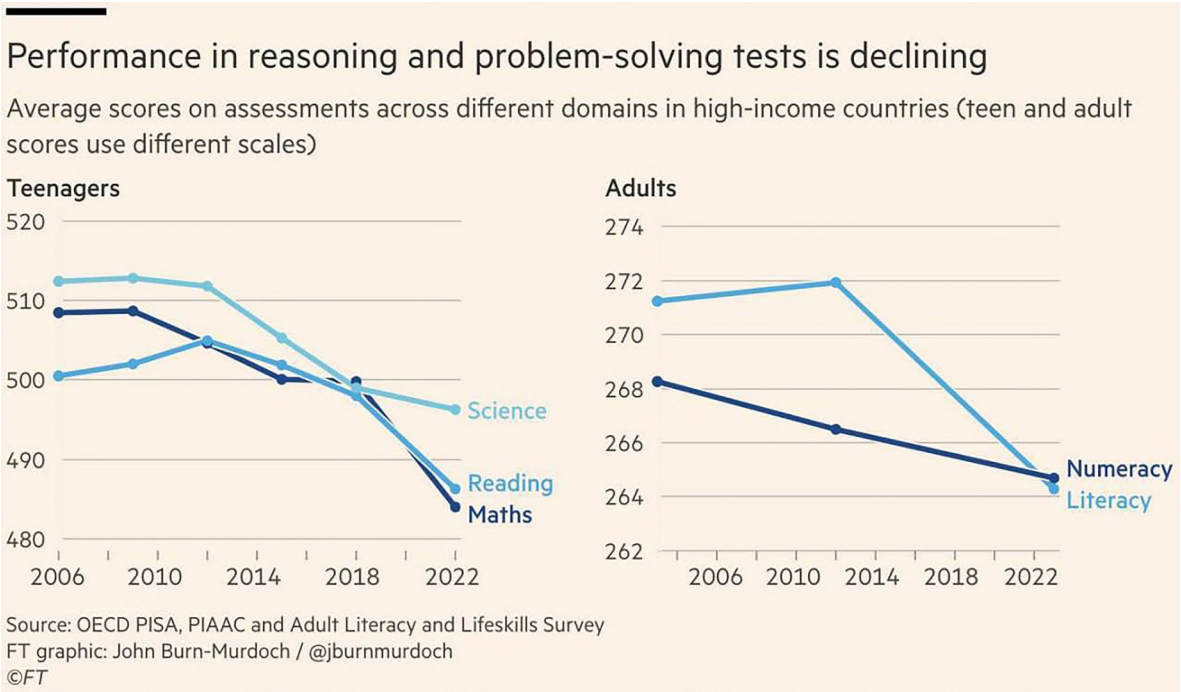


Рисунок 90. Financial Times. Have humans passed peak brain power?
Источник: https://www.ft.com/content/a8016c64-63b7-458b-a371-e0e1c54a13fc.

Тенденции роста нейродегенеративных и нейропсихических заболеваний явно коррелируют с тенденцией роста пластика в окружающей среде.

Самые высокие концентрации НП были обнаружены в тканях головного мозга человека — в 7- 30 раз выше, чем концентрации в печени или почках, а образцы мозговой ткани людей, у которых была диагностирована деменция, показали ещё большее присутствие МНЧ — до 10 раз больше, — чем мозговая ткань людей без деменции[241] (рис. 91).

Преобладающими частицами в мозге оказались крошечные осколки или хлопья полиэтилена — одного из самых популярных пластиков, используемых в упаковке.

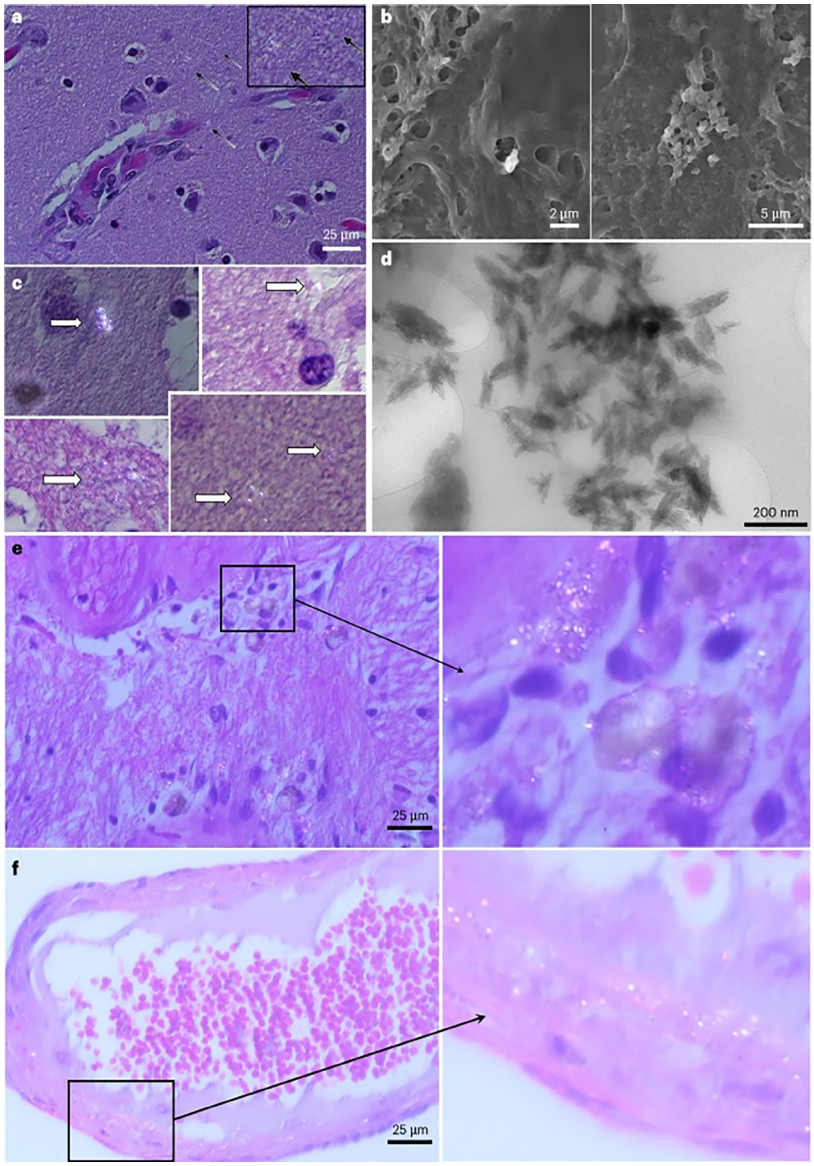


Рисунок 91. Микроскопия с поляризационной волной (a , чёрные стрелки указывают на тугоплавкие включения; вставка представляет собой цифровое увеличение для ясности) и СЭМ (b , поля зрения имеют ширину 15,4 и 20,1 мкм) использовались для сканирования срезов мозга из образцов умерших людей. c , Крупные (> 1 мкм) включения не наблюдались; выделены дополнительные примеры поляризационной волны (белые стрелки указывают на субмикронные тугоплавкие включения). Ограничения разрешения этих технологий привели к использованию ТЭМ для исследования экстрактов из гранул, используемых для Py-GC/MS. d , Пример изображения ТЭМ разрешил бесчисленные твёрдые частицы в виде осколков или хлопьев после дисперсии, с размерами в основном <200 нм в длину и <40 нм в ширину. e , f , Микроскопия с поляризационной волной выявляет значительно большее количество рефрактерных включений в случаях деменции, особенно в областях с сопутствующим накоплением иммунных клеток (e) и вдоль стенок сосудов (f). Все изображения были получены у небольшой подгруппы участников (n = 10 для нормального мозга; n = 3 для случаев деменции) для предоставления визуальных доказательств в поддержку аналитической химии.

Источник: 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

[241] 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

Новые данные подтверждают, что с 2016 по 2024 год, то есть за 8 лет, содержание пластика в мозге увеличилось на 50 %[241].

> *«У здоровых людей в возрасте от 45 до 50 лет мы обнаружили в среднем 4 900 микрограммов пластиковых частиц на грамм мозговой ткани. Целая пластиковая ложка. Примерно столько микропластика находится в нашем мозге. Это означает, что наш мозг сегодня на 99,5 % состоит из мозга, а остальное — из пластика»,* — рассказал ведущий исследователь Мэтью Кэмпен из Университета Нью-Мексико[242].

Учитывая прогрессию содержания пластиковых частиц в атмосфере, воде и еде, можно с уверенностью сказать, что количество нанопластика в нашем организме будет только расти. Если эта тенденция продолжится, то через 4 года уровень пластика в мозге увеличится еще на 50 %.

МНП попадает в мозг через кровь, преодолевая гематоэнцефалический барьер (ГЭБ), и через вдох по обонятельным нервам (рис. 92).

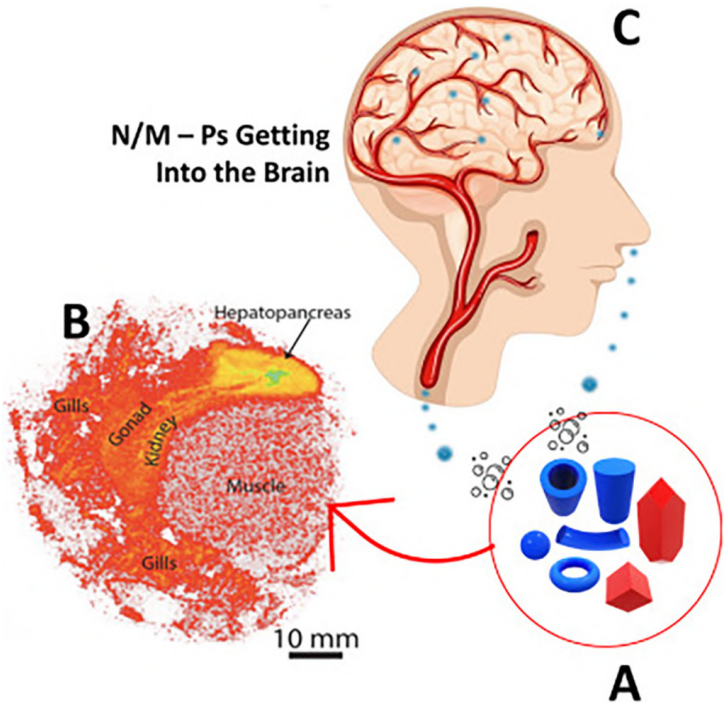


Рисунок 92. Попадание N/MP в органы: N/M – P как часть человеческого цикла, поглощаемая человеческим телом и далее органами. Со временем N/M-P распределяются в различных органах тела (B, Разрешение на авторские права от ACS, 2014) и попадают в мозг через ГЭБ и носовой путь, интегрируясь с системами ЦНС , включая нейроны. Некоторые части этого рисунка взяты из открытых источников, таких как Freepik и Pixaby.

Источник: 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

[241]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
[242]VRT NWS. Brain contains “full plastic spoonful” of microplastics. (2025) https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2025/02/04/microplastics-in-de-hersenen (Дата доступа 01.05.2025).

Гематоэнцефалический барьер представляет собой специализированную физиологическую систему, регулирующую перенос веществ из кровотока в центральную нервную систему (рис. 93). Он избирательно пропускает питательные вещества и кислород, блокируя проникновение токсинов и патогенов (рис. 94). Этот механизм обеспечивает критическую защиту головного мозга, поддерживая гомеостаз нейронной среды.

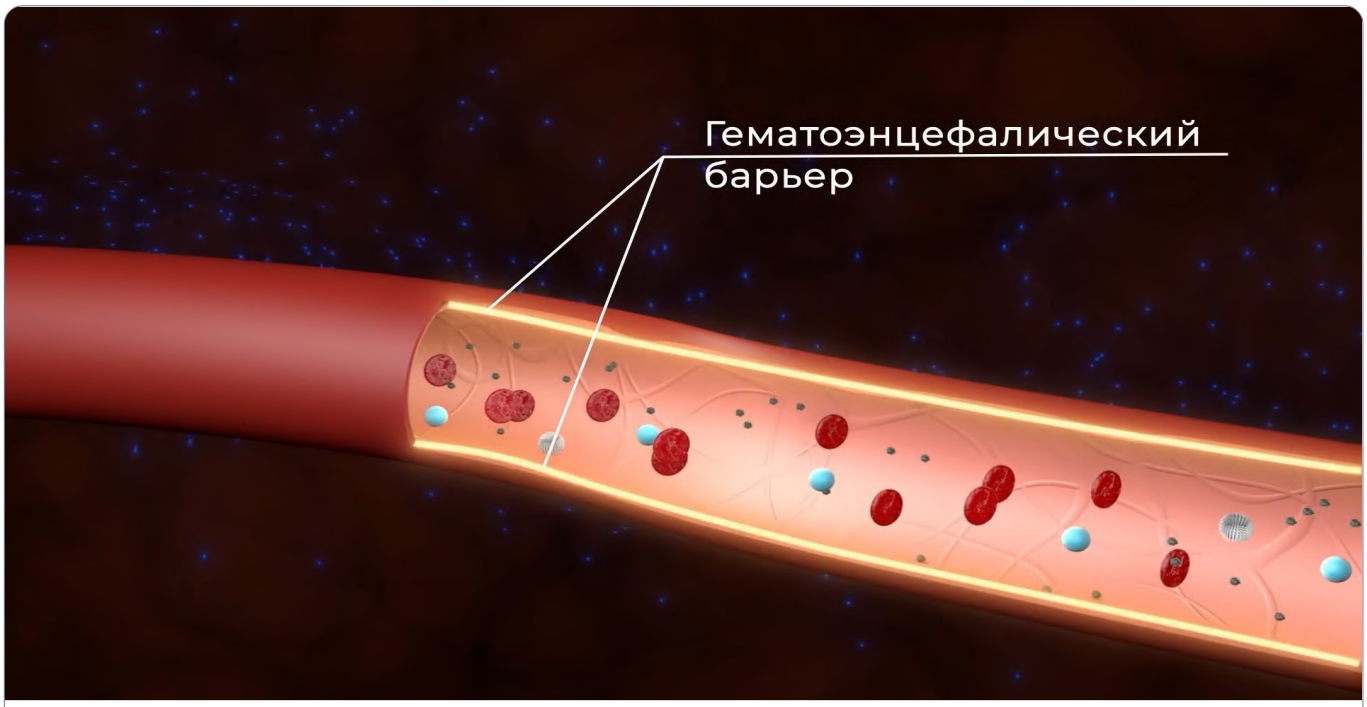


Рисунок 93. Схематическое изображение кровеносного сосуда головного мозга

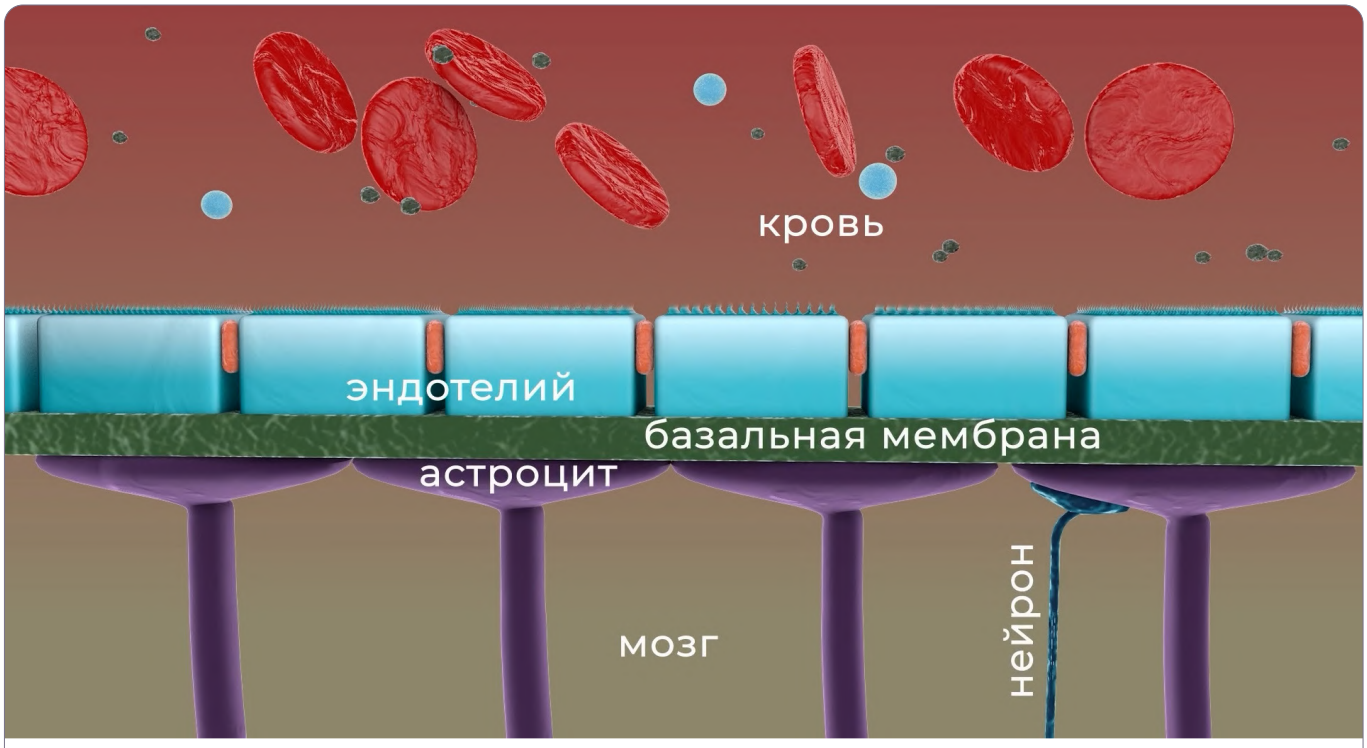


Рисунок 94. Схематическое изображение гематоэнцефалического барьер

Наночастицы пластика, благодаря своим субмикронным размерам и физико-химическим свойствам, проникают в мозг всего через 2 часа после попадания в организм[243].

При вдохе наночастицы пластика через обонятельные нервы попадают прямо в область мозга, отвечающую за восприятие запахов[244] (рис. 95). В результате, они проходят более короткий и прямой путь к мозгу, чем к другим органам.

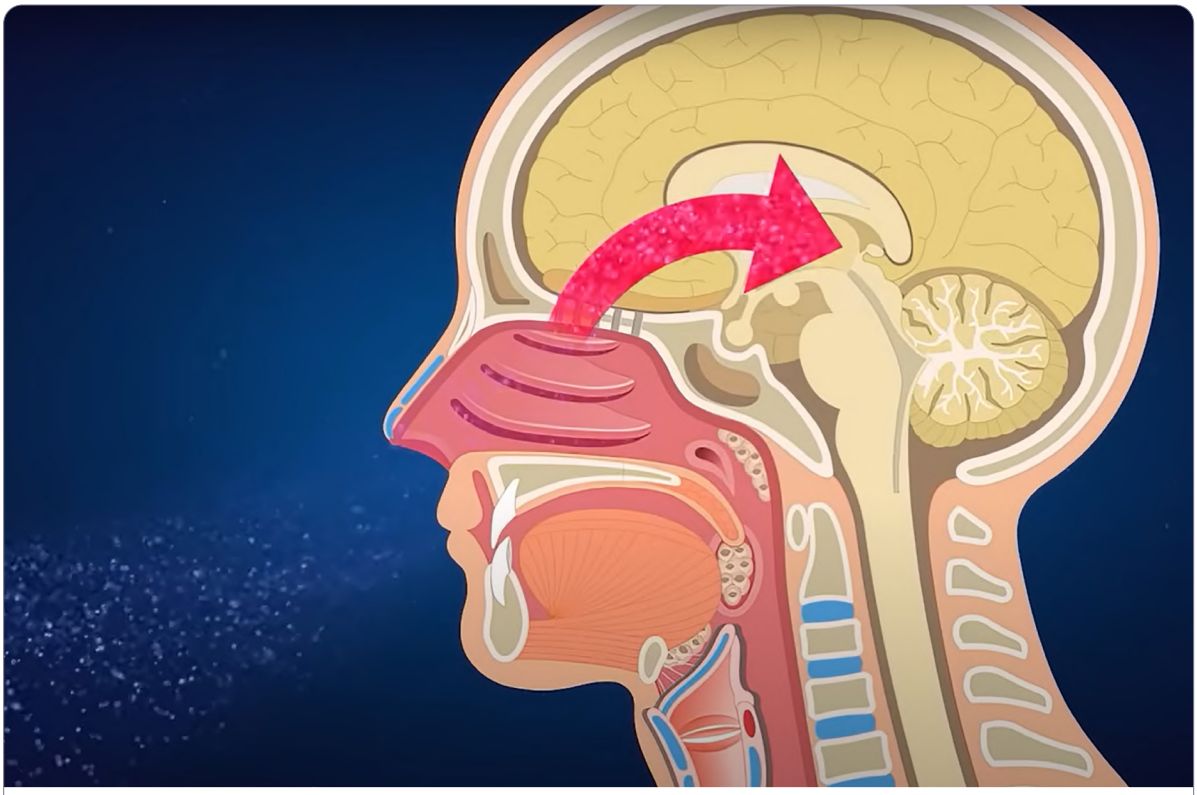


Рисунок 95. Проникновение НП через обонятельные нервы в мозг

Проникнув в мозг, нанопластик нарушает работу клеток мозга — нейронов. Выявлено что, поверхность наночастиц и их электрический заряд могут существенно влиять на взаимодействие с нейронами и передачу нервных импульсов.

Электростатический заряд нанопластика позволяет беспрепятственно нарушать работу каждой клетки организма человека, проникая в нее, вызывая окислительный стресс и хроническое воспаление, нарушая работу митохондрий, вплоть до их полного разрушения и гибели самой клетки.

Исследование[245] показало, что отрицательно заряженные наночастицы способны вызывать деполяризацию мембраны нейронов, что приводит к изменению их электрической активности.

[243]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
[244]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
[245]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

В результате эксперимента было выявлено, что отрицательно заряженные частицы нанопластика избирательно связывались с нейронами, активно участвующими в передаче нервного импульса. Они прилипали к телам нейронов, дендритам и синаптическим щелям, тогда как глиальные клетки, не обладающие электрической активностью, не вступали с ними во взаимодействие.

Т.е. электрическая активность нейронов является основным пусковым механизмом для связывания отрицательно заряженного нанопластика с клеточной мембраной.

Согласно исследованиям, микро- и нанопластик склонен накапливаться в миелиновой оболочке мозга, богатой липидами, которая окружает нейроны и обеспечивает проведение нервных сигналов[246]. Нанопластик провоцирует разрушение миелиновой оболочки аксонов[247, 248], что нарушает передачу нервных импульсов между нейронами.

Воздействие нанопластика на нейроны

Воздействие нанопластика на нейроны может осуществляться через следующие точки приложения:

1. Влияние на мембранный потенциал нейронов

Нейроны функционируют благодаря разности потенциалов на мембране (около -70 мВ в покое), создаваемой за счёт ионных градиентов (Na^+, K^+, Cl^- и др.) и активности ионных каналов. Если рядом с мембраной нейрона оказывается частица нанопластика с электрическим зарядом, она может изменить электрическое поле и дестабилизировать мембранный потенциал. Это может привести к деполяризации или гиперполяризации, а в худшем случае — к спонтанной активации нейрона или блокировке сигнала.

2. Электростатическое взаимодействие с ионными каналами

Ионные каналы в мембране нейрона содержат заряженные аминокислоты, особенно в «воротах» канала. Частица с сильным отрицательным или положительным зарядом может электростатически взаимодействовать с этими участками, что изменяет конфигурацию канала. Это может вызвать его блокировку или неправильную активацию, нарушая нормальную работу нейрона.

3. Нарушение работы синапсов

Синапсы зависят от точной работы ионов Ca^{2+}, Na^+ и нейромедиаторов[249]. Электростатически заряженные частицы нанопластика могут нарушить высвобождение нейромедиаторов или создать ложный сигнал, что может привести к сбоям в передаче нервных импульсов.

---

[246]Peking University Center for Environmental Science and Engineering. Prof. Yi Huang's team made new progress in atmospheric microplastic distribution and its human health risk. CESE. (2022) https://cese.pku.edu.cn/kycg/156506.htm (Дата доступа 01.05.2025).
[247]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
[248]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
[249]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. Окислительный стресс и воспаление

Заряженные нанопластики способны вызывать повышение уровня активных форм кислорода, что приводит к окислительному стрессу. Окислительный стресс в нейронах возникает, когда уровень активных форм кислорода превышает способность клетки их нейтрализовать. Это приводит к повреждению ДНК, клеточных структур, таких как мембраны, белки и митохондрии, что нарушает нормальное функционирование нейронов. В результате клетка теряет способность эффективно передавать нервные импульсы, что вызывает её деградацию и, в конечном итоге, гибель. Поскольку нейроны имеют ограниченную способность к восстановлению, повреждения, вызванные окислительным стрессом, часто становятся необратимыми и могут приводить к прогрессирующему ухудшению памяти, внимания и других когнитивных функций.

5. Влияние на митохондриальную функцию

Нанопластики, имеющие электростатический положительный заряд, проникая внутрь клетки, могут накапливаться в митохондриях, нарушая их мембранный потенциал. В результате нарушается работа дыхательной цепи, происходят утечки электронов, которые взаимодействуют с кислородом и образуют активные формы кислорода, в частности супероксид-анионы. Их избыточное накопление усиливает окислительный стресс и может привести к повреждению клеточных структур.

6. Митохондриальные мутации

Наночастицы пластика способны вызывать повреждение митохондриальной ДНК, что нарушает нормальную работу митохондрий. Это влияет на ключевые клеточные процессы — производство энергии, контроль окислительного стресса, программируемую клеточную смерть и метаболизм. Нарушения в этих системах могут создать условия, способствующие развитию заболеваний.

7. Реактивные свойства поверхности нанопластиков

Высокая удельная поверхность нанопластика — один из главных факторов, определяющих его высокую химическую активность и способность вызывать образование активных форм кислорода. По сравнению с микропластиком, наночастицы имеют в десятки и даже сотни раз большую поверхность на единицу массы, что значительно усиливает их взаимодействие с биомолекулами и окружающей средой.

Электростатический заряд на частицах пластика может нарушать работу нейронов, блокируя или искажая передачу нервных импульсов. Это приводит к сбоям в работе нервной системы и может вызывать широкий спектр патологических состояний в организме. Это проявляется в различных неврологических, вегетативных, когнитивных и психических расстройствах (Таблица 2).

Воздействие нанопластика на нервные клетки приводит к широкому спектру заболеваний: рассеянный и боковой амиотрофический склероз, болезнь Альцгеймера и Паркинсона, аутоиммунные заболевания, эпилепсия, ишемический и геморрагический инсульт, депрессия, тревожные и когнитивные расстройства, шизофрения, биполярное расстройство, аутизм и пр.

Категория	Проявление	Причина / Механизм
Двигательные нарушения	Паралич	Нарушение передачи двигательных импульсов от ЦНС к мышцам
	Судорожные состояния	Дисбаланс между возбуждающими и тормозными нейросигналами
	Потеря чувствительности	Сбой в функционировании сенсорных нейронных цепей, передающих информацию от рецепторов к мозгу
	Нарушение координации движений	Повреждение проводящих путей мозжечка или спинного мозга
Сенсорные нарушения	Расстройства речи, зрения и слуха	Поражение нервных путей, связанных с сенсорными и моторными центрами головного мозга
Вегетативные нарушения	Дисфункции дыхания, сердцебиения и пищеварения	Нарушение работы автономной (вегетативной) нервной системы
	Сбои в терморегуляции и нарушение работы внутренних органов	Дисфункция вегетативных регуляторных центров
Когнитивные расстройства	Нарушения памяти и внимания	Структурные или функциональные изменения в коре головного мозга
	Нарушения сознания, кома	Повреждение ретикулярной формации мозга, играющей ключевую роль в регуляции бодрствования и уровня сознания
Психоэмоциональные расстройства	Тревожность, депрессия, нарушения настроения	Дисбаланс нейромедиаторов, поражение эмоциональных центров мозга

Таблица 2. Спектр патологических состояний, вызванных воздействием нанопластика на нейроны

Микро- и нанопластик как фактор риска расстройств аутистического спектра.

Наряду с ростом загрязнения окружающей среды пластиком, наблюдается рост распространенности расстройств аутистического спектра (РАС) (рис. 96, 97).

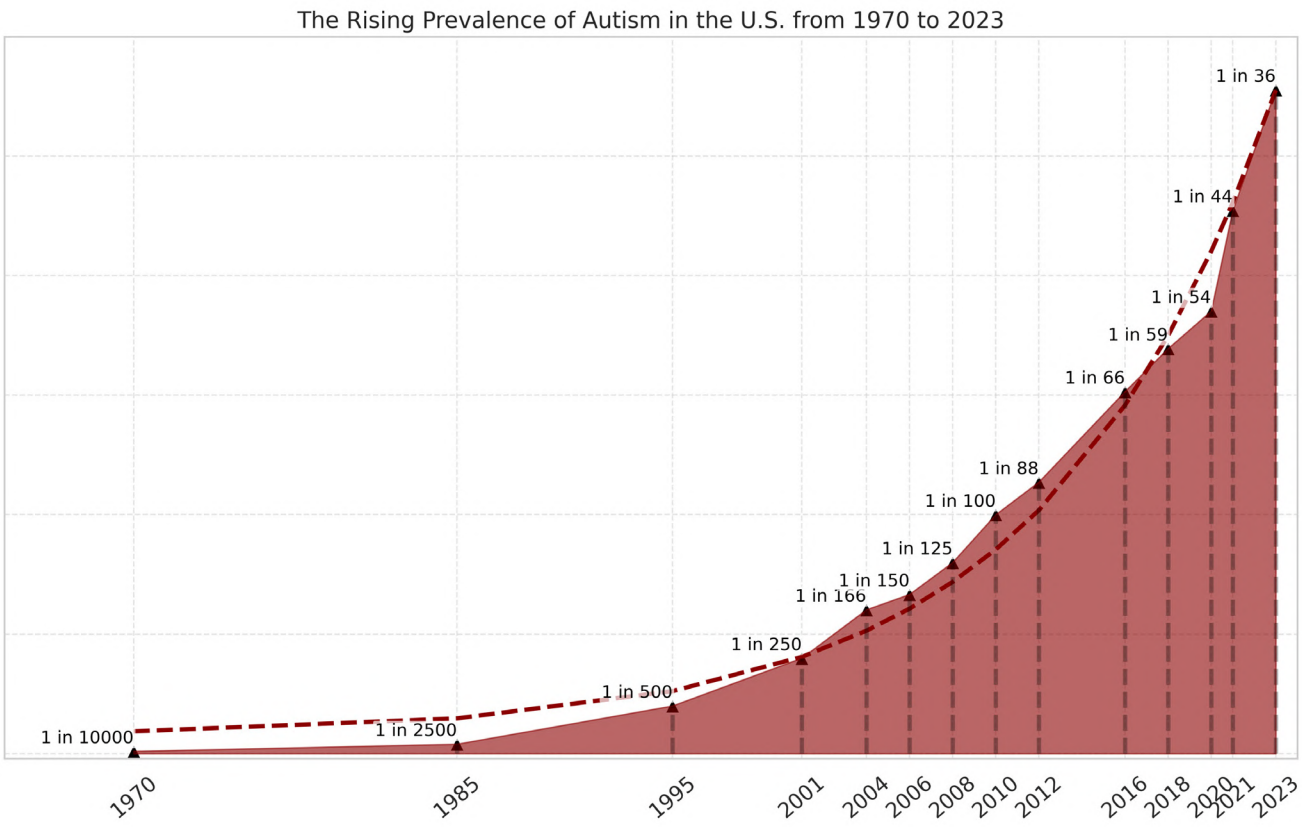


Рисунок 96. Рост распространенности аутизма в США с 1970 по 2023 гг.

Источник: Rogers, T. The political economy of autism. Substack. https://tobyrogers.substack.com/p/the-political-economy-of-autism (Дата доступа: 01.05.2025).

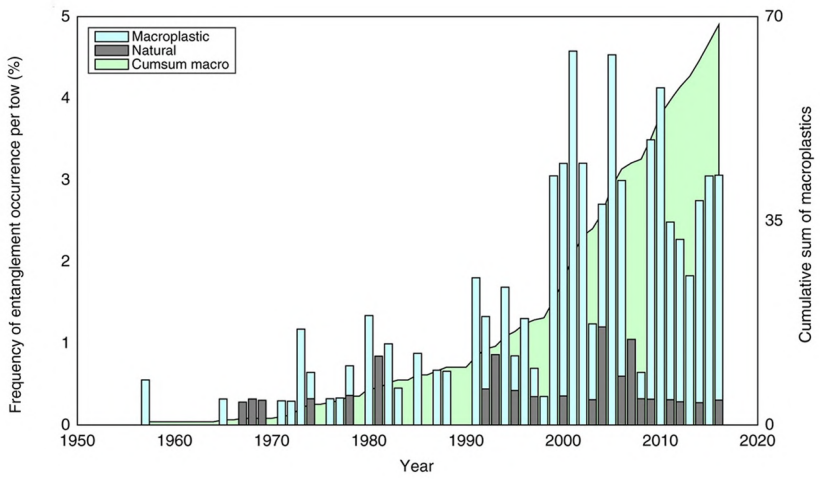


Рисунок 97. Рост количества пластика в океане с 1957 по 2020 гг.

Источник: 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

У 1 из 36 детей в США было выявлено РАС (по оценкам Сети мониторинга аутизма и нарушений развития (ADDM) CDC. По данным 2020 года количество случаев аутизма выросло на 317 % по сравнению с 2000 годом[250, 251].

Начиная с эмбрионального периода и в первые годы жизни формируется нервная система человека. Исследования указывают на потенциальную связь между воздействием микро- и нанопластика и развитием РАС. Экспериментальные данные, полученные корейскими учёными, демонстрируют, что пренатальное и постнатальное воздействие МНП может способствовать возникновению нарушений нейроразвития[252].

Исследование молекулярных эффектов полистирольных нанопластиков на нервные стволовые клетки человека продемонстрировало, что воздействие нанопластика может привести к повреждению тканей и заболеваниям, связанным с неврологическим развитием[253].

Исследования на грызунах[254] показали, что воздействие микро- и нанопластика на мать во время беременности и лактации может нарушать нейрогенез в гиппокампе потомства, а также приводить к уменьшению объема структур мозга, включая моторную кору, гиппокамп, гипоталамус, продолговатый мозг и обонятельную луковицу.

Известно, что изменение структуры и функционирования белков нервных тканей имеют особое значение в развитии множества заболеваний, в том числе аутизма[255].

Недавние исследования показали, что нанопластики взаимодействуют с белками в основном благодаря слабым связям, таким как гидрофобные взаимодействия, водородные связи, силы Ван-дер-Ваальса и электростатические силы[256]. Это приводит к структурным деформациям белковых молекул, нарушая их функциональность. Учитывая роль белков в формировании нейронных сетей и синаптической передачи, такие изменения могут влиять на развитие РАС.

---

[250]Autism Parenting Magazine. Autism Statistics You Need To Know in 2024. (2025) https://www.autismparentingmagazine.com/autism-statistics (Дата доступа 01.05.2025).
[251]Centers for Disease Control and Prevention. Autism Prevalence Higher, According to Data from 11 ADDM Communities. https://www.cdc.gov/media/releases/2023/p0323-autism.html (Дата доступа 01.05.2025).
[252]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
[253]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
[254]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
[255]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
[256]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

Участие МНП в патогенезе сердечно-сосудистых заболеваний

Частицы пластика способны не только циркулировать в кровотоке, но и оседать на сосудистых стенках, запуская каскад патологических изменений. Особенно тревожным является обнаружение микропластика в атеросклеротических бляшках[257]. Недавнее исследование показало, что у пациентов с микропластиком в сонных артериях риск инфаркта миокарда, инсульта и смерти был в 4,5 раза выше. Это свидетельствует об активном участии пластиковых фрагментов в формировании и дестабилизации атеросклеротических бляшек, провоцируя их разрыв и тромбообразование[258]. МНП также нарушают целостность эндотелия, ключевого слоя клеток, выстилающего внутреннюю поверхность сосудов и отвечающего за регуляцию сосудистого тонуса, предотвращение тромбообразования и воспалительных реакций. Повреждение эндотелия под воздействием частиц пластика приводит к хроническому воспалению и повышению риска тромбообразования, что особенно опасно в артериях, питающих сердце и мозг[259]. Микропластик взаимодействует с форменными элементами крови, такими как тромбоциты и эритроциты. Он способствует агрегации тромбоцитов, запуская процесс образования тромбов. Кроме того, поверхность микропластика может вызывать механическое повреждение клеток и активировать каскады свертывания крови, что в долгосрочной перспективе может привести к хронической гиперкоагуляции и микрососудистым нарушениям.

Иммунные клетки способны поглощать микрочастицы пластика, однако они не обладают механизмами для их полного расщепления. Это приводит к деформации клеток и увеличению их размера. Скопление таких изменённых клеток в мелких сосудах головного мозга способствует формированию микротромбов, что нарушает кровоснабжение мозга и увеличивает риск инсульта, включая случаи в молодом возрасте[260]. Хроническое снижение снабжения мозга кислородом (гипоксия) приводит к гибели нейронов и развитию нейродегенеративных изменений, включая атрофию мозговой ткани[261]. При длительном воздействии данные процессы могут вызывать уменьшение объёма отдельных структур мозга.

Благодаря электростатическому заряду МНП активно взаимодействуют с клеточными мембранами, нарушая их электрический потенциал. Это, в свою очередь, влияет на сократимость сосудов, передачу сигналов в миоцитах и сердечный ритм. Смертность от сердечно-сосудистых заболеваний во всем неуклонно растет (рис. 98). Особое внимание следует уделить синдрому внезапной сердечной смерти среди молодых людей 25–44 лет[262] (рис. 99). В США он признан основной причиной смерти. За последние два десятилетия число случаев резко возросло. Учитывая повсеместное распространение МНП, нельзя исключать их потенциальную роль в этих трагических событиях.

---

[257]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

[258]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

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

[260]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

[261]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

[262]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

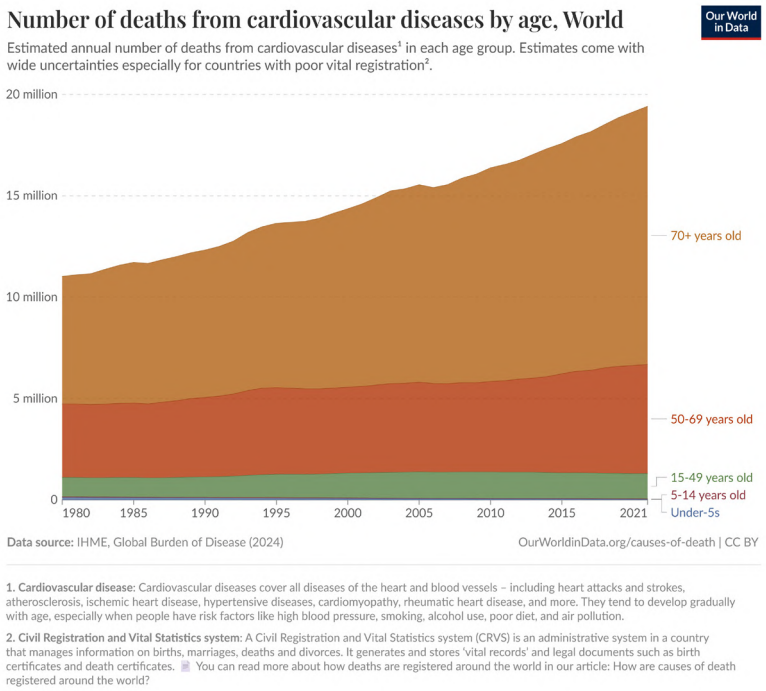


Рисунок 98. Число смертей от сердечно-сосудистых заболеваний по возрасту. Мир.

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

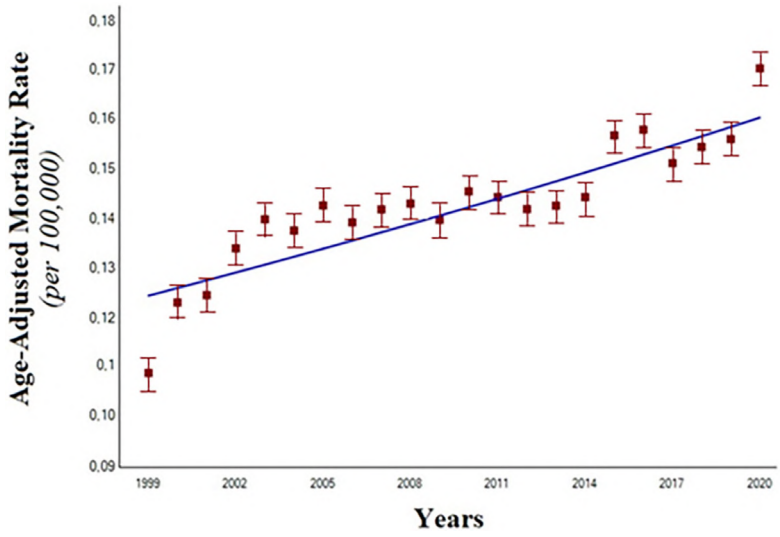


Рисунок 99. Тенденции в скорректированных по возрасту показателях смертности вследствие внезапной сердечной смерти с соответствующими 95 % среди молодых взрослых в США в возрасте от 25 до 44 лет, с 1999 по 2020 год.

Еще одной серьезной проблемой является рост внезапной детской смертности (СВДС). Только в США показатель этого синдрома вырос на 15 % с 2019 по 2020 год, переместившись с четвертого на третье место среди причин детской смертности[263]. Несмотря на то, что причины СВДС до конца не установлены, многие ученые предполагают, что ключевую роль могут играть факторы, нарушающие регуляцию сердечного ритма и сосудистого тонуса у младенцев. Нанопластик, способный проникать через плаценту и накапливаться в тканях развивающегося организма, является одним из вероятных факторов риска. Всё больше учёных сходятся во мнении, что нанопластик — один из ключевых кандидатов на роль «невидимого убийцы».

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

Сердце, будучи одним из наиболее энергозатратных органов, критически зависит от эффективной работы митохондрий, обеспечивающих его энергией. Воздействие микропластиковых частиц нарушает митохондриальные процессы, что может приводить к энергетическому дефициту в миокарде и, как следствие, к нарушению сердечной функции.

Нарушение функций желудочно-кишечного тракта под действием МНП

Кишечник — крупнейший иммунный орган человека. В нём сосредоточено около 70 % всех иммунных клеток, примерно 500 миллионов нейронов и более 100 триллионов микроорганизмов[264]. Кишечная микробиота играет ключевую роль в поддержании иммунной системы. Дисбаланс микробиоты может ослабить иммунитет и способствовать возникновению различных заболеваний. Кишечник часто называют «вторым мозгом» из-за плотной сети нейронов и его способности взаимодействовать с центральной нервной системой[265]. Обмен сложными биохимическими сигналами между мозгом и кишечником получил название «ось мозг–кишечник» и играет важную роль в регуляции как физического, так и психоэмоционального состояния (рис. 100).

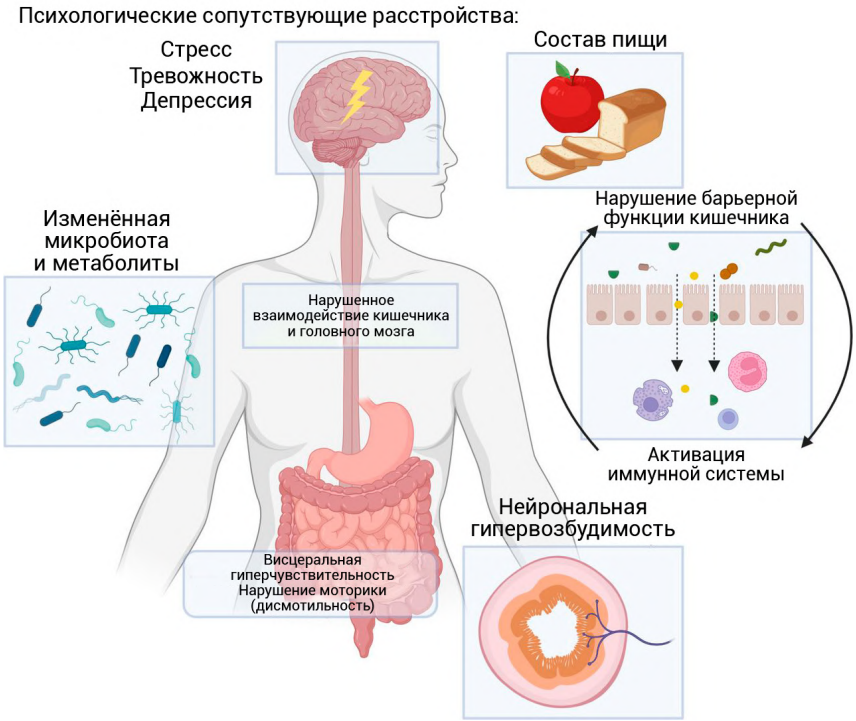


Рисунок 100. Патофизиологические механизмы при нарушениях взаимодействия кишечника и мозга. Источник: Vanuytsel, T., Bercik, P. & Boeckxstaens, G. Understanding neuroimmune interactions in disorders of gut–brain interaction: from functional to immune-mediated disorders. Gut 72, 787–798 (2023). https://doi.org/10.1136/gutjnl-2020-320633

[264] 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

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

Здоровый кишечный барьер предотвращает проникновение микробов и чужеродных частиц из просвета кишечника в кровоток[264]. Микро- и нанопластик нарушает эту защиту, повышая проницаемость стенки кишечника. В результате развивается воспаление как в кишечнике, так и в других органах, что способствует ослаблению иммунитета[266]. Одновременно МНП влияет на состав кишечной микробиоты, вызывая дисбаланс между полезными и патогенными микроорганизмами. Это нарушает процессы пищеварения, снижает способность организма расщеплять пищевые аллергены и повышает риск развития пищевой аллергии[267].

Таким образом, возникает порочный круг: пластик нарушает микробиоту, усиливает воспаление и проницаемость кишечника, а затем, преодолев гематоэнцефалический барьер, провоцирует воспалительные реакции в головном мозге. Нарушение взаимодействия между кишечным микробиомом и центральной нервной системой напрямую связано с неврологическими расстройствами. Так, у 82 % детей с расстройствами аутистического спектра выявлен выраженный дисбаланс микробиоты, что подтверждается как микробиологическим анализом, так и оценкой функций пищеварительной системы[268].

Исследования пациентов с воспалительным заболеванием кишечника показывают положительную корреляцию между тяжестью заболевания и концентрацией микропластика в фекалиях . У пациентов с воспалительными заболеваниями кишечника она выше (41,8 шт./г) по сравнению со здоровыми людьми (28,0 шт./г). Также у таких пациентов выявили значительное накопление микропластика в язвенных поражениях слизистой оболочки прямой кишки[269].

Кроме того, микропластик, остающийся в кишечнике, продолжает оказывать вредное воздействие даже спустя длительное время после первичного попадания в организм.

Воздействие МНП на иммунную систему

МНП нарушает иммунный ответ в организме, создавая условия для размножения патогенов. Совокупное воздействие МНП на микробиом, патогены и иммунную систему формирует комплексные риски для здоровья.

Иммунные клетки, контактирующие с микропластиком, погибают примерно в три раза быстрее, чем те, которые с ним не сталкиваются[270].

---

[264]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

[266]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

[267]ScienceDirect. Food allergy. ScienceDirect Topics. https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/food-allergy (Дата доступа 01.05.2025).

[268]The Guardian. Autism could be diagnosed with stool sample, scientists say. https://www.theguardian.com/science/article/2024/jul/08/autism-could-be-diagnosed-with-stool-sample-microbes-research (Дата доступа 01.05.2025).

[269]ScienceDirect. Inflammatory bowel disease. ScienceDirect Topics. https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/inflammatory-bowel-disease (Дата доступа 01.05.2025).

[270]Plastics News. Study highlights health hazards of microplastics. (2019) https://www.plasticsnews.com/news/study-highlights-health-hazards-microplastics (Дата доступа 01.05.2025).

Заряженные частицы МНП легче притягивают к себе другие молекулы — например, токсины, соли тяжёлых металлов, бактерии и вирусы (рис. 101). Это делает их своего рода “транспортной платформой” для токсических соединений, усиливая биологическую активность и токсичность последних. Электростатический заряд нанопластика является своего рода подпиткой или “подзарядкой” благодаря которой бактерии и вирусы дольше сохраняют свою жизнеспособность.

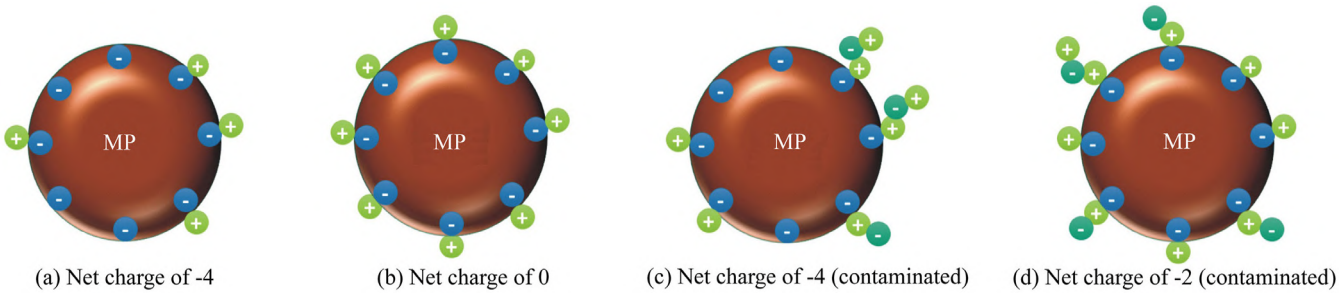


Рисунок 101. Иллюстрация эффекта поверхностных зарядов микропластика, вызванных загрязняющими веществами воды.

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

И наконец, заряженные частицы микро и нано пластика, могут дольше сохраняться в воде и воздухе, легче подниматься в аэрозоли и попадать в дыхательные пути, что повышает риск их проникновения в организм человека.

Частицы микропластика способны адсорбировать на своей поверхности вирусы за счёт электростатических и гидрофобных взаимодействий, таким образом продлевая их жизнеспособность[271].

Вирусы на поверхности микропластика остаются активными до трёх дней — этого достаточно, чтобы преодолеть путь, например, от очистных сооружений до пляжей[272].

Микропластик облегчает распространение патогенов и может способствовать их генетической рекомбинации. Исследование показало, что частицы пластика не только ухудшают действие лекарств, но и могут способствовать развитию бактерий, устойчивых к антибиотикам[273].

[271]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).
[272]University of Stirling. Hitch-hiking viruses can survive on microplastics in freshwater, new study finds. (2022) https://www.stir.ac.uk/news/2022/june-2022-news/hitch-hiking-viruses-can-survive-on-microplastics-in-freshwater-new-study-finds (Дата доступа 01.05.2025).
[273]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

Заряженные частицы МНП служат платформой для колонизации микроорганизмов[274]. Бактерии и грибы, используя электростатические поля нанопластика, демонстрируют ускоренный рост. Исследования на дафниях (*Daphnia*) выявили, что воздействие нанопластика вызывает окислительный стресс и повышает уровень грибковых инфекций в 11 раз (вид *Metschnikowia*)[275]. Это согласуется с глобальным расширением ареала и устойчивости грибковых заболеваний, что отмечено ВОЗ как растущая угроза общественному здоровью.

> ***«Выйдя из тени пандемии устойчивости бактерий к противомикробным препаратам, грибковые инфекции распространяются и становятся всё более устойчивыми к лечению, превращаясь в проблему общественного здравоохранения во всём мире»,*** — сказал доктор Ханан Балхи, помощник Генерального директора ВОЗ по устойчивости к противомикробным препаратам[276].

Грибковые метаболиты, выделяемые в присутствии МНП, ассоциированы с ростом опухолей[277] и хроническим воспалением. ДНК грибов обнаружена в отдельных типах рака, что указывает на потенциальную роль МНП в онкогенезе[278].

---

[274]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

[275]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

[276]World Health Organization. WHO releases first-ever list of health-threatening fungi. (2022) https://www.who.int/news/item/25-10-2022-who-releases-first-ever-list-of-health-threatening-fungi (Дата доступа 01.05.2025).

[277]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

[278]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

Онкогенное действие МНП. Механизмы мутаций и развития метастазов

Согласно информации, изложенной выше микро и нанопластик является значимым фактором в развитии злокачественных образований, учитывая его негативное влияние на клеточном и системном уровне.

Исследования показывают, что микропластик и нанопластик могут играть роль скрытых катализаторов развития рака, усиливая миграцию клеток и способствуя метастазированию[279]. Также выявлено, что частицы МНП могут сохраняться внутри клеток в течение длительного времени и передаваться дочерним клеткам во время деления.

В настоящее время смертность от онкологических заболеваний в мире продолжает расти (рис. 102).

Прогнозируется, что к 2050 году количество новых случаев рака возрастет на 77 %[280].

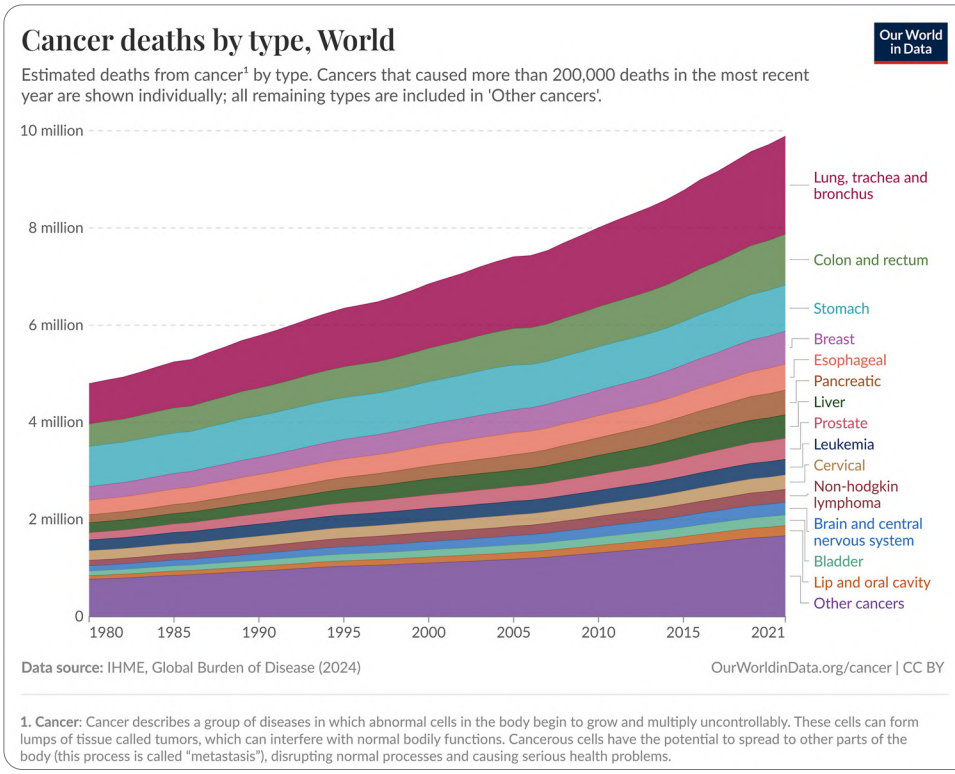


Рисунок 102. Смертность от рака по типу. Мир

Источник: Our World in Data – https://ourworldindata.org/grapher/cancer-deaths-by-type-grouped

[279]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

[280]World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024) https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services (Дата доступа 01.05.2025).

Влияние МНП на обмен кальция и структуру костей

Частицы пластика способны проникать даже в опорно-двигательный аппарат — основу физического функционирования человека (рис. 103). Там, где царит точный баланс между разрушением и строительством, где кости ежедневно обновляются, суставы гасят трение, а мышцы поддерживают движение и тепло, микропластик — в том числе благодаря своему электростатическому заряду — способен подменять собой строительные молекулы и запускать медленные, разрушительные процессы.

Исследования показывают, что микропластик способен проникать в костную ткань, где его молекулярная структура позволяет ему имитировать кальций и другие минералы, необходимые для костного метаболизма. В результате пластик может ошибочно восприниматься организмом как строительный материал для костей. Организм в буквальном смысле начинает «строить» кости из пластика.

Это нарушение молекулярного распознавания связано с рядом негативных последствий: микропластик способен нарушать функции остеобластов и остеокластов, нарушать обмен кальция и фосфора, тем самым способствуя развитию остеопороза. Запускаются воспалительные каскады, экспрессия генов нарушается, а костная ткань теряет плотность и прочность. Кроме того, присутствие нанопластика может вызывать хроническое воспаление, повреждающее суставной хрящ и костную ткань, что связано с повышенным риском остеоартрита, болевого синдрома и скованности движений[281, 282].

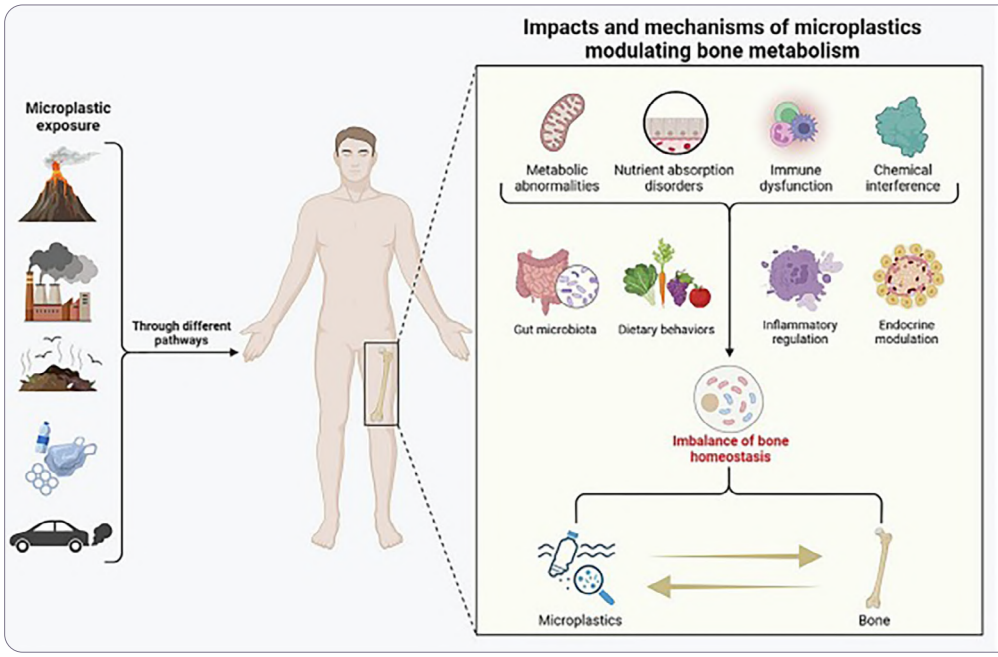


Рисунок 103. Воздействия и механизмы модуляции микропластика на метаболизм костей. Источник: Zhang, Y.-W. et al. Bridging relevance between microplastics, human health and bone metabolism: Emerging threats and research directions. Environmental Chemistry and Ecotoxicology 6, 422–435 (2024). https://doi.org/10.1016/j.enceco.2024.08.006

[281]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
[282]China Environment News. Microplastics "secretly attack" the human body, how much damage can they cause? (2025) https://cenews.com.cn/news.html?aid=1205048 (Дата доступа 01.05.2025).

Исследование на грызунах доказало, что количество остеобластов значительно уменьшилось у мышей, получавших полистирольный микропластик[280].

Не меньшую угрозу пластик представляет и для скелетной мускулатуры. Исследования показывают, что нанопластики способны проникать в мышечные клетки, нарушая работу митохондрий. Возникает дефицит энергии, активируются агрессивные формы активного кислорода, что ускоряет старение клеток, нарушает восстановление мышц после нагрузок и способствует их атрофии. Особенно уязвимыми оказываются пожилые люди и пациенты с хроническими заболеваниями.

Микро и нанопластик накапливается в костном мозге[283], нарушая образование стволовых клеток (гемопоэтических и мезенхимальных)[284], из которых формируются эритроциты, лейкоциты, тромбоциты, остеоциты, хондроциты и адипоциты. Их дисфункция вызывает системные повреждения организма.

Репродуктивные расстройства, ассоциированные с воздействием МНП. Бесплодие и эректильная дисфункция

Снижение фертильности.

По прогнозам, к 2045 году мир станет полностью бесплодным[285].

Ещё в 2018 году группа ведущих врачей и ученых на **XIII Международном симпозиуме по сперматологии**, в Стокгольме призвала правительства признать снижение мужской фертильности как серьезную проблему общественного здравоохранения и признать важность мужского репродуктивного здоровья для выживания человеческого вида[286].

Репродуктивное здоровье, вопреки распространенному мнению, определяется не только гормональным балансом, наследственностью и образом жизни. Все больше научных исследований указывают на критическую роль митохондрий в процессах зачатия и развития эмбриона. Эти мельчайшие органеллы, ответственные за выработку энергии, необходимой для всех жизненных процессов, играют решающую роль в фертильности как у мужчин, так и у женщин, а их значение для репродуктивной функции человека оказывается гораздо глубже.

Нарушения в работе митохондрий могут быть причиной бесплодия как у женщин, так и у мужчин. У мужчин митохондрии, находящиеся в хвостовой части сперматозоида, отвечают за подвижность, необходимую для оплодотворения. Сбои в их работе снижают подвижность сперматозоидов и могут вызывать аномалии.

---

[280]World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024) https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services (Дата доступа 01.05.2025).

[283]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

[284]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

[285]The Guardian. Shanna Swan: 'Most couples may have to use assisted reproduction by 2045'. (2021) https://www.theguardian.com/society/2021/mar/28/shanna-swan-fertility-reproduction-count-down (Дата доступа 01.05.2025).

[286]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

В исследованиях, проведённых китайскими учёными, микропластик был обнаружен во всех образцах спермы — в среднем по две частицы размером до 7 мкм, чаще всего полистирол[287]. Его присутствие связано с морфологическими нарушениями сперматозоидов и укорочением теломер.

Благодаря микроскопическим размерам и заряду нанопластик способен преодолевать гематотестикулярный барьер и проникать в половые органы, нарушая их функции.

Особую тревогу вызывает наблюдаемая тенденция снижения общего количества сперматозоидов у мужчин на 62,3 % с 1973 по 2018 год[288] (рис. 104).

Количество сперматозоидов во всём мире снижается ускоренными темпами

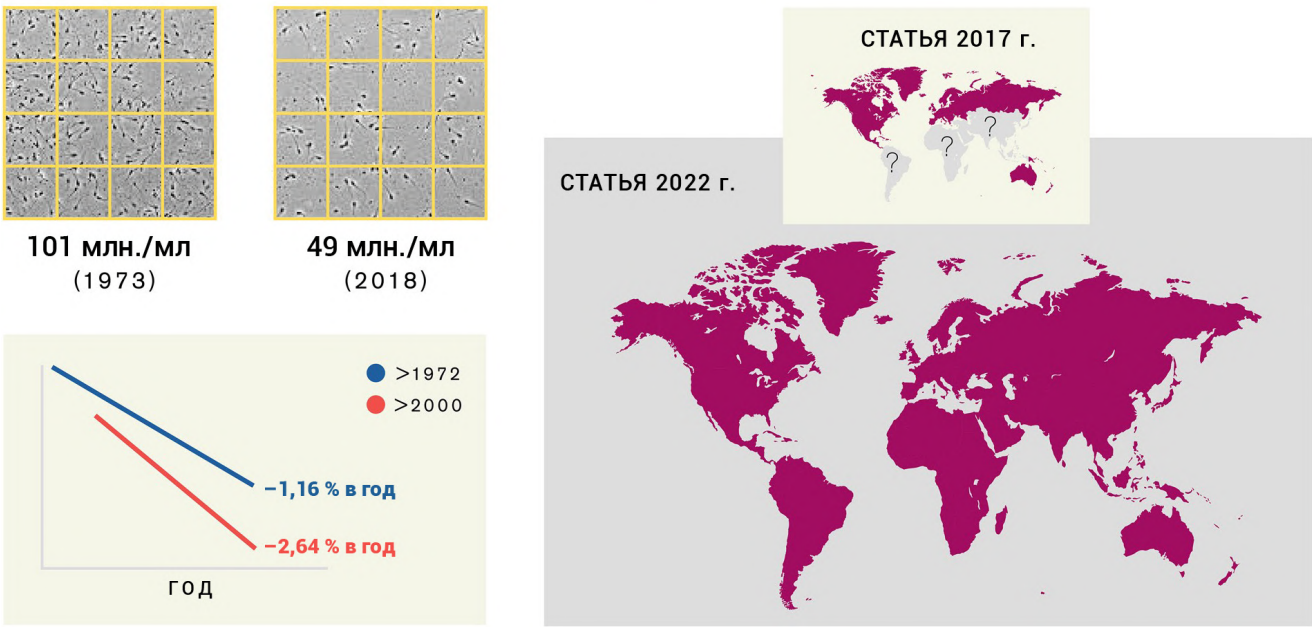


Рисунок 104. Графическая абстракция: количество сперматозоидов снижается ускоренными темпами во всём мире.
Источник: Levine, H. et al. Temporal trends in sperm count: a systematic review and meta-regression analysis of samples collected globally in the 20th and 21st centuries. Human Reproduction Update 29, 157–176 (2023). https://doi.org/10.1093/humupd/dmac035

Хотя на фертильность влияет множество факторов, всё больше учёных склоняются к мнению, что химические соединения, содержащиеся в пластике, играют в этом процессе одну из ключевых ролей. Фталаты, используемые для придания пластику гибкости, нарушают гормональный фон, снижают либидо и могут способствовать преждевременному половому созреванию и нарушению функции яичек.

[287] 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
[288] 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

Не менее тревожная ситуация складывается и с женской фертильностью. Исследование 2025 года выявило наличие частиц микропластика в фолликулярной жидкости яичников у 14 из 18 женщин, в среднем более 2 000 частиц на миллилитр, большинство из которых имели диаметр менее 5 мкм[289] (рис. 105).

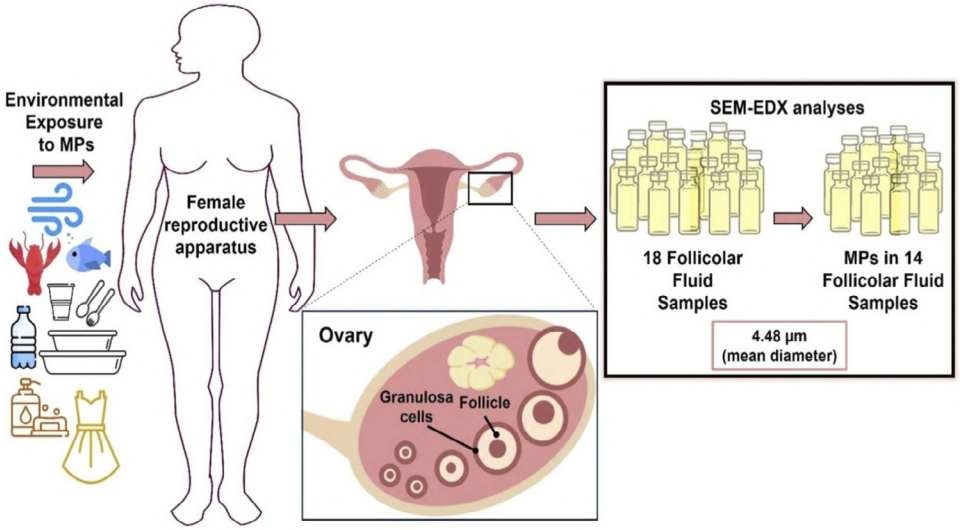


Рисунок 105. Схема механизма попадания МП в фолликулярную жидкость яичников: через воздействие окружающей среды (вдыхание, проглатывание и контакт с кожей) они попадают в организм человека, достигая женского репродуктивного аппарата, в частности, преодолевая гематофолликулярный барьер.

Источник: 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

Эти данные свидетельствуют о способности пластиковых частиц преодолевать гематофолликулярный барьер в яичниках. На клеточном уровне микро- и нанопластик могут повреждать ДНК, нарушать деление клеток и вызывать воспаление. Показано их вмешательство в гормональную регуляцию, нарушение функций плаценты, влияние на ангиогенез и связь с развитием миомы матки.

Эректильная дисфункция

Результаты национального исследования в Японии показали, что эректильная функция и сексуальная активность снижаются у молодого поколения[290]. Оценка на основе EHS выявила распространённость ЭД в 30,9 %, которая затронула приблизительно 14 миллионов мужчин, и что сексуальное желание, жёсткость эрекции, оргазмы и удовлетворение были ниже ожидаемых у молодых японских мужчин, особенно в возрасте от 20 до 24 лет, хотя эти факторы имели тенденцию ухудшаться с возрастом. Фактически, уровень распространённости в возрастной группе 20–24 года составил 26,6 %, почти равный показателю среди возрастной группы 50–54 года (27,8 %) (рис. 106, 107).

[289]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
[290]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

Кроме того, в другом исследовании, проведённом во всём мире, сообщается, что у трёх четвертей мужчин наблюдаются симптомы ЭД, что свидетельствует о том, что ЭД не является редкостью и может затронуть любого мужчину. Первое официальное национальное исследование сексуальной функции в Японии, проведённое в 1998 году, подсчитало, что там насчитывается около 11,3 миллионов пациентов с умеренной или полной ЭД. Кроме того, национальные исследования мужского бесплодия в Японии, проведённые в 1996 и 2015 годах, выявили поразительные данные. В исследовании 2015 года 13,5 % мужчин столкнулись с мужским бесплодием из-за ЭД как основной причины, что почти в четыре раза больше, чем в 1996 году.Совокупность современных научных данных указывает на то, что микро- и нанопластик в организме — одна из скрытых, но значимых причин ухудшения репродуктивного здоровья. Эти частицы проникают в половые органы, нарушают функции митохондрий, вызывают воспаления, гормональные сбои и повреждения ДНК, снижают подвижность и морфологическое качество сперматозоидов. Они обнаруживаются в сперме и фолликулярной жидкости, что свидетельствует о преодолении биологических барьеров и глубоком системном воздействии. Всё это ставит под угрозу не только индивидуальное здоровье, но и будущее репродуктивной способности человечества в целом.

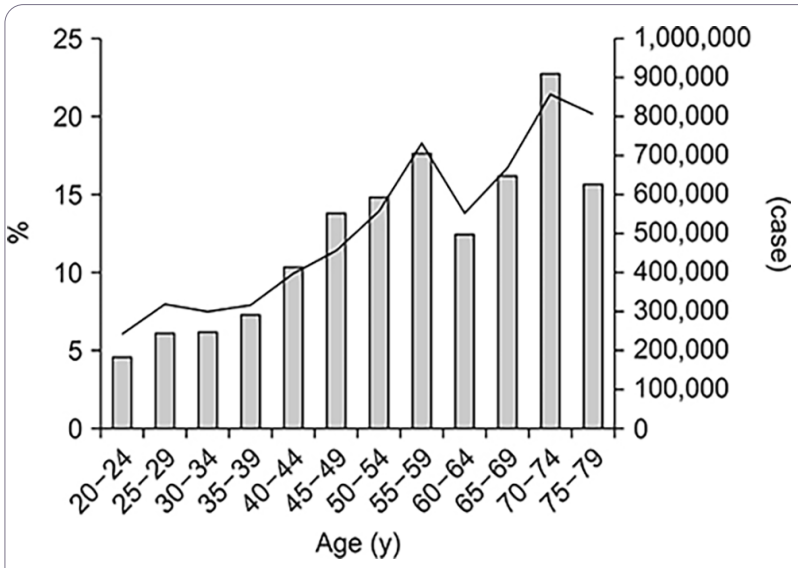


Рисунок 106. Распространённость и количество пациентов с эректильной дисфункцией, оцененные по распространенности эректильной дисфункции (ЭД), рассчитанной по вопросу «Беспокоит ли Вас ЭД».

Источник: 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

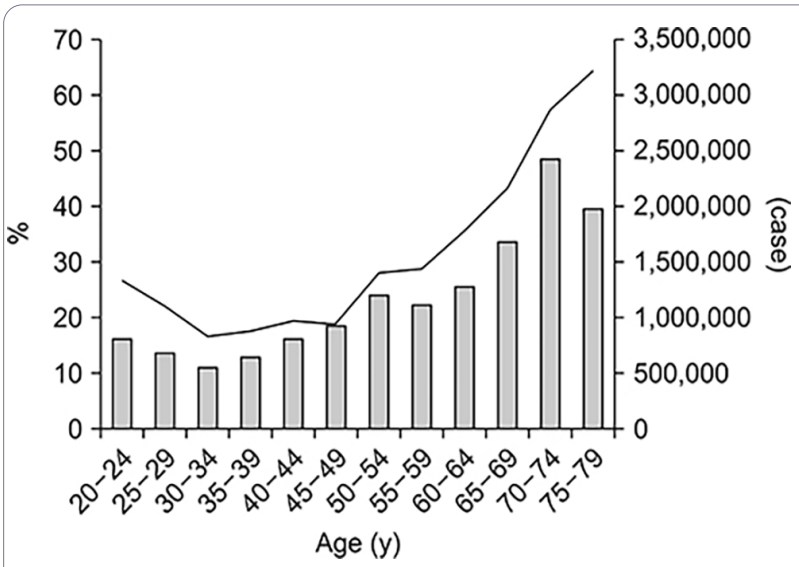


Рисунок 107. График, показывающий распространенность и количество пациентов с эректильной дисфункцией по оценке по шкале твёрдости эрекции.

Источник: 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

Проникновение МНП через плацентарный барьер и его влияние на развивающийся организм

Пренатальное воздействие микро- и нанопластика на плод.

Беременные женщины демонстрируют особую уязвимость к воздействию микропластика[291]. Проникая в организм матери, пластиковые частицы способны достигать плода через плаценту, вмешиваться в секрецию гормонов, регулирующих беременность, и повышать риск преждевременных родов, выкидышей и нарушений развития плода (рис. 108). По оценкам, в 2020 году 13,4 млн детей (1 из 10) родились преждевременно (<37 недель), что остаётся ведущей причиной детской смертности. Выжившие дети имеют повышенный риск серьёзных заболеваний и хронических состояний[292].

Развивающаяся эндокринная система детей также крайне чувствительна к химическим веществам, содержащимся в пластике, которые могут имитировать или блокировать гормоны[293] (рис. 109). Воздействие на младенцев может происходить даже через грудное молоко. Кроме того, нанопластик может оказывать отложенное влияние, нарушая процессы формирования половых клеток в детском и подростковом возрасте и снижая фертильность во взрослом состоянии.

Гематоплацентарный барьер (ГПБ) играет ключевую роль в регуляции обмена веществ между матерью и плодом, защищая его от вредных веществ. Однако исследования показывают, что микро- и нанопластик может проникать через ГПБ.

В 2020 году исследование под руководством Антонио Рагуза с использованием рамановской микроспектроскопии (метода, основанного на анализе рассеяния света для определения химического состава материалов) выявило присутствие микропластика в плацентах четырёх из шести обследованных женщин с нормальным течением беременности. В образцах обнаружено по 12 частиц размером 5–10 мкм, включая полипропилен и пигменты, применяемые в косметике, красках, клеях и средствах гигиены[294].

[291]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/advs.202401060
[292]World Health Organization. 1 in 10 babies worldwide are born early, with major impacts on health and survival. (2023) https://www.who.int/news/item/06-10-2023-1-in-10-babies-worldwide-are-born-early--with-major-impacts-on-health-and-survival (Дата доступа 01.05.2025).
[293]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
[294]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

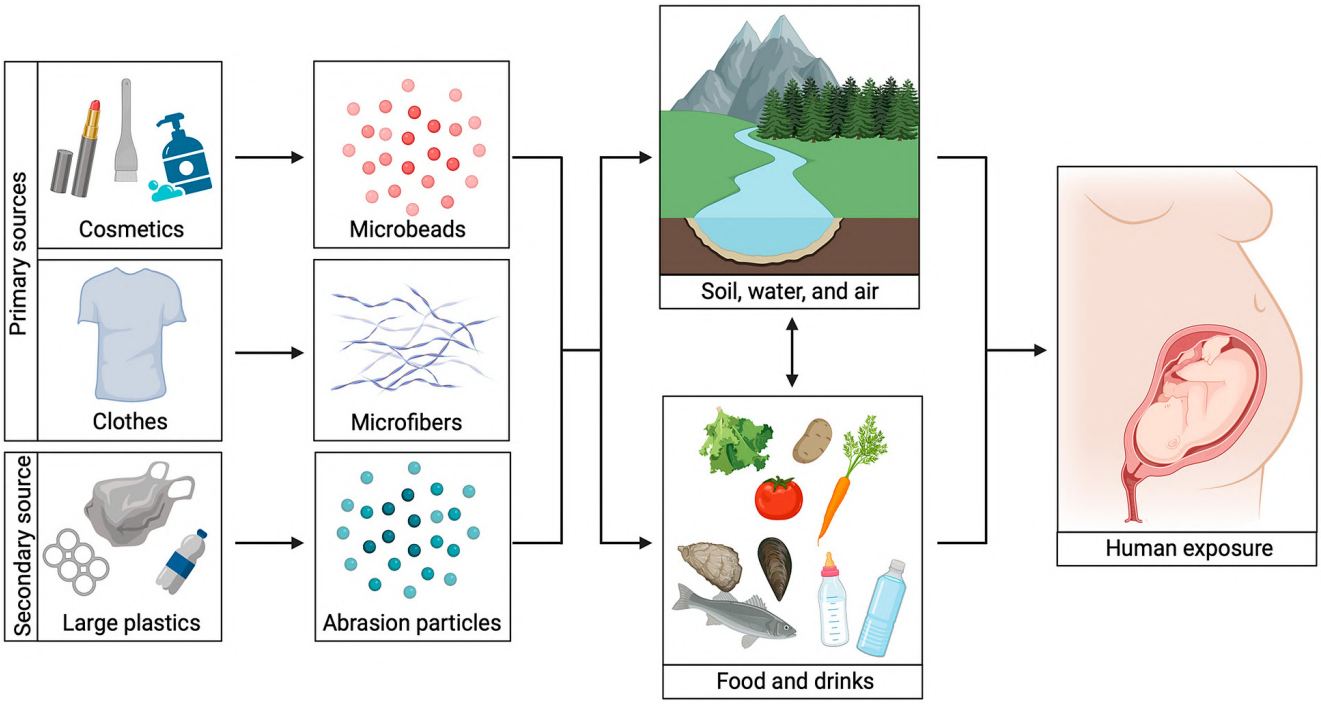


Рисунок 108. Попадание МП в организм матери.

Источник: Hofstede, L. T., Vasse, G. F. & Melgert, B. N. Microplastics: A threat for developing and repairing organs? Cambridge Prisms: Plastics 1, e19 (2023). https://doi.org/10.1017/plc.2023.19

Рисунок 109. Влияние МП на различные органы и ткани развивающегося плода.

Источник: 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

Исследование, проведённое Университетом Нью-Мексико, показало, что концентрация микропластика и нанопластика в плацентах недоношенных детей выше, чем у доношенных. Анализ 175 плацент с применением масс-спектрометрии выявил, что у женщин, родивших раньше срока, накопление пластиковых частиц происходило в большем объёме[295].

> *«Наночастицы, по-видимому, оказывают косвенное воздействие на ребёнка в утробе матери, подавляя образование кровеносных сосудов через вещества-посредники»*, — говорит биолог Тина Бюрки[296].

Наноразмерные частицы полистирола могут вызывать нарушения развития мозга у плода, особенно когнитивные дефициты[297].

Согласно исследованиям, воздействие МП во время беременности и в первые месяцы жизни может привести к необратимым изменениям репродуктивной и центральной нервной системы у потомства разных видов[298].

Постнатальное воздействие микро- и нанопластика на младенцев

Новорождённые сталкиваются с непрерывным поступлением МНП из внешней среды.

Согласно исследованию 2020 года[299], младенцы могут проглатывать до 4,5 миллионов пластиковых частиц в день, только лишь во время кормления из полипропиленовых бутылочек. А это большая часть всех детских бутылочек, используемых в мире.

Младенцы также могут проглатывать микропластик с молоком матери. В 2022 году анализ грудного молока 34 здоровых женщин выявил микропластик в 76 % образцов[300] (рис. 110). Дополнительные данные показывают, что уровень МНП в кале младенцев в 14 раз превышает аналогичные показатели у взрослых[301].

---

[295]Jochum, M. et al. Elevated Micro- and Nanoplastics Detected in Preterm Human Placentae. Preprint (2025). https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5903715/v1
[296]Federal Office of Public Health. Impact of pollution on embryonic development - Nanoparticles: Risk for babies in the womb. FOPH. (2024) https://www.bit.admin.ch/en/nsb?id=101285 (Дата доступа 01.05.2025).
[297]Jeong, B. et al. Maternal exposure to polystyrene nanoplastics causes brain abnormalities in progeny. Journal of Hazardous Materials 426, 127815 (2022). https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127815
[298]Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. Cureus 16, e60712 (2024). https://doi.org/10.7759/cureus.60712
[299]Li, D., Shi, Y., Yang, L. et al. Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation. Nat Food 1, 746–754 (2020). https://doi.org/10.1038/s43016-020-00171-y
[300]Ragusa, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. Polymers 14, 2700 (2022). https://doi.org/10.3390/polym14132700
[301]Zhang, J., Wang, L., Trasande, L. & Kannan, K. Occurrence of Polyethylene Terephthalate and Polycarbonate Microplastics in Infant and Adult Feces. Environ. Sci. Technol. Lett. 8, 989–994 (2021). https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00559

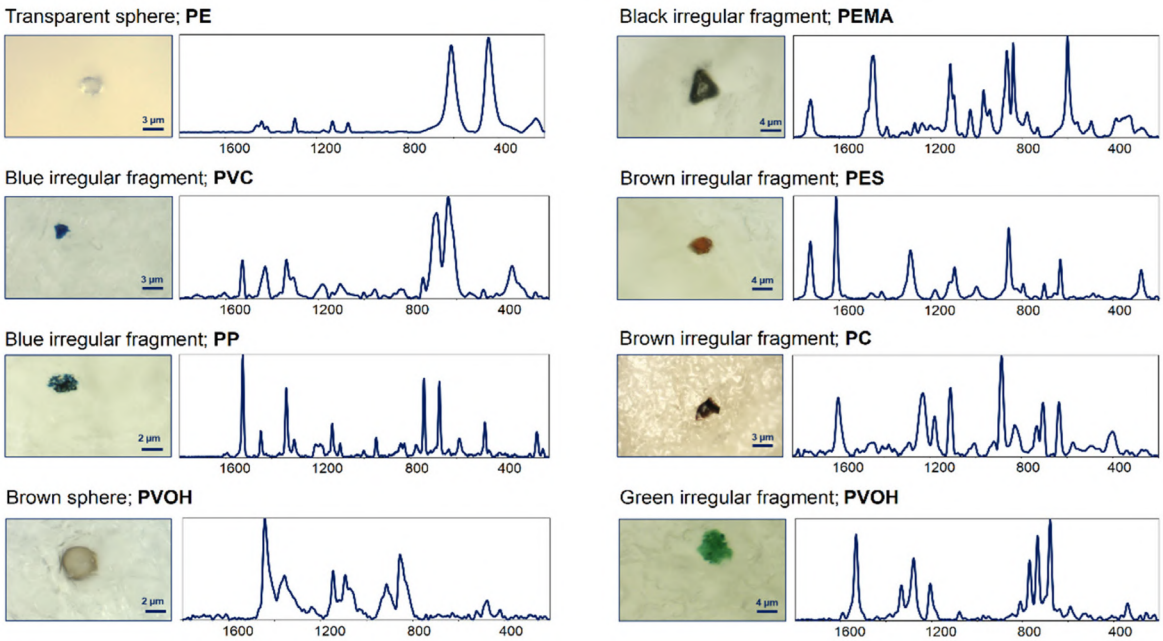


Рисунок 110. Микрофотографии и спектры комбинационного рассеяния (волновые числа, см$^{-1}$) некоторых выбранных МП, обнаруженных в проанализированных образцах грудного молока. ПЭ: полиэтилен; ПВХ: поливинилхлорид; ПП: полипропилен; ПВС: поливиниловый спирт; ПЭВА: поли(этилен-со-винилацетат); ПЭМА: поли(этилметакрилат); ПЭС: полиэстер и ПК: поликарбонат.

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

Нанопластики и химические вещества связанные с ними, нарушают молекулярные структуры и функциональность грудного молока. Эти соединения могут изменять белки, обнаруженные в грудном молоке человека и детских смесях, что может привести к проблемам развития в дальнейшем[302, 303].

Высокие концентрации МНП оказывают кумулятивное токсическое воздействие на развивающийся организм. Нанопластик, проникая в клетки, может вызывать структурные повреждения ДНК и нарушать метаболические процессы. Эти эффекты повышают риски генетических мутаций и долгосрочных патологий, что создаёт угрозу для здоровья будущих поколений.

[302]Yadav, A., Vuković, L. & Narayan, M. An Atomic and Molecular Insight into How PFOA Reduces α-Helicity, Compromises Substrate Binding, and Creates Binding Pockets in a Model Globular Protein. J. Am. Chem. Soc. 146, 12766–12777 (2024). https://doi.org/10.1021/jacs.4c02934
[303]Karim, A. et al. Interfacial Interactions between Nanoplastics and Biological Systems: toward an Atomic and Molecular Understanding of Plastics-Driven Biological Dyshomeostasis. ACS Appl. Mater. Interfaces 16, 25740–25756 (2024). https://doi.org/10.1021/acsami.4c03008

Последствия воздействия МНП и его связь с врождёнными аномалиями

Помимо своего всепроникающего в ткани и клетки свойства, МНП обладает ещё одной достаточно опасной способностью – передаваться «по наследству» будущим поколениям. При делении клетки фрагменты микро- и нанопластика переходят от клетки к клетке. Помимо всего прочего, они, благодаря своим малым размерам и наличию статического заряда электричества, легко преодолевают гемато-плацентарный барьер и проникают в ткани и клетки плода, оказывая своё губительное воздействие на развивающийся организм. И в первую очередь, как уже неоднократно подчёркивалось в докладе, микро- и нанопластики приводят к митохондриальной дисфункции. Недавнее менделевское рандомизированное исследование предоставило убедительные доказательства причинной связи между экспрессией митохондриальных белков и риском врождённых аномалий. В исследовании использовались генетические варианты в качестве инструментальных переменных для минимизации смещений, характерных для наблюдательных данных. Среди 66 признаков митохондриальных белков значимые ассоциации выявлены с пороками сердца, уха, нервной системы, мочеполовой системы и конечностей. Это подтверждает гипотезу о ключевой роли митохондриальной активности в эмбриональном морфогенезе[304]. Мутации митохондриальной ДНК (мтДНК), как наследуемые, так и de novo, вызывают широкий спектр клинических синдромов: MELAS, MERRF, NARP, синдром Лея и др. Они поражают преимущественно органы с высоким энергетическим потреблением — сердце, мозг, мышцы, глаза. Передача происходит исключительно по материнской линии, что обусловлено митохондриальным происхождением ооцита (рис. 111). Такие расстройства часто проявляются уже в раннем возрасте и характеризуются тяжёлыми неврологическими и метаболическими нарушениями.

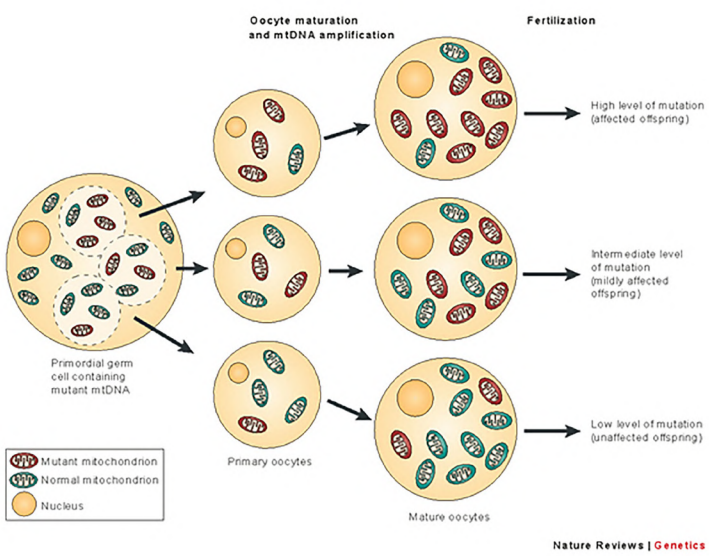


Рисунок 111. Митохондриальное генетическое бутылочное горлышко. Во время производства первичных ооцитов в каждый ооцит переносится определённое количество молекул митохондриальной ДНК (мтДНК). Созревание ооцитов связано с быстрой репликацией этой популяции мтДНК. Это событие рестрикции-амплификации может привести к случайному сдвигу мутационной нагрузки мтДНК между поколениями и отвечает за различные уровни мутировавшей мтДНК, наблюдаемые у поражённого потомства от матерей с патогенными мутациями мтДНК. Митохондрии, содержащие мутировавшую мтДНК, показаны красным цветом, митохондрии с нормальной мтДНК показаны зелёным цветом.
Источник: Taylor, R., Turnbull, D. Mitochondrial DNA mutations in human disease. Nat Rev Genet 6, 389–402 (2005). https://doi.org/10.1038/nrg1606

[304] 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

Дети с митохондриальными расстройствами нередко сталкиваются с задержками развития, мышечной слабостью, когнитивными нарушениями и нарушением координации. Синдром Кернса-Сейра, синдром Барта, болезнь Альперса и другие заболевания могут приводить к тяжёлым последствиям вплоть до инвалидизации или летального исхода.

За последние два десятилетия врачи фиксируют тревожный рост врождённых пороков развития у новорождённых. Только в Китае частота таких дефектов увеличилась почти в три раза — с 99,15 на 10 000 рождений в 2005 году до 290,27 на 10 000 в 2022-м[305] (рис. 112). Аналогичная динамика наблюдается и в других странах. Причины этого всплеска многофакторны, но всё больше научных данных указывают на новую, стремительно нарастающую угрозу — микропластик и особенно нанопластик способные проникать в эмбриональные ткани и вмешиваться в процессы формирования органов и систем.

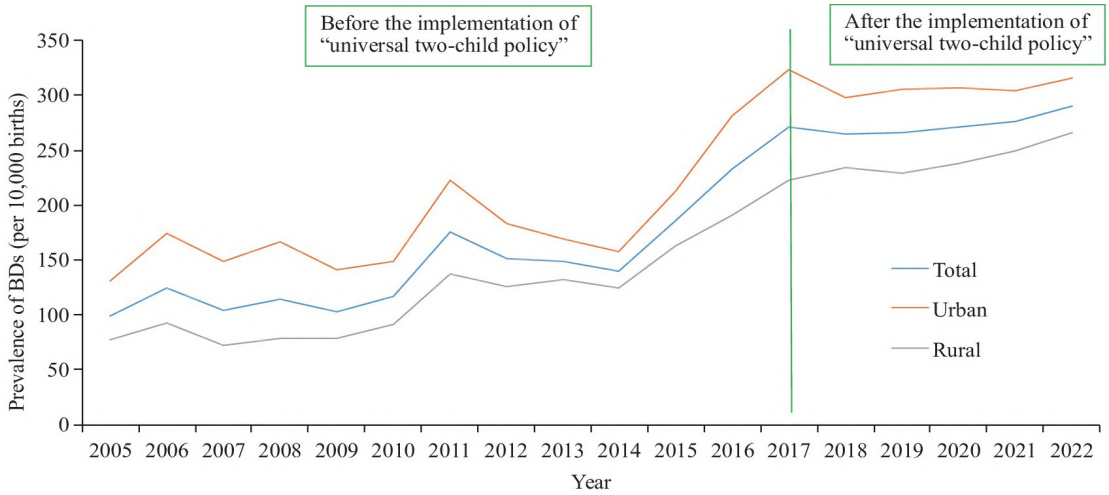


Рисунок 112. Распространённость врождённых дефектов между городскими и сельскими районами с 2005 по 2020 год.
Источник: Wei, W. et al. Analyzing the Trends and Causes of Birth Defects — Jinan City, Shandong Province, China, 2005–2022. CCDCW 5, 978–983 (2023). https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.184

Электростатический заряд, который несёт нанопластик, особенно опасен в эмбриональных тканях, где каждая ошибка — потенциальная аномалия. Такие частицы демонстрируют повышенную адгезию к поверхностям клеток, в том числе к клеткам нервного гребня — критическим участникам формирования сердца, сосудов и черепно-лицевых структур. В эксперименте на куриных эмбрионах нанопластик вызывал тяжёлые пороки, включая дефекты сердца и крупных сосудов. Одной из наиболее быстро распространяющихся аномалий стал гастрошизис — порок развития передней брюшной стенки, при котором органы плода выходят наружу через дефект кожи и мышц (рис. 113, 114, 115). Согласно международным данным, его распространённость выросла на 161 % за последние три десятилетия, а среди матерей младше 20 лет — в несколько раз[306]. Предполагается, что нанопластик вмешивается в развитие брюшной стенки на ранних сроках беременности (4–8 недель), вызывая воспаление и сбой в закрытии передней части тела.

[305]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
[306]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

Рисунки 113-115. Гастрошизис

Другой порок, гипоспадия, — аномалия, при которой мочеиспускательный канал у мальчиков открывается в неправильном месте[307], — также показывает устойчивый рост (рис. 116, 117, 118). К примеру, в США с 1997 по 2024 год количественное увеличение случаев составило около 1,26 на 1 000 живых новорожденных мальчиков (с 6,1 до 7,36 на 1 000), а процентный прирост достиг примерно 20,66 %[308]. Исследования на животных моделях показали, что воздействие фталатов, часто присутствующих в микропластике, нарушает синтез тестостерона у плодов мужского пола.

Рисунки 116-118. Гипоспадия

Эти вещества, закреплённые на заряженной поверхности нанопластика, легко переносятся в кровоток и плаценту, усиливая гормональные сдвиги в критические периоды половой дифференцировки. На этом фоне фиксируется увеличение частоты синдрома Дауна, трисомии, атриовентрикулярных дефектов сердца и других серьёзных нарушений с 12,78 на 10 000 живорождённых в 1999–2001 годах до 15,55 на 10 000 в 2016–2020 годах[308].

Одновременно наблюдается рост психоневрологических проблем у детей, включая тревожные расстройства и когнитивные дефициты. Хотя прямая причинно-следственная связь с микропластиком ещё изучается, известные механизмы — воспаление, эпигенетическая модуляция, митохондриальные дисфункции — дают основания подозревать его как один из факторов[309, 310].

---

[307]Chen, M. J., Karaviti, L. P., Roth, D. R. & Schlomer, B. J. Birth prevalence of hypospadias and hypospadias risk factors in newborn males in the United States from 1997 to 2012. Journal of Pediatric Urology 14, 425.e1-425.e7 (2018). https://doi.org/10.1016/j.jpurol.2018.08.024

[308]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

[309]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

[310]Chen, M. J., Karaviti, L. P., Roth, D. R. & Schlomer, B. J. Birth prevalence of hypospadias and hypospadias risk factors in newborn males in the United States from 1997 to 2012. Journal of Pediatric Urology 14, 425.e1-425.e7 (2018). https://doi.org/10.1016/j.jpurol.2018.08.024

Выводы и перспективы. Возможно ли снизить воздействие МНП на здоровье человека

Анализ совокупных данных демонстрирует, что микро- и нанопластик представляют собой значимый и недооценённый фактор риска для здоровья человека. Современные научные данные убедительно свидетельствуют о том, что микро- и нанопластик представляют собой неотъемлемую часть глобального токсического давления на организм человека. Благодаря способности преодолевать биологические барьеры и накапливаться в различных тканях, включая мозг, сердце, лёгкие и плаценту, МНП оказывает токсическое действие на молекулярном, клеточном и системном уровнях. В совокупности с химическими добавками и адсорбированными загрязнителями окружающей среды пластик становится фактором, способным вызывать хроническое воспаление, окислительный стресс, митохондриальные дисфункции и мутации ДНК — процессы, лежащие в основе широкого спектра заболеваний, включая нейродегенеративные, онкологические, сердечно-сосудистые, эндокринные и аутоиммунные нарушения. Особенно тревожит тот факт, что частицы МНП практически не выводятся из организма, накапливаясь с возрастом и усугубляя кумулятивный эффект их воздействия.

Современные данные подтверждают, что избежать контакта с МНП не представляется возможным: он присутствует в воздухе, воде, пище и даже внутри клеток животных и растений, которые мы потребляем. Таким образом, воздействие частиц пластика становится повсеместным и непрерывным — от внутриутробного развития до поздних этапов жизни. Особенно опасен ингаляционный путь поступления, при котором наночастицы, минуя гематоэнцефалический барьер, проникают непосредственно в ткани головного мозга, делая центральную нервную систему одной из наиболее уязвимых мишеней.

Дополнительный биологический риск обусловлен электростатической активностью частиц МНП, которая усиливает их взаимодействие с биологическими структурами и способствует нарушению гомеостаза. Также отмечается их потенциальная роль в переносе патогенов и антибиотикорезистентных микроорганизмов, что придаёт проблеме загрязнения микро- и нанопластиком междисциплинарный характер, затрагивающий экологию, токсикологию, иммунологию, неврологию и репродуктивную медицину. В этой связи в рамках стратегии противодействия угрозе МНП одним из стратегических направлений, предложенных «АЛЛАТРА», является разработка методов нейтрализации или экранирования электростатического заряда нанопластика. Уменьшение электростатической активности таких частиц может значительно снизить их вредоносность и замедлить накопление в организме. По оценкам авторов доклада, методы экранирования или нейтрализации заряда способны снизить потенциальный риск, связанный с МНП, как минимум на 50 %. Это позволяет выиграть необходимое время для разработки более комплексных стратегий по диагностике, профилактике, выведению МНП из организма. В данном контексте особую значимость приобретают дальнейшие исследования в областях биофизики, нанотехнологий и молекулярной токсикологии.

Несмотря на возрастающее количество научных публикаций по данной теме, влияние МНП на здоровье человека по-прежнему остаётся недостаточно изученным и слабо учтённым при формировании стратегий охраны здоровья и окружающей среды. Учитывая масштабы загрязнения пластиком, биологическую активность частиц и потенциально необратимые последствия их воздействия, данное направление требует приоритетного внимания со стороны научного сообщества и органов здравоохранения, систематизации данных, разработки стандартов оценки рисков, а также расширения межгосударственного и международного научного сотрудничества.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К МИНИМИЗАЦИИ ПЛАСТИКОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Технологии удаления крупного пластика из водных экосистем

Инициативы по смягчению последствий загрязнения океана в основном сосредоточены на удалении видимого крупного мусора с поверхности воды. На сегодняшний день одним из наиболее масштабных проектов, направленных на сбор пластмасс и других видов плавучих отходов, является инициатива The Ocean Cleanup. Их плавающие системы улавливают поверхностный мусор (рис. 119), который затем сортируется и упаковывается для дальнейшей переработки или утилизации.

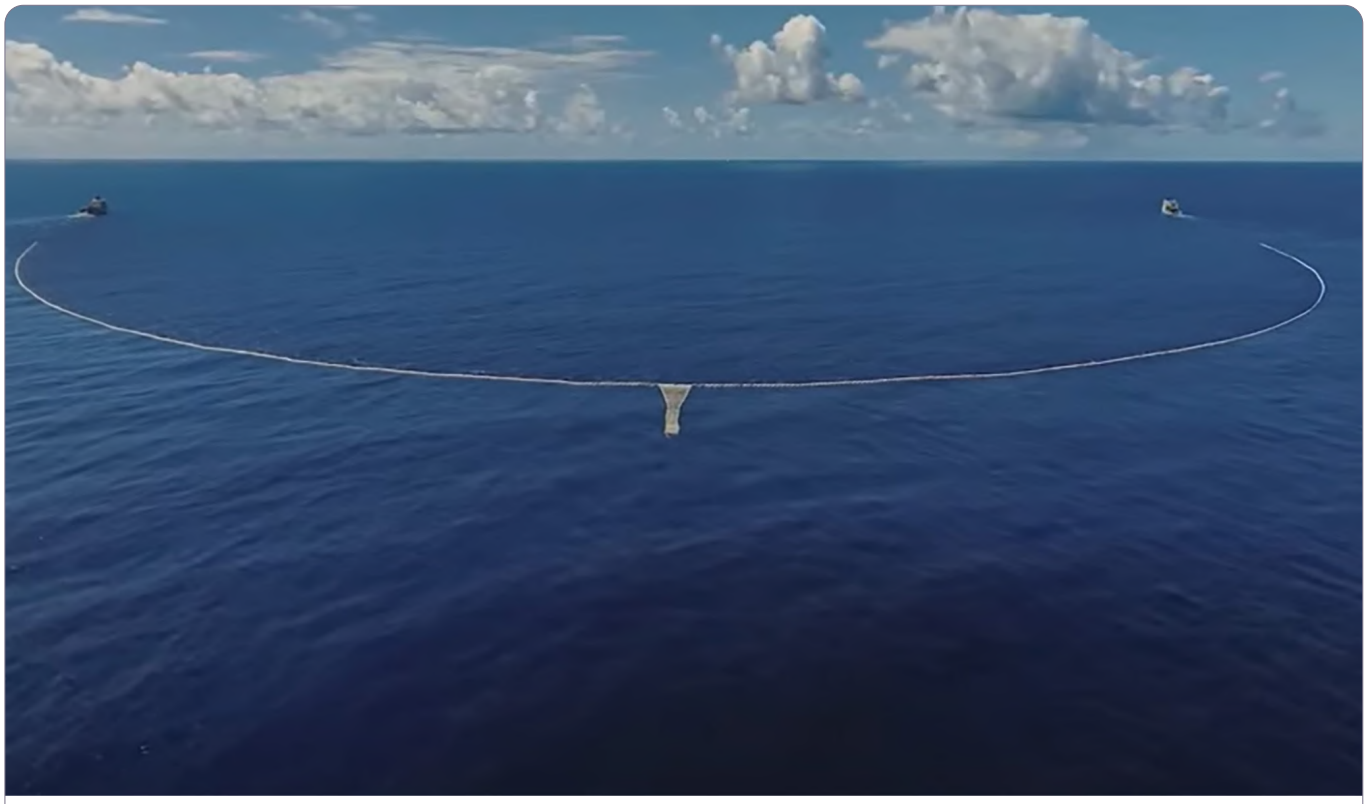


Рисунок 119. На изображении показана технология Ocean Cleanup в действии. Длинный U-образный плавучий барьер из прочного материала собирает пластиковый мусор на поверхности океана.

Источник: https://oceanfdn.org

Хотя этот метод выглядит перспективным, важно учитывать некоторые аспекты, которые требуют внимания:

1. Процесс сбора мусора не является избирательным, и вместе с пластиком в ловушку попадают живые организмы, такие как микроскопические водоросли, личинки рыб и медузы. В настоящее время отсутствуют количественные оценки объёма сопутствующего вылова, однако потенциальное крупномасштабное изъятие этих организмов может иметь негативные последствия для морских экосистем, вызывая нарушения в естественных пищевых цепях. Несмотря на предпринимаемые меры по обеспéчению безопасности морских обитателей, проблема остается нерешённой.

2. Активисты искренне стремятся очистить океан, однако **предпринимаемых усилий недостаточно для достижения значимых результатов.**

По состоянию на ноябрь 2024 года инициативой The Ocean Cleanup извлечено из Мирового океана около 20 000 тонн пластиковых отходов. Это, безусловно, значительный результат. Однако в контексте глобальной проблемы он составляет лишь 0,01 % от общего объёма пластикового мусора в океане, который оценивается приблизительно в 200 млн тонн. При этом следует учитывать и поступление новых отходов, которое составляет около 11 млн тонн ежегодно (рис.120). Эти данные подчёркивают несоизмеримость усилий по очистке с масштабами проблемы.

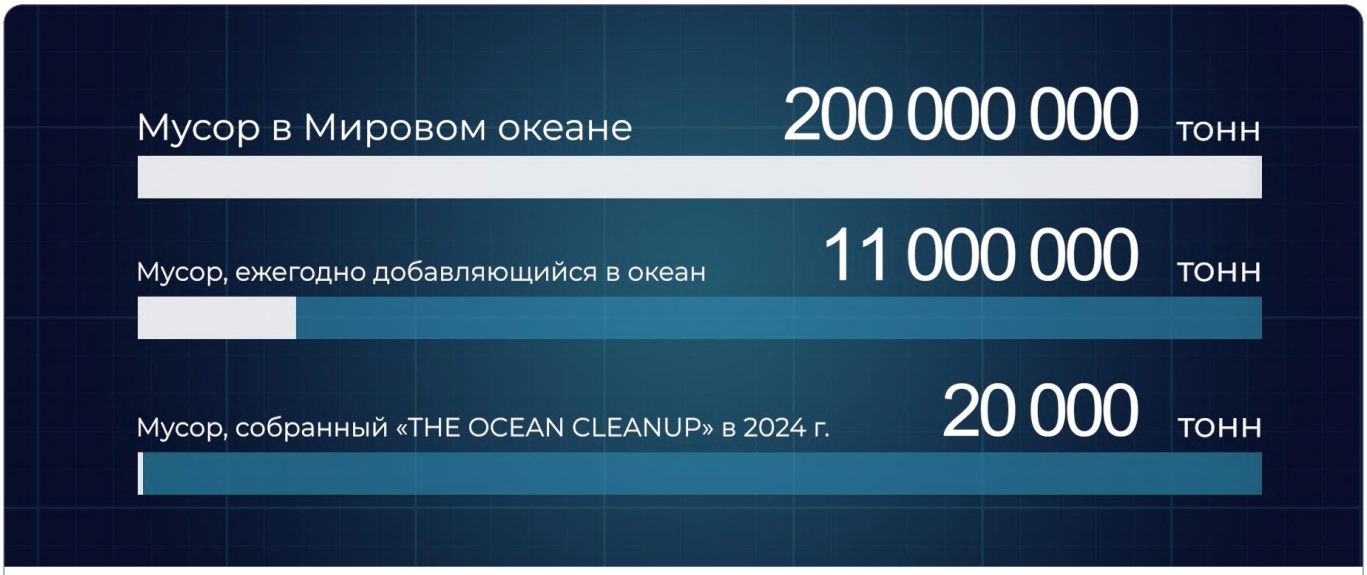
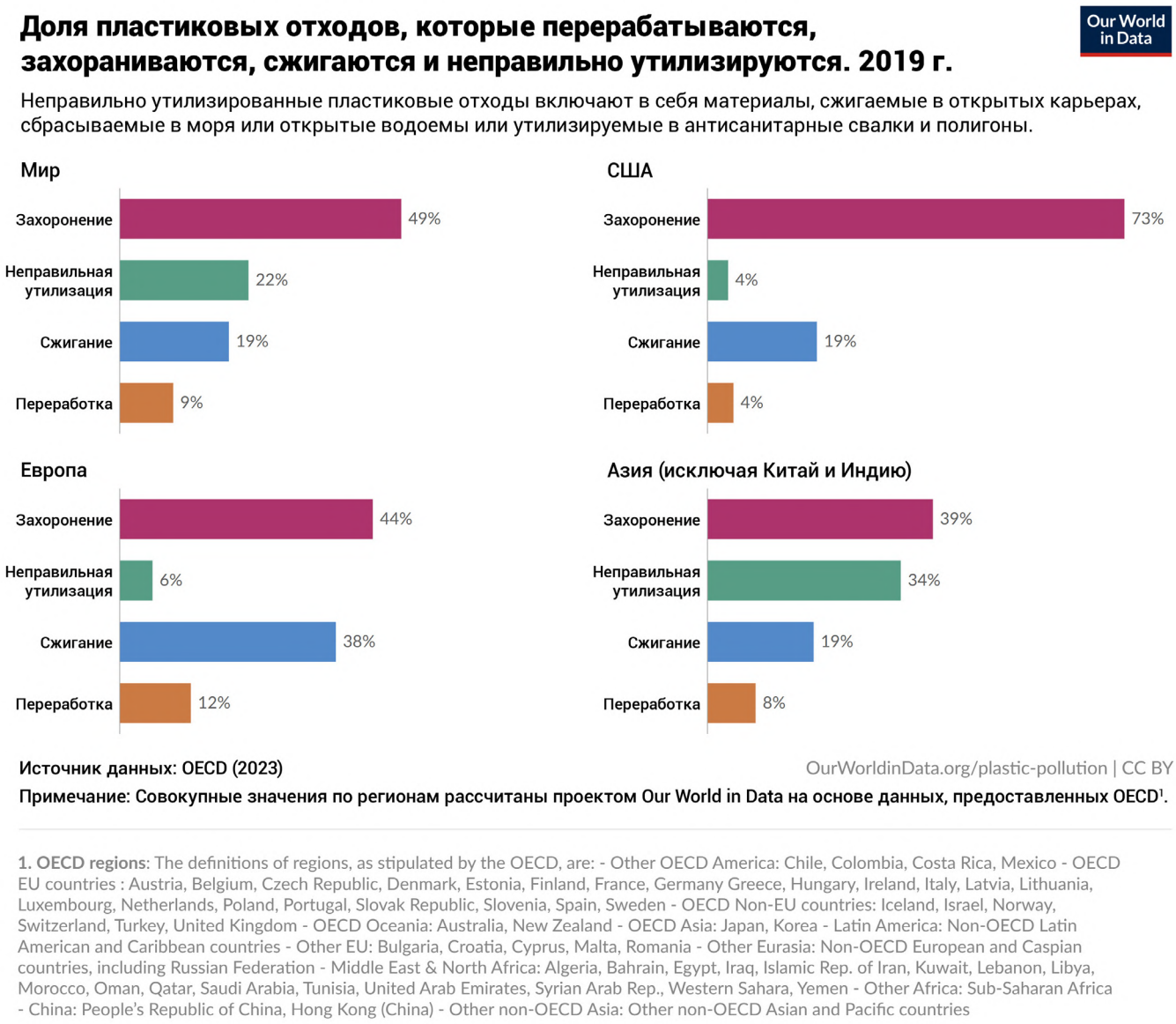


Рисунок 120. График сравнивает три ключевые метрики, связанные с пластиковым загрязнением океанов: количество плавающего пластикового мусора, ежегодно сбрасываемого в океан пластика и объём, вылавливаемый компанией Ocean Cleanup.

Источник данных: https://oceanfdn.org

3. Ключевым вопросом остаётся дальнейшая судьба извлечённого пластика. Текущие мировые показатели переработки пластиковых отходов не превышают 9 %. (рис. 121). В связи с этим существует вероятность того, что значительная часть собранного пластика может быть направлена на полигоны захоронения отходов, что не решает проблему загрязнения в долгосрочной перспективе.



1. **OECD regions**: The definitions of regions, as stipulated by the OECD, are: - Other OECD America: Chile, Colombia, Costa Rica, Mexico - OECD EU countries : Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany Greece, Hungary, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Netherlands, Poland, Portugal, Slovak Republic, Slovenia, Spain, Sweden - OECD Non-EU countries: Iceland, Israel, Norway, Switzerland, Turkey, United Kingdom - OECD Oceania: Australia, New Zealand - OECD Asia: Japan, Korea - Latin America: Non-OECD Latin American and Caribbean countries - Other EU: Bulgaria, Croatia, Cyprus, Malta, Romania - Other Eurasia: Non-OECD European and Caspian countries, including Russian Federation - Middle East & North Africa: Algeria, Bahrain, Egypt, Iraq, Islamic Rep. of Iran, Kuwait, Lebanon, Libya, Morocco, Oman, Qatar, Saudi Arabia, Tunisia, United Arab Emirates, Syrian Arab Rep., Western Sahara, Yemen - Other Africa: Sub-Saharan Africa - China: People's Republic of China, Hong Kong (China) - Other non-OECD Asia: Other non-OECD Asian and Pacific countries

Рисунок 121. Доля пластиковых отходов, которые перерабатываются, захораниваются, сжигаются и неправильно утилизируются, 2019 г. Неправильно утилизированные пластиковые отходы включают в себя материалы, сжигаемые в открытых карьерах, сбрасываемые в моря или открытые водоёмы или утилизируемые в антисанитарные свалки и полигоны.

Источник данных: региональные сводные данные были рассчитаны компанией Our World in Data и основаны на данных, указанных ОЭСР. OurWorldinData.org/plastic-pollution | CC BY
https://ourworldindata.org/grapher/share-plastic-fate?time=2019..latest

Более того, операции по очистке океана сопряжены со значительными финансовыми затратами. Например, удалённость Большого тихоокеанского мусорного пятна от территориальных вод каких-либо государств создаёт ситуацию, при которой ответственность за финансирование и проведение очистных мероприятий не определена. По оценке Чарльза Мура — океанографа и исследователя, первооткрывателя Большого тихоокеанского мусорного пятна — полномасштабная очистка Большого тихоокеанского мусорного пятна «приведёт к банкротству любую страну», предпринявшую подобные усилия. Следует отметить, что в Мировом океане идентифицировано пять подобных мусорных скоплений (рис.122), что усугубляет проблему.

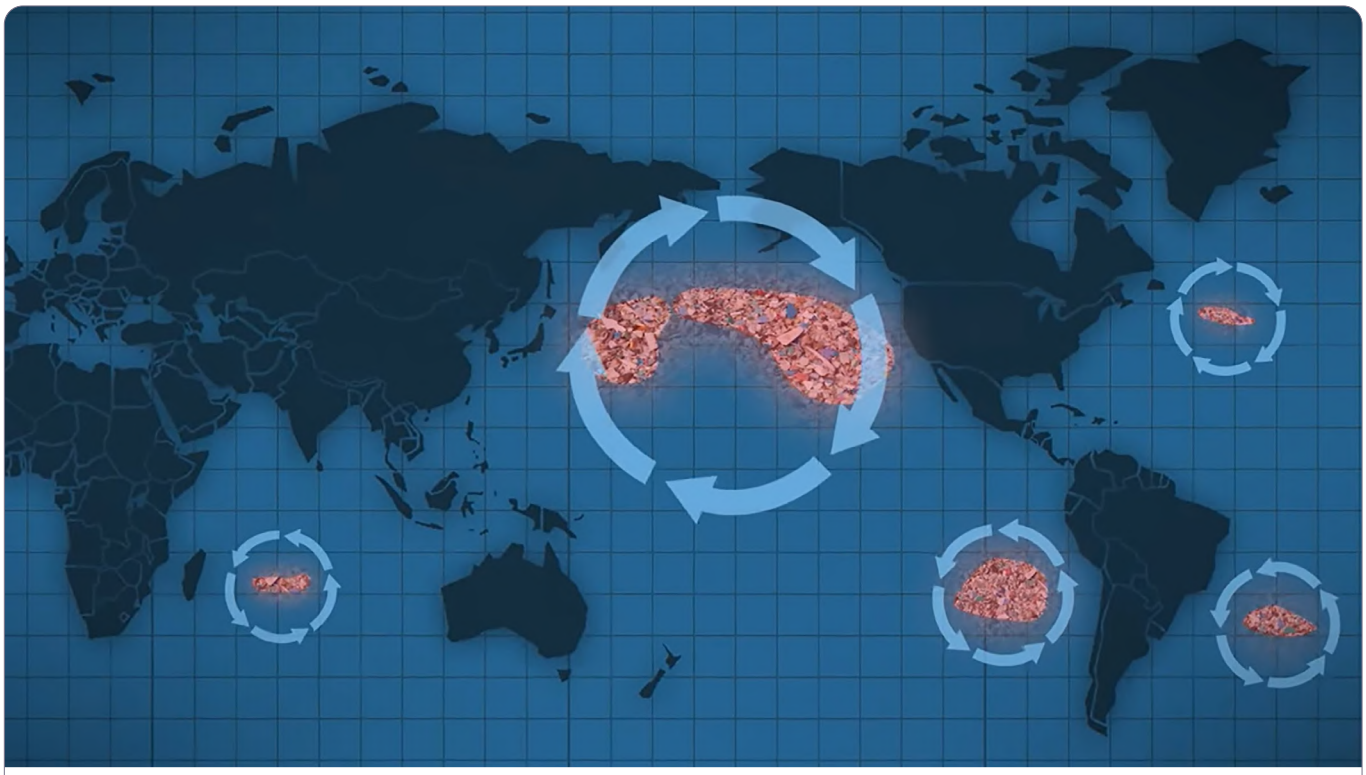


Рисунок 122. Схематическое изображение местоположения пяти основных мусорных скоплений в Мировом океане.

Важно отметить, что видимый крупный мусор составляет лишь часть общей проблемы пластикового загрязнения океана. По словам Мелани Бергманн, морского биолога Института Альфреда Вегенера, «речь идёт только о пластике на поверхности океана, причём это лишь небольшая часть, менее 1 % от того, что на самом деле находится в океане».

По мере фрагментации пластика на микро- и наночастицы, задача очистки океана от данного вида загрязнения значительно усложняется. Некоторые экспериментальные технологии для удаления микропластика из воды уже существуют. Например, исследователи из Сычуаньского университета разработали миниатюрную рыбку-робота (рис. 123), которая способна плавать в водной среде и адсорбировать близлежащие свободно плавающие кусочки микропластика[311]. Этот бионический робот длиной 13 мм эффективно собирает частицы микропластика благодаря прочным химическим связям и электростатическим взаимодействиям между материалами его корпуса и компонентами микропластика, такими как органические красители, антибиотики и тяжёлые металлы.

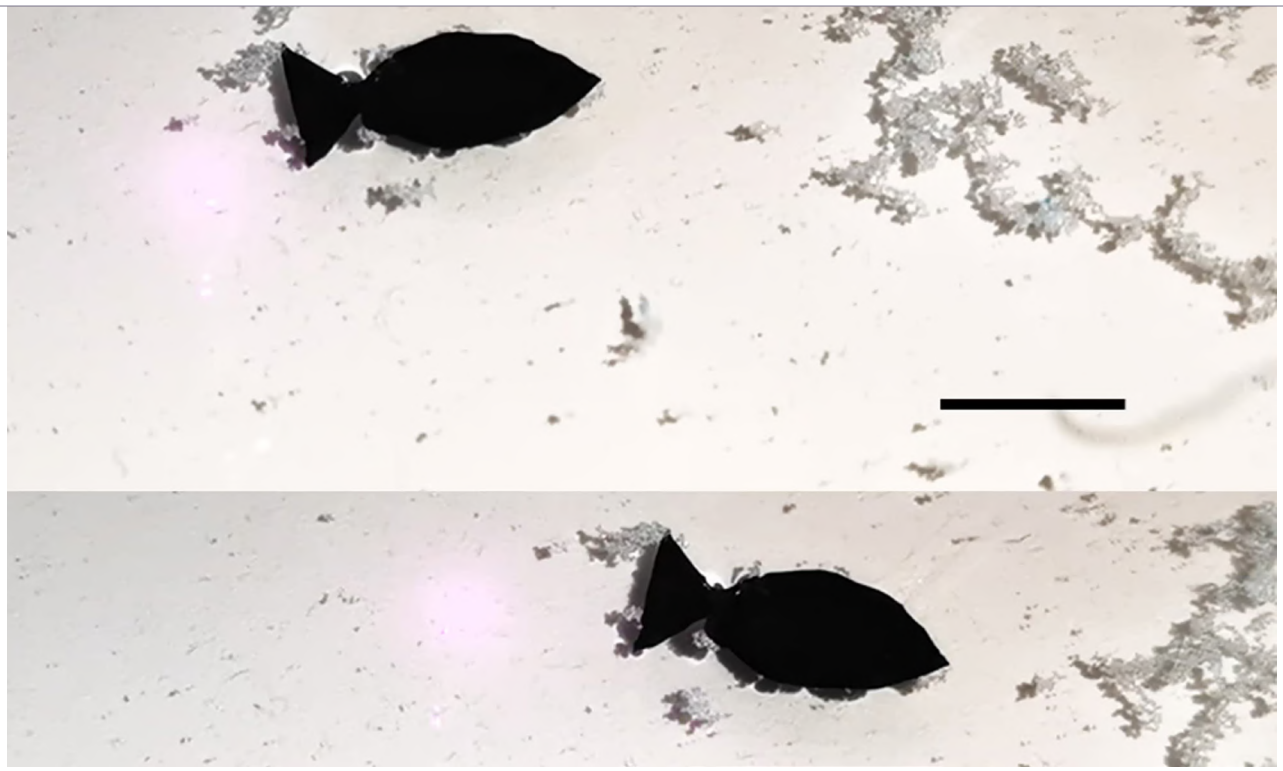


Рисунок 123. На изображении показана миниатюрная рыбка-робот, разработанная исследователями Сычуаньского университета. Компактное устройство, напоминающее настоящую рыбу, плавает в водной среде, активно адсорбируя свободно плавающие кусочки микропластика. https://www.theguardian.com/environment/2022/jun/22/scientists-unveil-bionic-robo-fish-to-remove-microplastics-from-seas

Однако, несмотря на такие инновации, практическое применение подобных технологий в глобальном масштабе на данный момент ограничено. Миниатюрные роботы адсорбируют микропластик в непосредственной близости от себя, что делает процесс локальным, даже в большом количестве, они не способны охватить объёмы Мирового океана. Кроме того, они сами могут стать частью пищевой цепи. Также существуют неопределенности относительно способности роботов функционировать в сложных условиях океана (течения, давление, солёность). Следовательно, существующие решения пока недостаточно эффективны и сталкиваются со сложностями масштабирования.

[311]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

Текущие методы очистки от микро- и нанопластика

Всё более интенсивно рассматривается потенциал применения микроорганизмов, особенно бактерий, для ферментативного разложения синтетических полимеров, прежде всего полиэтилентерефталата (ПЭТ). Данная технология позиционируется как потенциально экологически безопасная альтернатива традиционным методам утилизации пластиковых отходов — сжиганию. Однако накопленные на данный момент эмпирические данные позволяют усомниться в её эффективности, безопасности и применимости в промышленном масштабе.

В 2016 году команда японских учёных под руководством Сёсукэ Оды открыла бактерию *Ideonella sakaiensis*, способную разлагать полиэтилентерефталат посредством продукции двух ферментов — ПЭТазы и МЭТазы. Это стало важным событием в микробиологии[312]. Однако лабораторные исследования показали, что процесс разложения чрезвычайно медленный: на деградацию пластиковой плёнки массой 20г у бактерий ушло около семи недель при оптимальных условиях. Очевидно, что подобная скорость утилизации не может быть признана удовлетворительной для решения проблемы загрязнения пластиком. В масштабах мирового загрязнения, где миллионы тонн пластика попадают в природу ежегодно, такая скорость сопоставима с попыткой вычерпать океан чайной ложкой.

Научные усилия сосредоточились на модификации фермента ПЭТазы, который бактерия использует для разрушения пластика. Однако, как признают сами исследователи, фермент *Ideonella sakaiensis* находится на раннем этапе эволюции. Его эффективность низка, стабильность ограничена, а ускорение реакции требует температур, несвойственных естественной среде. Даже генная инженерия пока не может предсказать, какие мутации действительно приведут к улучшению. Речь идёт о «двух шагах вперёд, одном назад», как выразилась Элизабет Белл из Национальной лаборатории возобновляемой энергии США.

Кроме того, ферментативное разрушение далеко не универсально. Только некоторые типы пластика (например, ПЭТ) теоретически поддаются такому разложению. Полиэтилен, полипропилен и другие широко используемые материалы остаются практически неразлагаемыми для микроорганизмов. И учёные из Nature прямо говорят, что большинство пластиков слишком энергоёмки для эффективного биохимического разрушения.

Даже если представить, что такой высокоэффективный микроб появится, возникает куда более тревожный вопрос: можно ли его безопасно выпустить в окружающую среду? Любая генетически модифицированная бактерия — это потенциальный источник экологической катастрофы. На данный момент почти все страны строго регулируют или полностью запрещают выпуск таких организмов в дикую природу.

[312]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

Причины очевидны: неизвестно, как бактерия поведёт себя после «выполнения своей миссии». Не начнёт ли она разрушать другие важные органические соединения? Не вытеснит ли другие микробы? Не приведёт ли к мутациям с ещё менее предсказуемыми последствиями?

Таким образом, одна экологическая проблема может быть легко заменена другой — гораздо более непредсказуемой и разрушительной.

Несмотря на несомненное значение фундаментальных исследований в области бактериальной переработки пластмасс, на текущем этапе данная технология не может рассматриваться как эффективное, масштабируемое и безопасное решение проблемы пластикового загрязнения.

ПОДХОДЫ НАУЧНОГО СООБЩЕСТВА «АЛЛАТРА» К БОРЬБЕ С ЭПИДЕМИЕЙ МИКРО- И НАНОПЛАСТИКА

Технология атмосферных генераторов воды (АГВ) для очистки океана от МНП

Восстановление экологического равновесия требует массового внедрения инновационных технологий, таких как атмосферные генераторы воды (АГВ). На сегодняшний день такие установки представлены в широком диапазоне, от бытовых до промышленных моделей. Эти устройства способны производить питьевую воду из воздуха, эффективно удаляя загрязнители, в том числе микропластик (рис. 124). Для улучшения вкуса и качества, вода также может быть минерализована.

Принцип работы генераторов основан на конденсации влаги, содержащейся в воздухе.

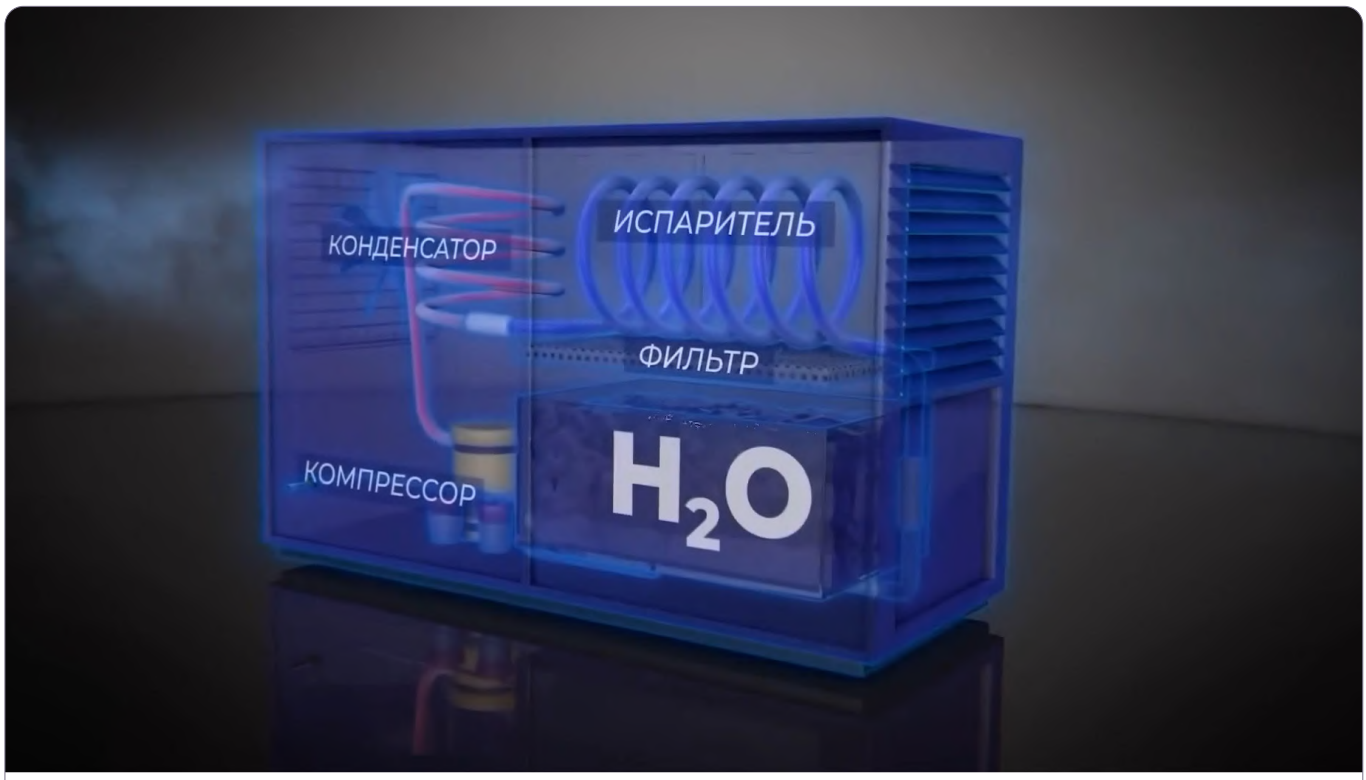


Рисунок 124. На картинке представлено схематическое изображение атмосферного генератора воды, иллюстрирующее его составные части и принцип работы

АГВ работают по двум основным технологиям.

1. **Технология, основанная на конденсации**, — этот метод втягивает окружающий воздух в устройство и подвергает его воздействию холодной поверхности/охлаждающей спирали, в результате чего водяной пар конденсируется в жидкость. Этот процесс похож на то, как влага образуется на холодном предмете, вынутом из морозильной камеры. Конденсационные АГВ лучше всего работают в тёплой и влажной среде.

2. **Технология, основанная на адсорбции**, — для улавливания влаги из воздуха используются влагопоглощающие материалы, такие как силикагель, цеолиты или металлоорганические каркасы. Поглощённая вода затем высвобождается при нагревании материала.

В настоящее время такие установки локально используются для обеспечения населения питьевой водой, в том числе в ситуациях, связанных с климатическими бедствиями.

Широкомасштабное применение АГВ для удовлетворения потребностей как промышленности, так и населения может привести к значительному снижению уровня загрязнения океанов в течение нескольких лет.

В настоящее время источником воды для бытовых нужд, в том числе приготовления пищи, служат водоёмы, которые часто содержат высокие уровни микро- и нанопластика. Эта вода способствует накоплению пластика в организме человека. Переход к добыче воды из воздуха, а не из загрязнённых источников, может существенно улучшить качество потребляемой воды.

Восстановление экосистем через естественную фильтрацию и атмосферные генераторы воды

Для эффективного удаления микропластика из использованной воды необходимо применять инновационные технологии, современные фильтрационные и ассимиляционные системы. Кроме того, важно переоснастить очистные сооружения таким образом, чтобы использованная вода после очистки не сбрасывалась в водоёмы, а направлялась в почву, так как в почве обитают микроорганизмы, которые естественным образом способны перерабатывать пластик[313].

Эти организмы существенно отличаются от генетически модифицированных или искусственно созданных в лабораторных условиях. Их присутствие в экосистемах остаётся естественным, и они не проявляют признаков инвазивных видов в данной среде.

[313]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

Исследования[314] свидетельствуют о том, что ряд почвенных микробов, обитающих в естественной среде[315], демонстрируют значительную эффективность в разложении полимеров[316], таких как полиэтилен[317] и полиэтилентерефталат[318] (ПЭТ). Например, наибольшая активность грибковой деградации — среднее снижение массы полиэтилена на 36,4±5,53 % за 16 недель — была отмечена у штамма Aspergillus oryzae A5, 1.

Способность микробов к биоразложению полимеров обусловлена тем, что они вырабатывают ферменты, которые позволяют расщеплять сложные молекулярные структуры пластиков[315].

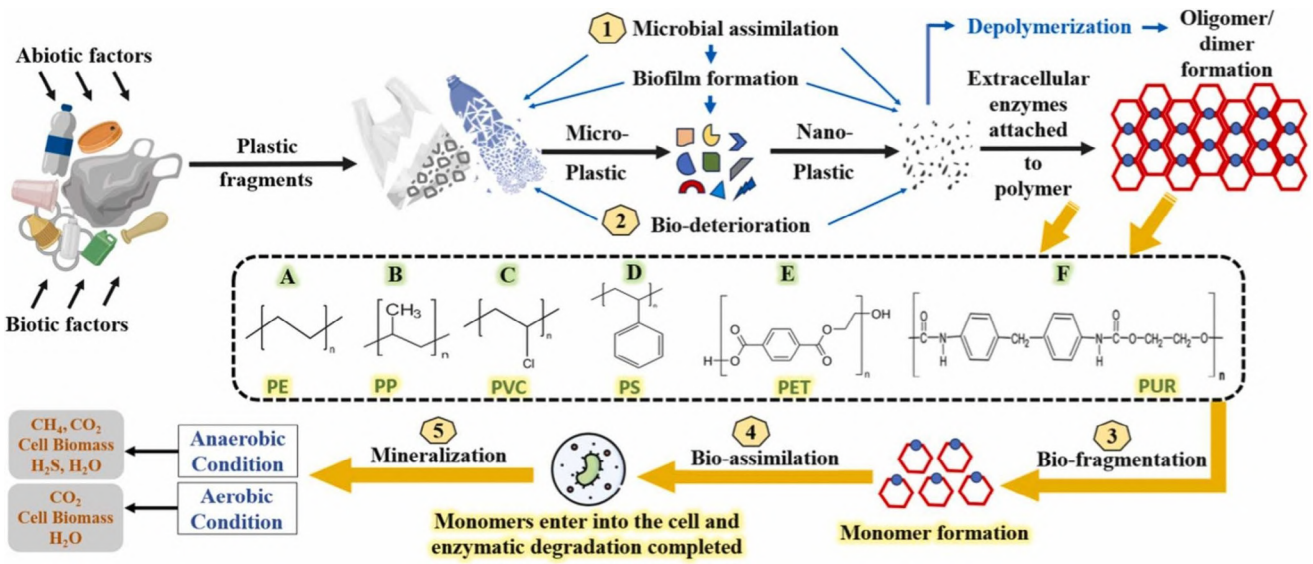


Рисунок 125. Разложение микро- и нанопластика бактериальными ферментами.
Источник данных: Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to 'White Pollution'. The Microbe 3, 100072 (2024). https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072

Эти данные, подтверждённые экспериментальными наблюдениями, указывают на потенциал использования природных микробных сообществ для снижения уровня загрязнения окружающей среды микро- и нанопластиком.

«Среди нескольких методов рекультивации, доступных на сегодняшний день, микробная рекультивация демонстрирует лучшие перспективы для разложения или устойчивого удаления микропластика из окружающей среды», — говорится в обзорном исследовании[315].

[314]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
[315]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
[316]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
[317]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
[318]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

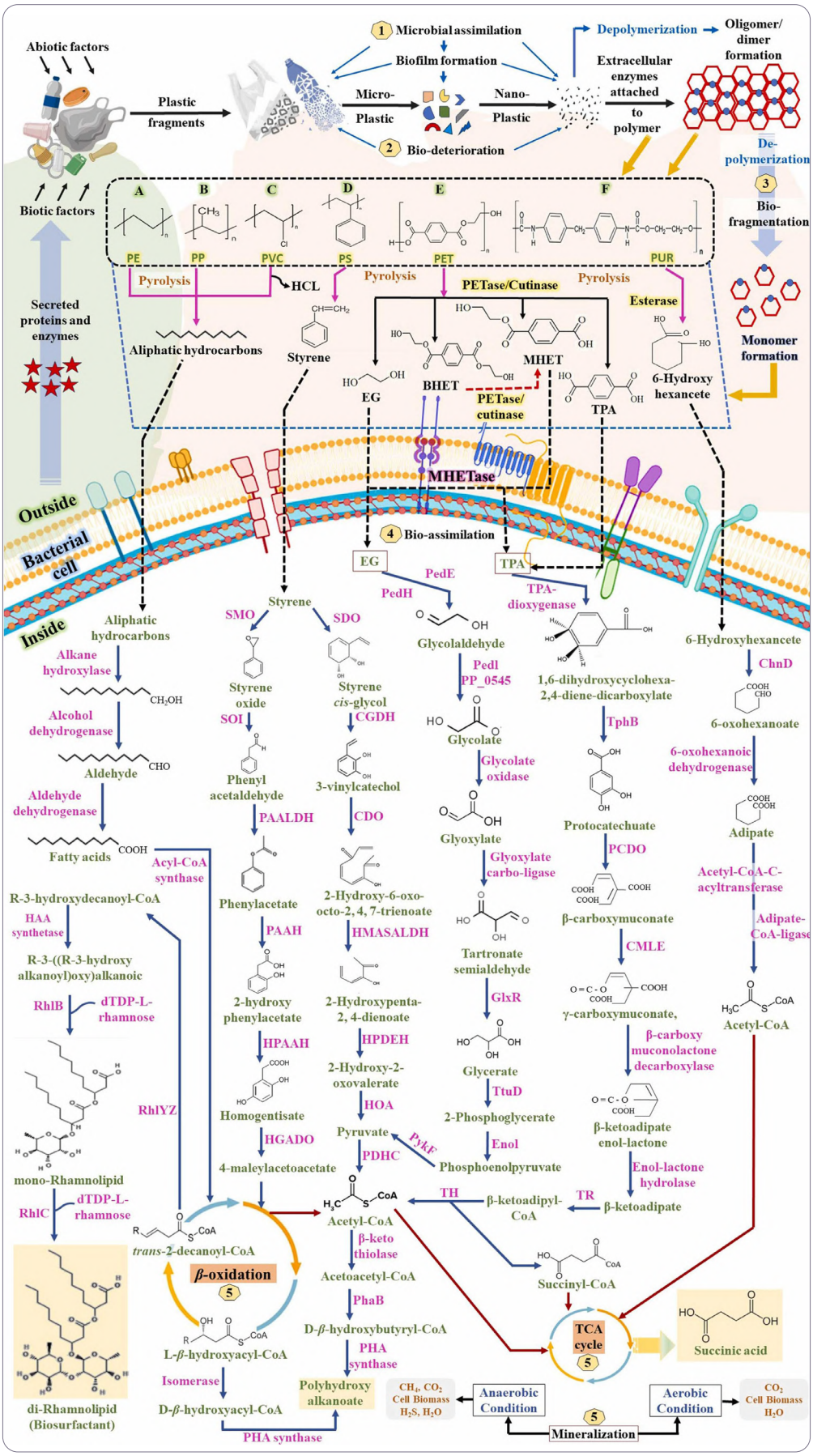


Рисунок 126. Отходы пластика разлагаются на МНЧ из-за различных абиотических и биотических факторов

Источник: Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to ‘White Pollution’. The Microbe 3, 100072 (2024). https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072

Таким образом, переход на технологию добычи воды из воздуха значительно улучшит качество потребляемой воды, и в сочетании с технологией микробной рекультивации это будет способствовать значительному снижению микро- и нанопластикового загрязнения в окружающей среде.

В верхних слоях почвы, как и в водоёмах, концентрация пластика некоторое время, будет оставаться высокой. Однако по мере проникновения воды на большую глубину произойдёт самоочищение (рис. 127). Микроорганизмы, обитающие в почве, будут способствовать разложению мелких частиц нанопластика.

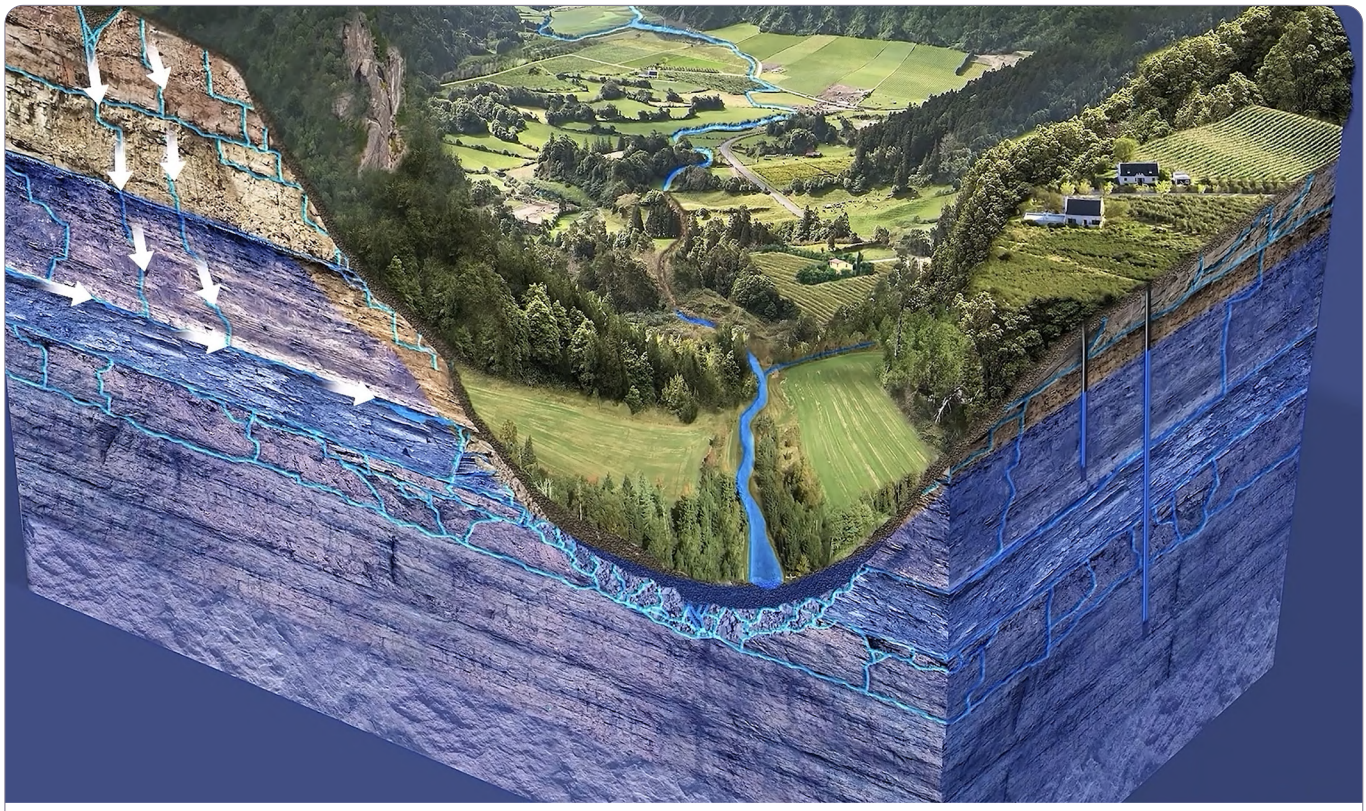


Рисунок 127. Схематическое изображение процесса биологической доочистки воды, сливаемой в почву, через геологические породы. Стрелки показывают путь сточных вод, проходящих через слои почвы и пород, где микроорганизмы и фильтрующие материалы удаляют загрязнения. Слои грунта обозначены разными цветами: коричневый — для почвы, серый — для песка и гравия.

Увеличение объёма использованной и отфильтрованной на очистных сооружениях воды, сливаемой в почву, способствует размножению микроорганизмов, включая бактерии, грибы и археи, которые играют основополагающую роль в формировании здоровой почвы, круговорота питательных веществ и устойчивости экосистем. В дальнейшем очищенная вода будет просачиваться в более глубокие слои и возвращаться в океаны.

Размещение установок атмосферных генераторов воды в пустынных регионах, а также возвращение использованной воды в почву представляется перспективным решением для преодоления водного кризиса и борьбы с опустыниванием, так как активизирует процессы,

способствующие восстановлению растительности[319] и экосистем. Использование АГВ приведёт к улучшению качества жизни местного населения, решая проблему нехватки питьевой воды.

В сочетании с микробной рекультивацией применение АГВ может стать важным шагом к устойчивому управлению водными ресурсами и восстановлению деградированных земель.

Полный переход на АГВ предполагает использование атмосферной воды для всех нужд населения, включая бытовые, промышленные и сельскохозяйственные. Внедрение этой технологии в глобальном масштабе приведёт к более интенсивному испарению, что вызовет охлаждение океана, а также ускорит его очищение. Кроме того, снижение избыточной влаги в атмосфере с помощью АГВ уменьшит количество экстремальных осадков и ветров, что может смягчить разрушительное воздействие природных катаклизмов (подробнее смотрите в фильме «Вода из воздуха. Путь к спасению человечества»).

Вызовы и риски, связанные с применением атмосферных генераторов воды

Однако существует и обратная сторона глобального применения АГВ. Проблема заключается в том, что в контексте применения технологий атмосферной генерации воды не учитывается непосредственно её влияние на человека. Хотя применение данной технологии действительно может способствовать очищению океанических вод и улучшению теплопроводности, однако масштабное применение АГВ также может привести к значительному увеличению концентрации микропластика в атмосфере. Механизм функционирования АГВ включает в себя конденсацию влаги из атмосферы, которая впоследствии восполняется за счёт испарения из океанических вод. Поскольку эти воды содержат высокие уровни микропластика и нанопластика, влага, поступающая в атмосферу в ходе данного процесса, может транспортировать мельчайшие пластиковые частицы. В результате в тех регионах, где будут применяться данные технологии, включая крупные мегаполисы, уровни нанопластика во вдыхаемом воздухе могут достичь тех же показателей, которые в настоящее время наблюдаются в прибрежных зонах. Это создаёт риск увеличения концентрации нанопластика в воздухе, что представляет угрозу для здоровья человека. Вдыхание нанопластика способствует его накоплению в организме, в том числе в головном мозге.

И это — ключевой момент. Необходимо понимать, что сама идея использования АГВ как средства очистки океанических вод была выдвинута учеными АЛЛАТРА более двадцати лет назад — в условиях, когда концентрация микропластика в атмосфере оставалась крайне низкой. В тот период реализация подобных технологий могла действительно принести ощутимую экологическую пользу без серьёзного риска для человека. Однако сегодня

[319] 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

ситуация кардинально изменилась. Массовое применение АГВ в современных условиях, напротив, приведёт в первую очередь к увеличению концентрации МНП в воздухе, теперь, при уже высоких уровнях МНП в атмосфере, добавление дополнительных объёмов через АГВ может стать фатальным для здоровья людей.

Таким образом, технология, некогда перспективная и инновационная, утратила свою актуальность. Мы, как человечество, упустили тот критически важный момент, когда АГВ могли бы стать спасением. Временной фактор в вопросах климата и загрязнения окружающей среды играет решающую роль. То, что могло бы сохранить здоровье миллионов и действительно очистить планету два десятилетия назад, сегодня стало потенциально опасным. АГВ — больше не технология будущего, напоминание об упущенной возможности. В нынешних реалиях приоритетом должны быть разработки, которые позволят вывести МНП из атмосферы и из человеческого организма. В первую очередь нам необходимо выиграть время.

Инновационный научный подход к снижению токсичности микро- и нанопластика

С учётом представленных данных о многоуровневом и кумулятивном воздействии микропластика, и особенно нанопластика, на здоровье человека, становится очевидным: современная цивилизация сталкивается с эколого-биомедицинским вызовом, выходящим за рамки традиционных представлений о загрязнении окружающей среды. Эта проблема затрагивает не только отдельные биосферы, но и устойчивость популяции *Homo sapiens* в долгосрочной перспективе.

На сегодняшний день практически весь произведённый пластик — более 9 миллиардов тонн — продолжает накапливаться в окружающей среде, подвергаясь фрагментации до микро- и наноразмеров, обладающих высокой химической и биологической активностью. Микро- и нанопластик обнаруживается в почве, воде, воздухе и во всех основных категориях пищевых продуктов — от овощей и фруктов до мяса, рыбы, мёда, молока и соли. Это указывает на тотальное проникновение пластиковых частиц в пищевые цепи, что существенно трансформирует традиционное представление о «безопасной» или «здоровой» пище.

Путь поступления частиц в организм человека во многом определяет их биологическое поведение и распределение. В то время как пластик, попадающий через пищеварительный тракт, может частично выводиться, ингаляционный путь характеризуется значительно более высокой степенью риска. Вдыхаемый нанопластик оседает в лёгочной ткани, преодолевает гематогенные барьеры и может достигать напрямую головного мозга, где способен накапливаться с пролонгированным сроком. При этом естественные механизмы детоксикации (печень, почки) не обладают эффективными средствами распознавания и удаления таких частиц.

Наибольшая плотность микропластика фиксируется вблизи водоёмов, прибрежных зон и лесных массивов — особенно в условиях повышенной влажности и температуры.

В таких ландшафтах пластик задерживается дольше, участвует в аэрозольном переносе, провоцирует окислительный стресс у растений и снижает эффективность фотосинтетических процессов. Отдых на побережье, ранее рассматривавшийся как благоприятный с точки зрения оздоровления, сегодня сопряжён с дополнительной ингаляционной нагрузкой: по оценкам, объём вдыхаемого пластика вблизи открытых водоёмов может многократно превышать показатели городской среды.

Эпидемиологические исследования показывают устойчивую связь между уровнем загрязнения МНП и распространённостью хронических неинфекционных заболеваний — включая артериальную гипертензию, сахарный диабет, инсульт, депрессивные и когнитивные расстройства. Вследствие способности преодолевать биологические барьеры и накапливаться в различных тканях, включая мозг, сердце, лёгкие и плаценту, МНП оказывает токсическое действие на молекулярном, клеточном и органном уровнях. Пластик, аккумулируясь в организме, оказывает иммуносупрессивное, воспалительное и генотоксическое действие. Несмотря на прогресс в выявлении рисков, эффективные механизмы нейтрализации и выведения МНП из организма человека до настоящего времени не разработаны.

Одним из наиболее критичных свойств нанопластика, оказывающим системное биологическое влияние, является его способность удерживать электростатический заряд. В отличие от инертных частиц, нанопластик активно взаимодействует с клеточными поверхностями, белками, рецепторами и даже генетическим материалом, формируя устойчивые связи на молекулярном уровне.

Это свойство не только усиливает проникновение частиц нанопластика через биологические барьеры, включая гематоэнцефалический, но и затрудняет их последующее выведение, способствуя длительному задерживанию в тканях, особенно в головном мозге. Электростатическое взаимодействие инициирует каскад клеточных нарушений, включая деполяризацию мембран, митохондриальные дисфункции, окислительный стресс и апоптоз, что значительно повышает токсичность даже при минимальных концентрациях частиц нанопластика.

Авторы данного доклада выдвигают предположение, что решение этой задачи — нейтрализация или экранирование электростатического заряда микро- и нанопластика — может стать фундаментальным прорывом, способным значительно снизить биологическую активность нанопластика и замедлить скорость его накопления в критически важных органах. По оценкам авторов доклада, экранирование или нейтрализация электростатического заряда способны снизить потенциальную опасность МНП как минимум на 50 %, что делает данное направление исследований критически важным. Это даст научному сообществу временной зазор, необходимый для разработки более комплексных подходов к диагностике, детоксикации и профилактике последствий МНП. В данном аспекте исследования в области биофизики, наноматериаловедения и

молекулярной токсикологии приобретают приоритетное значение. Промедление в данном случае — это потенциальное ускорение деградационных процессов.

Параллельно с биомедицинскими решениями требуется научно обоснованная стратегия безопасного обращения с пластиковыми отходами. Существующая система утилизации не в состоянии предотвратить дальнейшую фрагментацию и поступление микропластика в биосферу. В условиях глобализации необходима разработка международной технологической платформы для создания, внедрения и масштабирования безопасных методов сбора и переработки пластика. Такие меры могут быть реализованы исключительно при наличии институциональной поддержки, трансграничного регулирования и научной дипломатии.

Особое значение приобретает повышение информированности научного сообщества, представителей здравоохранения и широкой общественности. На сегодняшний день большинство людей не осознают масштабов воздействия МНП и продолжают неосознанно способствовать его распространению.

Таким образом, проблема микро- и нанопластика перестала быть потенциальной угрозой и трансформировалась в фактор системного риска. Данное направление требует приоритетного внимания со стороны научного сообщества и органов здравоохранения, систематизации данных, разработки стандартов оценки рисков, а также расширения межгосударственного и международного сотрудничества. Для выработки эффективных решений, обеспечивающих биологическую безопасность в краткосрочной и долгосрочной перспективе, необходимы междисциплинарный подход, институциональное признание и международная консолидация усилий.

ФАКТОР X. ВОЗДЕЙСТВИЕ МИКРО- И НАНОПЛАСТИКА НА ДИНАМИКУ ЦИКЛА ПРИРОДНЫХ КАТАКЛИЗМОВ

Как уже было сказано в главе «Влияние микро- и нанопластика на климат», частицы микро- и нанопластика снижают теплопроводную функцию океанических вод, что приводит к накоплению тепла в океане и, как следствие, к критическому росту температур океана. Однако микро- и нанопластики сами по себе не являются источником нагрева океана.

С весны 2023 года и на протяжении более года средняя температура поверхности Мирового океана ежедневно обновляла исторические максимумы, что стало беспрецедентным явлением в истории наблюдений (рис. 128). Учёные по всему миру выражают серьёзную обеспокоенность этим аномальным повышением.

> Доктор Брайан Макнолди, старший научный сотрудник Школы океанологии при Университете Майами, отмечает: **«Речь идёт не просто о рекордных температурах океана, которые наблюдаются уже целый год, — важно, насколько эти новые рекорды превосходят прежние. Современные показатели даже близко не соответствуют предыдущим рекордным значениям»**[320].

> Эту обеспокоенность разделяет доктор Роб Лартер, британский морской геофизик: **«Это действительно настораживает, в том числе потому, что я не слышу ни одного учёного, который бы дал убедительное объяснение, почему наблюдается такое сильное отклонение. Но сейчас складывается впечатление, что всё развивается гораздо сильнее и быстрее, чем мы ожидали»** [321].

По данным климатических исследований, современные модели предсказывают постепенное повышение температуры поверхности океана, но наблюдаемая скорость этого процесса значительно превышает все прогнозы.

Учёные считают, что антропогенное изменение климата играет определённую роль, но оно не может полностью объяснить наблюдаемый феномен.

---

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

[321]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 (Дата доступа 01.05.2025).

Профессор Джон Абрахам из Университета Св. Томаса, изучающий температуру океана, высказал предположение о наличии ранее неизвестных факторов, которые могут влиять на долгосрочные изменения температуры поверхности океана[320]. Он отметил, что эти факторы не были учтены в предыдущих прогнозах. Авторы данного доклада выдвигают предположение о существовании некоего «фактора X», который может быть ответственен за дополнительный нагрев океана и атмосферы.

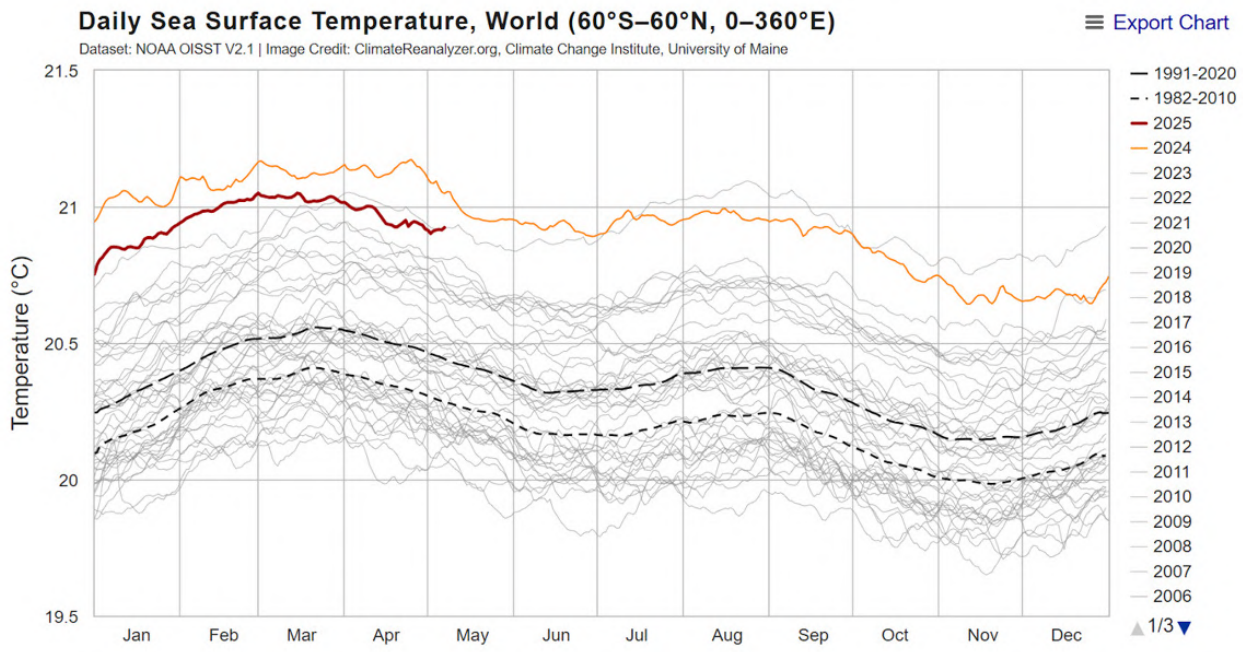


Рисунок 128. Среднесуточная температура поверхности океана, 1981–2025 гг.

Источник данных: Dataset NOAA OISST V2.1 | Источник изображения: ClimateReanalyzer.org, Climate Change Institute, University of Maine, Dataset NOAA OISST.
https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2

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

Может ли микро- и нанопластик в океане являться неизученным фактором X?

Анализ возможности того, что именно микро- и нанопластик являются главной причиной текущего нагрева океанов, выявляет серьёзное противоречие. Нанопластик действительно ухудшает способность океана отводить тепло. Однако он не генерирует тепловую энергию — он лишь препятствует её выходу из океана.

За последние 60 лет средние глубины океана нагревались в 15 раз быстрее, чем за предыдущие 10 000 лет [322, 323], и этот процесс только ускоряется. Эта прогрессия нарастает с каждым годом всё быстрее. Необходимо огромное количество энергии, чтобы поднять температуру на таких глубинах, куда солнечные лучи уже не проникают[324, 325].

В свою очередь масштабное поступление микро- и нанопластика в океан началось относительно недавно — примерно 30 лет назад, в то время как ускорение потепления океанических глубин наблюдается уже на протяжении последних 60 лет. Таким образом, пластик не может объяснить долгосрочную и нарастающую тенденцию нагрева средних глубин океана, начавшуюся задолго до значительного появления этих загрязнителей в океане.

Также не может объяснить этот нагрев и солнечная радиация, так как солнечные лучи проникают на глубины до 200 м. Вода может нагреваться от Солнца максимально до 700 м в результате перемешивания[326].

Для прогрева глубинных слоёв, куда не проникают солнечные лучи, требуется колоссальное количество энергии. Это означает, что накопленное в океане тепло должно поступать из другого источника, а присутствие нанопластика приводит к тому, что это тепло «запирается» внутри океана.

Ввиду того, что нагрев от Солнца не объясняет причин экспоненциального роста температур океана, было выдвинуто предположение о наличии дополнительных источников нагрева океана в различных его частях.

Вертикальное распределение температурных аномалий

Анализ данных системы Argo глобальных колебаний температуры на различных глубинах за последние два десятилетия выявил ряд температурных аномалий, не согласующихся

[322] 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
[323] Columbia Climate School. 'Is Global Heating Hiding Out in the Oceans?'. (2013) https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130 (Дата доступа 10.05.2025).
[324] NOAA Ocean Service. 'How far does light travel in the ocean?'. (n.d.) https://oceanservice.noaa.gov/facts/light_travel.html (Дата доступа 10.05.2025).
[325] NOAA Ocean Exploration. 'Marine Life'. (n.d.) https://oceanexplorer.noaa.gov/explainers/marine-life.html (Дата доступа 10.05.2025).
[326] Climate.gov. 'The role of the ocean in tempering global warming'. (2014) https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/role-ocean-tempering-global-warming (Дата доступа 10.05.2025).

с традиционной моделью нисходящей теплопередачи от поверхности к глубинным слоям океана[327, 328].

Зафиксированы статистически значимые случаи инверсии температурного градиента, когда более тёплые водные массы располагаются под относительно холодными поверхностными слоями (рис. 129). Подобная стратификация температур физически невозможна при исключительно нисходящей теплопередаче с поверхности, поскольку тепловая энергия, согласно законам физики, не способна преодолеть промежуточный холодный слой сверху вниз.

Данные ARGO показывают колебания температуры на различных глубинах за последние 20 лет

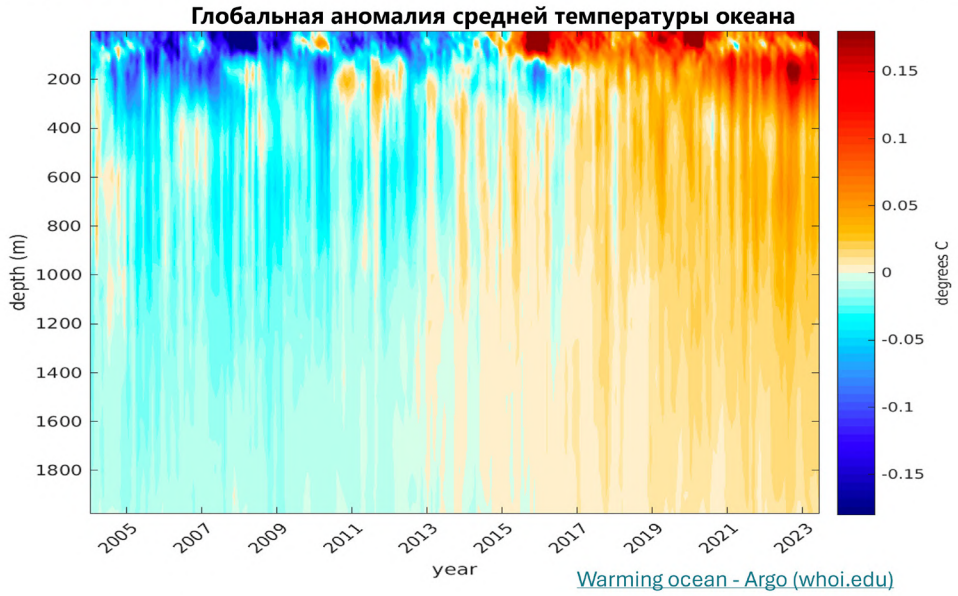


Рисунок 129. Глобальные аномалии температуры океана на глубинах 0–1 900 м с 2004 года
Источник: Argo https://www2.whoi.edu/site/argo/impacts/warming-ocean/

Новые исследования учёных из Китайского океанологического университета[329] подтверждают выводы о наличии в толщах воды тепловых аномалий, не проявленных на поверхности океана. Исследования доказали, что треть морских волн тепла никак не проявляется на поверхности океана, а около половины — проявляется не на всех этапах жизненного цикла. Ежегодное количество этих подповерхностных морских тепловых волн значительно увеличивается в результате потепления океана в течение последних трёх десятилетий. То, что значительная часть морских волн тепла совсем не наблюдается на поверхности океана, однозначно указывает на то, что они не могут быть вызваны теплом от атмосферы.

[327] 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.
[38] 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.
[329] 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

Исследование источников нагрева на дне океана

Исследования и регулярный мониторинг температуры на дне океана на сегодняшний день крайне редки и ограничены. Долгое время наука не ставила перед собой задачу отслеживать изменения именно на таких глубинах. Современные системы мониторинга, такие как сеть буёв ARGO, позволяют собирать данные лишь с 0,03 % площади океана, при этом большинство буёв погружается только на половину средней глубины, не достигая океанического дна[330].

Реально изучено человечеством всего около 3–3,5 % поверхности дна океана[331]. Это связано с рядом серьёзных причин. Во-первых, большая часть Мирового океана находится на глубинах 3 000–6 000 м. Создание глубоководных аппаратов, способных выдержать колоссальное давление на глубинах до 6 000 м, требует огромных финансовых и технологических ресурсов. Во-вторых, сами экспедиции чрезвычайно сложны и затратны: за всю историю было построено лишь восемь специализированных аппаратов для подобных исследований. По этой причине сегодня мы изучили космос в некоторых аспектах даже глубже, чем самые отдалённые уголки Мирового океана.

В то же время становится всё более очевидным, что геологические процессы на дне океана могут играть существенную роль в изменении климата и теплового баланса океанов. На дне расположены миллионы уникальных геологических объектов — вулканы, разломы и гидротермальные источники, обладающие огромной энергией. Однако из-за их труднодоступности и недостаточного охвата мониторинга масштабы их потенциального влияния до сих пор во многом остаются загадкой для науки.

Несмотря на это, исследования океанического дна всё же проводятся, и целый ряд из них указывает на нагрев океанической воды на дне.

Так, **в двух глубоких участках Аргентинского бассейна**[332], на глубинах больше 4 500 м, наблюдаются значительные тенденции потепления: 0,02 °C ± 0,01 °C за десятилетие, в период 2009–2019 гг. Это колоссальное количество энергии, которое необходимо, чтобы нагреть такой объём холодной воды на дне.

Прямо у берегов Западной Антарктиды происходит аномальный нагрев глубоких вод моря Уэдделла[333], в то время как верхние 700 м вод почти не нагреваются. В более глубоких регионах наблюдается постоянное повышение температуры. С одной стороны море Уэдделла обрамляет Западно-Антарктический рифт, с другой — подводный вулканический хребет с Южными Сандвичевыми островами.

---

[330]Argo Program. 'Mission'. (n.d.) https://argo.ucsd.edu/about/mission/ (Дата доступа 10.05.2025).
[331]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.
[332]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
[333]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

Роль геотермального теплового потока, тектонических процессов и вулканических извержений на дне океана

В контексте наблюдаемых аномалий нагрева глубоководных слоёв, где влияние атмосферы минимально, логичным представляется рассмотрение геотермального потока из недр Земли как потенциального источника дополнительного тепла. Традиционно в климатических моделях геотермальный поток, поступающий снизу, принимается постоянным и равным примерно 0,09 Вт/м² (или 90 мВт/м²)[334], что на несколько порядков меньше солнечного потока[335, 336].

Однако растущий объём научных данных указывает на значимость этого недооценённого источника тепла. Масштабные геотермические исследования показали, что энергия теплового потока, выходящая через дно океана, зависит от возраста океанической коры: он максимален в молодых зонах спрединга и минимален в старых океанических бассейнах[337](рис. 130). Такие локальные аномалии могут оказывать влияние на вертикальную структуру температуры воды, ослаблять термоклин и способствовать перемешиванию водных масс, что влияет на циркуляцию, биопродуктивность и даже на устойчивость ледников в приполярных областях.

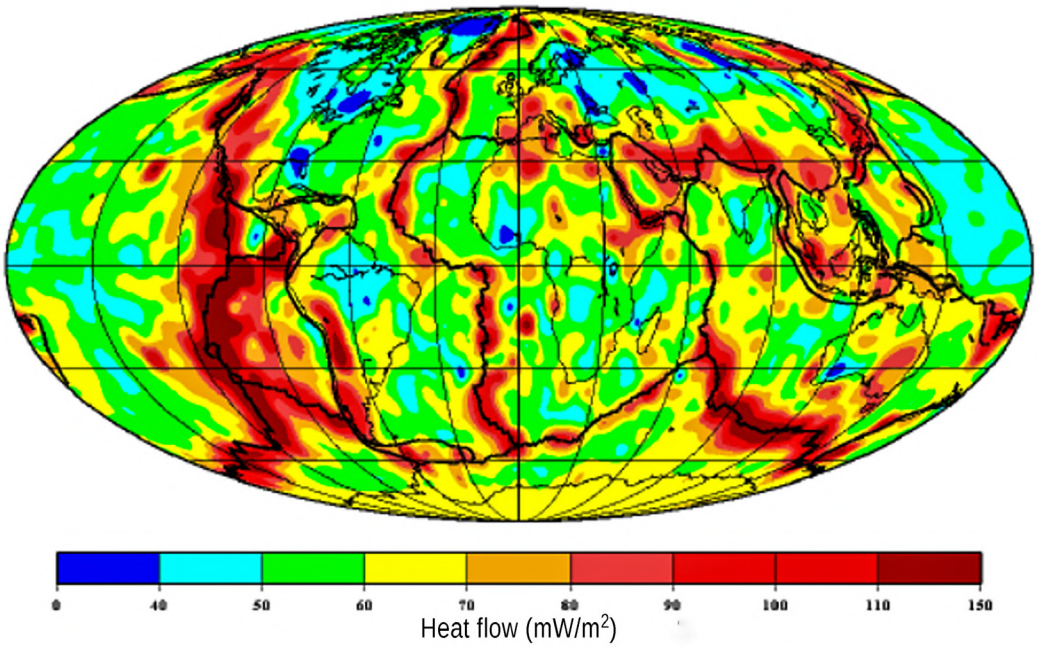


Рисунок 130. Глобальное распределение теплового потока.
Иллюстрация из статьи: Vieira F., Hamza V. M. Global Heat Flow: New Estimates Using Digital Maps and GIS Techniques // International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics. 2018. Vol. 1, n. 1. pp. 6–13.

[334]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
[335]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
[336]World Energy Council. World Energy Resources: Solar 2013. (2013) https://www.worldenergy.org/publications (Дата доступа 10.05.2025).
[337]Хуторской, М. Д., & Поляк, Б. Г. (2014). Отражение контрастных геодинамических обстановок в тепловом поле. Георесурсы, (2), 24–43.

Геотермальный тепловой поток — это количество тепловой энергии, поступающей из недр Земли через единицу площади поверхности за единицу времени, измеряемое в милливаттах на квадратный метр (мВт/м²).

В то время как средняя энергия геотермального потока для континентов составляет 40–60 мВт/м², а для океанического дна — около 100 мВт/м², в некоторых регионах регистрируются значения, в несколько раз превышающие эти показатели. Наиболее экстремальные значения геотермального теплового потока обнаружены в тектонически и вулканически активных зонах: например, в зонах срединно-океанических хребтов и активных рифтовых зонах поток может превышать 200–1 000 мВт/м² [338].

Особенно высокий тепловой потом отмечается в зонах гидротермальных полей — это зоны выхода горячих флюидов на дно океана, где температура воды достигает 350–400 °C. Эти системы формируют уникальные экосистемы и обеспечивают локальные аномалии теплового потока, существенно влияя на тепловой режим придонных вод.

Основной хорошо-изученной зоной повышенного геотермального теплового потока на дне океана являются срединно-океанические хребты — это зоны раздвижения литосферных плит, где происходит активное формирование новой океанической коры. Эта глобальная система подводных хребтов имеет общую протяжённость около 60 000 км[339], опоясывая весь земной шар подобно швам на бейсбольном мяче. Срединно-океанические хребты характеризуются высокой концентрацией гидротермальных источников, подводных вулканов и активных разломов, через которые в океан поступает значительное количество тепловой энергии из мантии Земли[340].

Тепловой поток в этих зонах в 10-100 раз превышает средние показатели для остальной части океанического дна[330], что делает их ключевыми участками теплообмена между внутренними слоями Земли и Мировым океаном.

Профессор университета Мэриленд Артур Витерито установил рост количества землетрясений на дне океана по срединно-океаническим хребтам с 1995 года (рис. 131) [341]. С коэффициентом корреляции 0,7 этот рост соответствует росту глобальных температур. При этом рост температуры увеличивается с отставанием на два года после нарастания сейсмической активности. Увеличение сейсмической активности в этих зонах связано с подъёмом магмы, формирующей новую океаническую кору.

---

[338]Поляк Б. Г., & Хуторской М. Д. (2018). Тепловой поток из недр — индикатор глубинных процессов. Георесурсы, 20(4), Ч. 2, 366–376. https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376

[339]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

[340]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).

[330]Argo Program. 'Mission'. (n.d.) https://argo.ucsd.edu/about/mission/ (Дата доступа 10.05.2025).

[341]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

Увеличение числа землетрясений на дне океана вдоль срединно-океанических хребтов

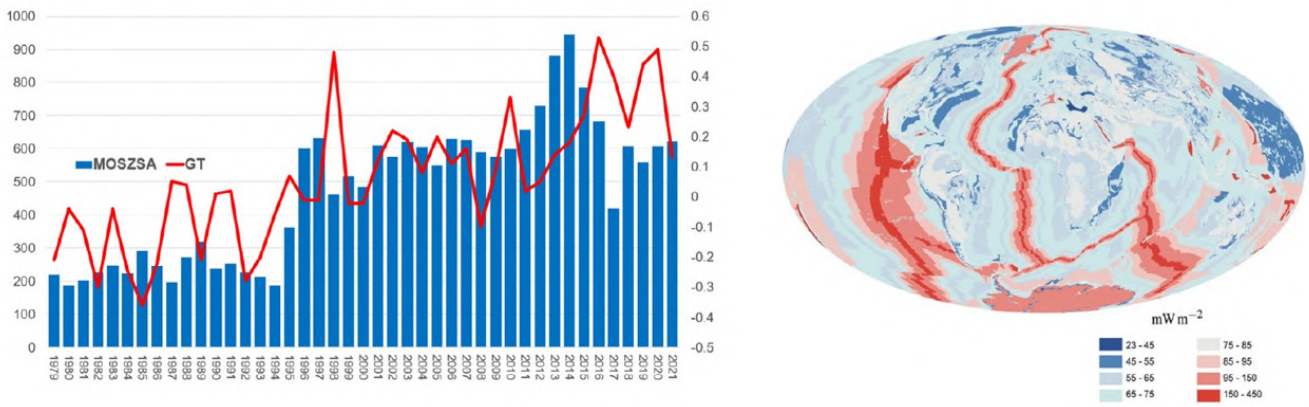


Рисунок 131. Одновременный рост числа землетрясений с магнитудами 4,0–6,0 на дне океана и глобальных температур атмосферы.

Источник: 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

Хотя прямые измерения объёмов поднимающейся магмы отсутствуют, глобальная сеть сейсмического мониторинга позволяет судить о масштабах этих процессов косвенно — по числу и интенсивности сейсмических событий, которые увеличиваются независимо от количества сейсмических данных. Согласно гипотезе Витерито, сейсмическая и вулканическая активность вдоль срединно-океанических хребтов приводит к увеличению темпов гидротермальных выбросов и нагреву вод, что в свою очередь приводит к выбросам парниковых газов и нагреву атмосферы. Таким образом, Витерито показывает: океаны нагреваются не только сверху, но и снизу — из-за геологических процессов.

Подводный вулканизм также может играть важную роль в формировании теплового режима океанического дна. Современные данные свидетельствуют, что около 75 % всех вулканических извержений Земли происходят под водой[342]. Ранее считалось, что подводные извержения происходят со спокойным излиянием лавы и взрывные извержения невозможны из-за давления столба воды. И поэтому предполагалось, что подводные вулканы не могут нагревать толщу воды — вытекающая лава почти сразу застывает. Но недавние исследования изменили понимание механизма извержений подводных вулканов.

Давление магмы составляет 10 000 – 30 000 бар, а давление столба воды в самых глубоких частях океана составляет всего 1 000 бар.

При прорыве магмы происходит мгновенное вскипание воды с распадом молекул H_2O, формируя газо-водяную полость с давлением в сотни или тысячи бар[343], что приводит к мощным взрывным извержениям.

[342]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
[343]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

Такие извержения сопровождаются выбросом тефры и гидротерм — гигантских струй перегретой воды, объём которых может достигать эквивалента 40 миллионов олимпийских бассейнов. Такие выбросы могут нарушать тепловое равновесие океана не только локально, но и на глобальном уровне.

Исследования Лидского университета выявили километровые поля вулканической тефры на дне Тихого океана[344], что подтверждает мощные взрывные подводные извержения. Одно такое извержение может выделять тепловую мощность порядка 1 ТВт, что вдвое превышает энергопотребление США.

Вклад взрывных извержений в нагрев океана подтверждает профессор Бернд Зимановски из Университета Юлиуса Максимилиана в Баварии[345]:

«При подводных извержениях лавы тепло от лавы к воде передаётся довольно долго. Однако при взрывных извержениях магма распадается на крошечные частицы. Это может создавать настолько сильные тепловые импульсы, что тепловые равновесные токи в океанах нарушаются локально или даже глобально».

По современным оценкам, количество гидротермально активных подводных образований составляет от 100 тыс. до 10 млн [346,347], что говорит о том, что, вероятно, вклад гидротермальной активности в тепловой баланс океана недоучтён. Взрывные извержения магмы приводят к формированию мощных тепловых импульсов, способных нарушать тепловые токи в океанах локально. Однако, учитывая размеры океана, даже таких сильных подводных извержений недостаточно, чтобы его нагреть. Вулканы располагаются не повсеместно, и их извержения эпизодичны, а их энергии недостаточно для нагрева всего океана. Однако её может быть достаточно, чтобы вызвать локальные волны тепла в океане.

Частным примером таких локальных тепловых аномалий являются морские волны тепла, то есть локально длительно нагретая вода в океане. Ещё одно их название — блобы. Это гигантские области поверхностной воды с аномально высокими температурами. С 1995 года количество блобов значительно возросло[348], и они стали чаще появляться в разных частях Мирового океана, в том числе у берегов Новой Зеландии, Юго-Западной Африки и в южной части Индийского океана.

---

[344]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

[345]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

[346]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

[347]Science News Explores. Seafloor hosts surprising number of deep-sea vents. (2016) https://www.snexplores.org/article/seafloor-hosts-surprising-number-deep-sea-vents (Дата доступа 10.05.2025).

[348]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

Один из самых известных и масштабных блобов сформировался в заливе Аляска в 2013 году и быстро распространился по Тихому океану. Его площадь составила более 4 млн км^2 (что превышает площадь Индии), а температура воды в некоторых местах превысила среднюю на 5-6 °C (рис. 132). Блоб перемещался по океану от Аляски до Мексики в течение трёх лет, до 2016 года. Это явление негативно повлияло на морскую экосистему и климат в регионе.

Причиной возникновения блоба, вероятнее всего, являлся активный вулканизм у побережья Аляски и магматический плюм Кобб[349], которые нагрели воду на дне океана, и она всплыла на поверхность в таком огромном объёме.

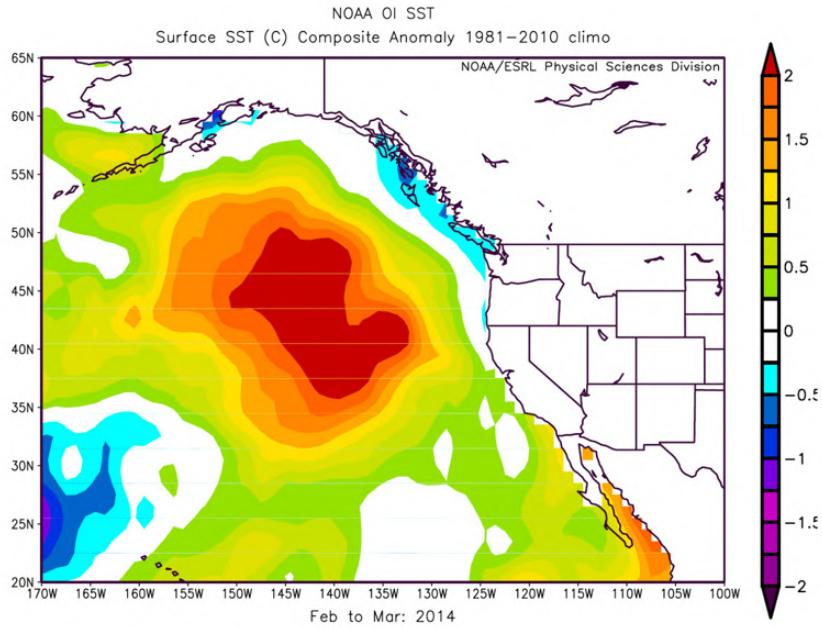


Рисунок 132. Карта, показывающая, как аномалия температуры поверхности моря (SST) переместилась и распространилась вдоль западного побережья США к марту 2015 года. (Изображение предоставлено Отделом естественных наук NOAA/ESRL в Боулдере, штат Колорадо)

К востоку от Новой Зеландии, в южной части Тихого океана, в декабре 2019 года появился блоб, температура которого в определённые дни была на 6 °C выше по сравнению со средними значениями. Блоб имел площадь более 1 000 000 км^2, что эквивалентно 1,5 площади Техаса или 4 площадям Новой Зеландии (рис. 133). Как сообщалось, в то время это был самый большой блоб в Мировом океане. Более того, эта капля стала вторым по величине событием за всю историю наблюдений в этом регионе.

[349]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

Джеймс Ренвик, профессор кафедры географии, экологии и наук о Земле в Университете Виктории в Веллингтоне, отметил:

«Это самая большая зона аномального потепления на планете. Обычно температура воды там около 15 °C, а сейчас — около 20 °C»[350].

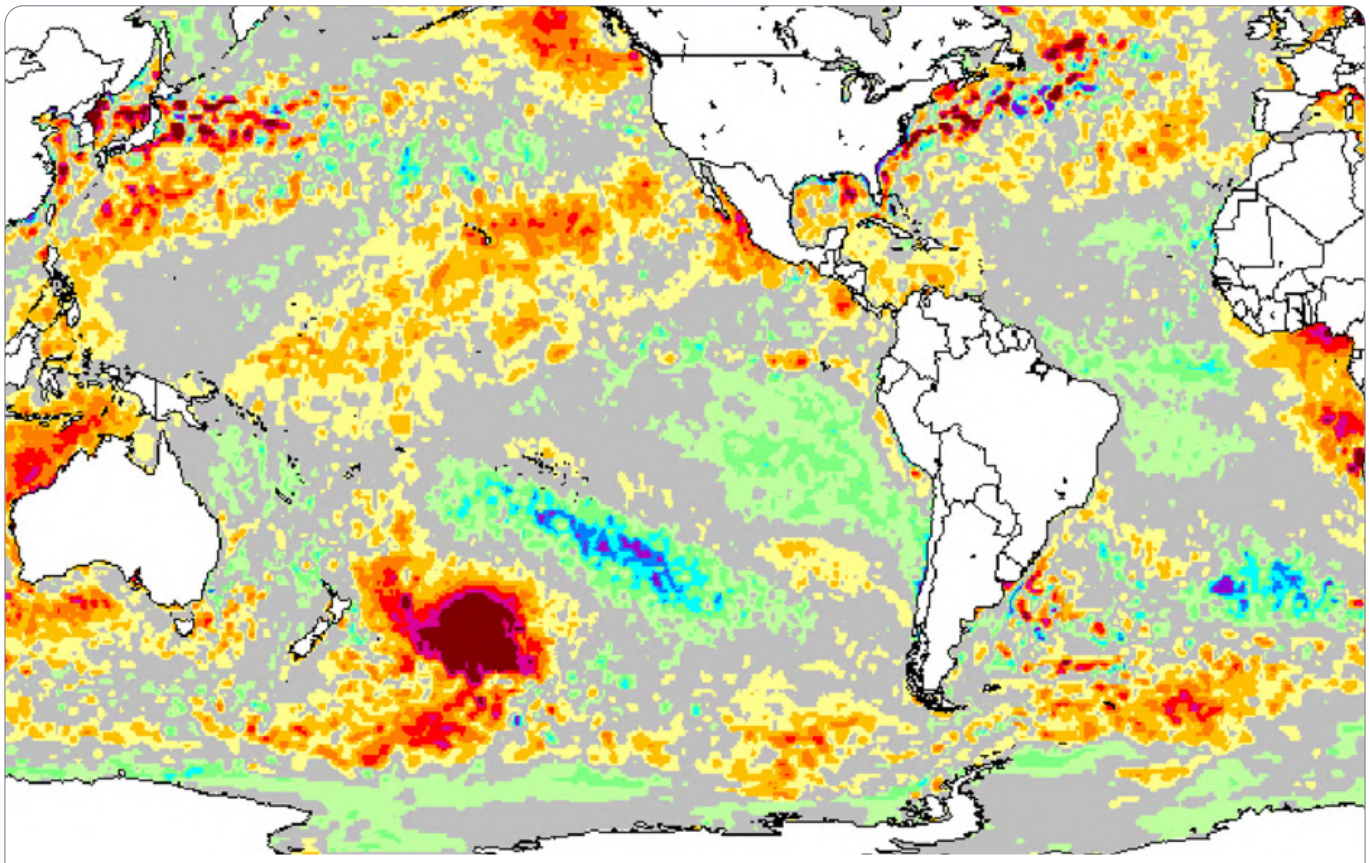


Рисунок 133. Аномалия температуры поверхности моря в южной части Тихого океана 25 декабря 2019 года.

Источник: 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 11 May 2025)

Вероятной причиной формирования этого блоба явилась активность древнего вулканического плато у побережья Новой Зеландии[351].

[350]The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019) https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists (Дата доступа 10.05.2025).

[351]Gase, A. et al. Subducting volcaniclastic-rich upper crust supplies fluids for shallow megathrust and slow slip. Sci. Adv. 9, eadh0150 (2023). https://doi.org/10.1126/sciadv.adh0150

Ещё одним частным примером влияния геотермального тепла на повышение температуры океанических вод за счёт магматических процессов являются аномалии нагрева в Арктических морях вдоль побережья Сибири. Согласно исследованиям 2022 года, Сибирская Арктика нагревается почти в четыре раза быстрее, чем земной шар, что является более высоким соотношением, чем ранее учитывалось в климатических моделях, и оказалось крайне неожиданным для учёных[352] (рис. 134).

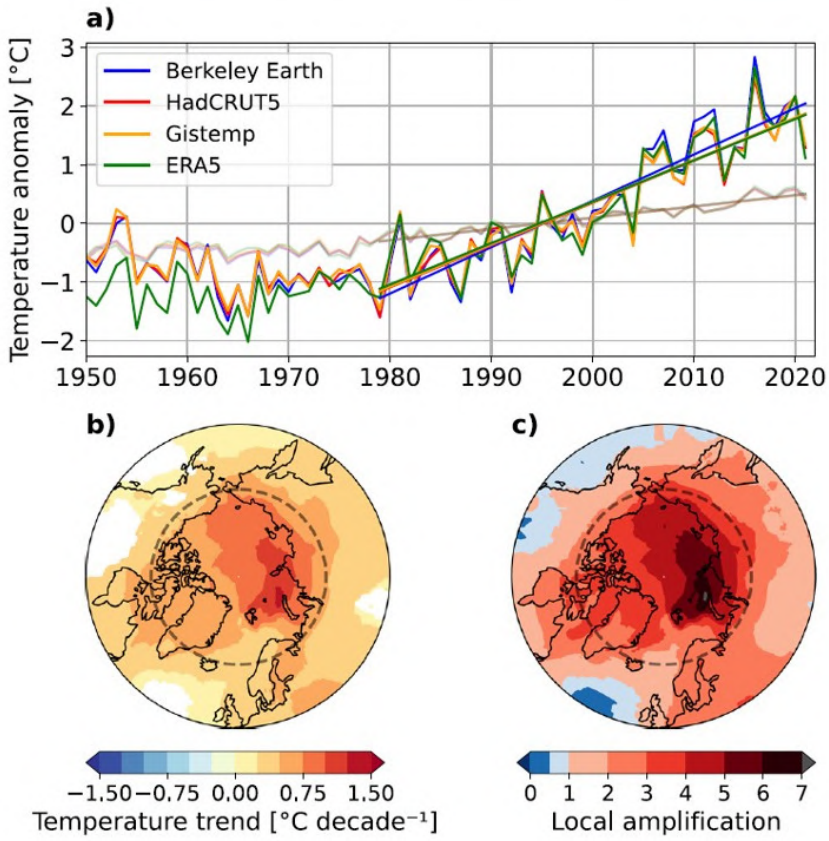


Рисунок 134. Эволюция среднегодовой температуры в Арктике. (a) Среднегодовые температурные аномалии в Арктике 66.5°–90° с. ш. (тёмные цвета) и в глобальном масштабе (светлые цвета) за период 1950–2021, полученные из различных наблюдательных наборов данных. Температурные аномалии рассчитаны относительно стандартного 30-летнего периода 1981–2010. Пунктирная линия на графиках (b) и (c) обозначает Северный полярный круг (широта 66,5° с. ш.).

Источник: Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. Commun Earth Environ 3, 168 (2022). https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3

Именно в данном регионе мира, в районе полуострова Таймыр, происходит активизация Сибирского магматического плюма, который стремительно поднимается сейчас в том регионе, где 250 миллионов лет назад произошло излияние Сибирских траппов. И всё указывает на то, что голова плюма в настоящее время активно размывает Восточно-Сибирский кратон и магма растекается под всей его площадью (рис. 135). Согласно предварительным оценкам, область растекания потоков магмы под Сибирью может достигать 2 500–3 000 км в диаметре, что сравнимо с площадью Австралии.

[352]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

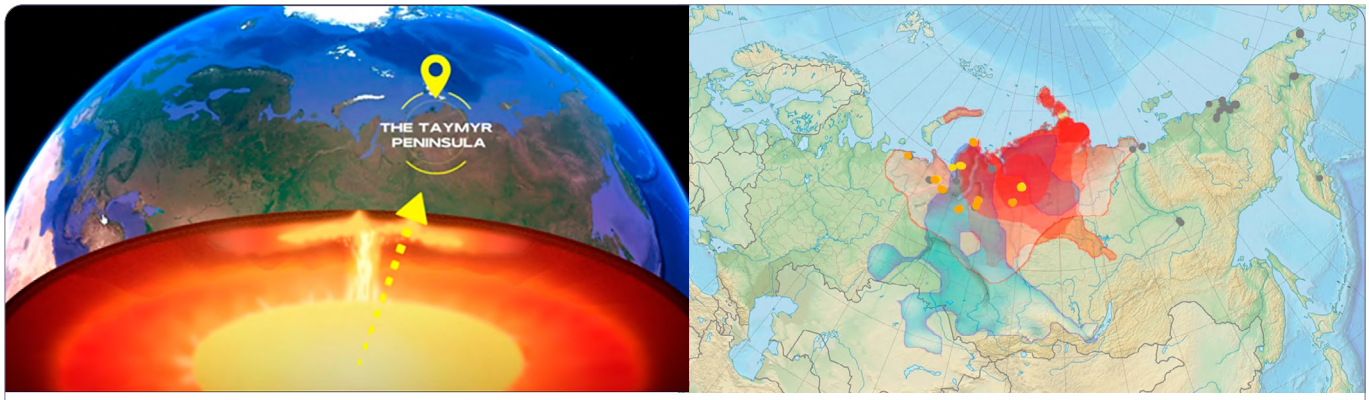


Рисунок 135. Локализация местоположения плюма по результатам различных исследований

Важно отметить, что столь интенсивное потепление Арктических морей происходит именно в области полуострова Таймыр. Такую аномалию именно в акватериальной зоне Сибири можно объяснить тем, что океаническая кора более тонкая и быстрее проводит тепло, а вода обладает большей теплоёмкостью, чем атмосфера. Поэтому именно океаническая вода интенсивно накапливает и задерживает тепло от поднимающегося магматического плюма, несмотря на то, что его подъём плюма происходит под континентальной корой в относительном удалении от побережья.

Более подробно ознакомиться с информацией о Сибирском магматическом плюме и его влиянии на климатическую систему, а также угрозах, которые несёт в себе данная геологическая структура, и путях решения можно в докладе

«ОБ УГРОЗЕ ПРОРЫВА МАГМАТИЧЕСКОГО ПЛЮМА В СИБИРИ И ПУТЯХ РЕШЕНИЯ ДАННОЙ ПРОБЛЕМЫ»

Совокупность всех этих данных свидетельствует о том, что геологические процессы на дне океана представляют собой существенный фактор глобального потепления. Увеличение сейсмической и вулканической активности на дне океана коррелирует с ростом глобальных температур, что указывает на возможную причинно-следственную связь. Подводные извержения, особенно взрывного характера, способны создавать мощные тепловые импульсы, нарушающие локальный и даже глобальный тепловой баланс.

Гидротермальные системы и вулканические процессы формируют крупномасштабные аномалии, такие как блобы, которые оказывают заметное влияние на океанические экосистемы и климат, а магматические процессы вызывают аномальное потепление Арктических морей. Таким образом, океан нагревается не только сверху, под влиянием атмосферы, но и снизу — за счёт динамичных процессов в земных недрах. Это требует пересмотра существующих климатических моделей и более глубокого изучения подводной геологической активности как важного компонента в общем тепловом балансе планеты.

Однако есть один вопрос, который имеет ключевое значение: почему в данный период времени происходит увеличение магматических и тектонических процессов на Земле?

Краткое описание геодинамической модели изменения климата на Земле в текущий период времени

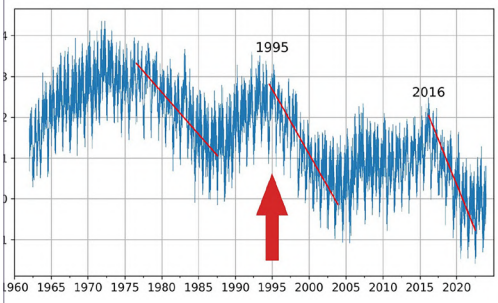
Последние 30 лет на Земле происходит беспрецедентное и синхронное нарастание не только изменений климата, но и аномалий во всех слоях планеты и её геофизических параметрах. Рост этих изменений происходит экспоненциально. Комплексный анализ научных данных показывает, что главной причиной этого являются астрономические циклы, которые повторяются каждые 12 000 лет.

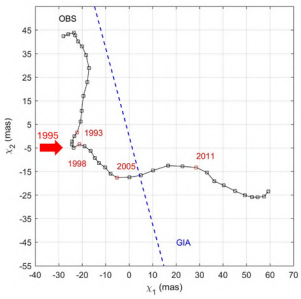
Гипотеза о влиянии космических факторов подтверждается аналогичными изменениями, которые одновременно с Землёй начали происходить и на других планетах Солнечной системы и их спутниках. Например, на Уране[353], Юпитере[354] и Венере[355] увеличивается скорость ветров и расширяются зоны ураганов. На Марсе наблюдается таяние ледяных шапок на полюсах[356], а вулканическая активность на Венере[357] и Марсе продолжает расти[358]. Кроме того, на Марсе, мёртвой планете, усиливаются землетрясения[355], что говорит о появлении аномальной активности в его недрах.

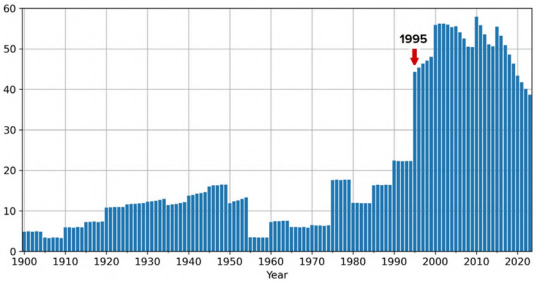
Критические изменения в системе Земли начали проявляться с 1995 года, когда были зафиксированы значительные геофизические аномалии, такие как резкое ускорение вращения Земли, смещение её оси и начало дрейфа северного магнитного полюса (рис. 136).

---

[353]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
[354]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
[355]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
[356]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
[357]Encrenaz, T. et al. HDO and SO2 thermal mapping on Venus - IV. Statistical analysis of the SO2 plumes. A&A 623, A70 (2019). https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833511
[358]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
[359]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







Внезапное и резкое ускорение вращения планеты, зафиксированное Центром ориентации Земли Парижской обсерватории.

Источник: IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory. Length of Day – Earth orientation parameters. https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plotname=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223

Аномальные изменения оси вращения Земли: резкое изменение направления её дрейфа и увеличение скорости движения в 17 раз.

Источник: 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.rg/10.1029/2020gl092114

Движение северного магнитного полюса, ранее смещавшегося со скоростью 10 км/год, внезапно ускорилось до 55 км/год и изменило траекторию в сторону полуострова Таймыр в Сибири.

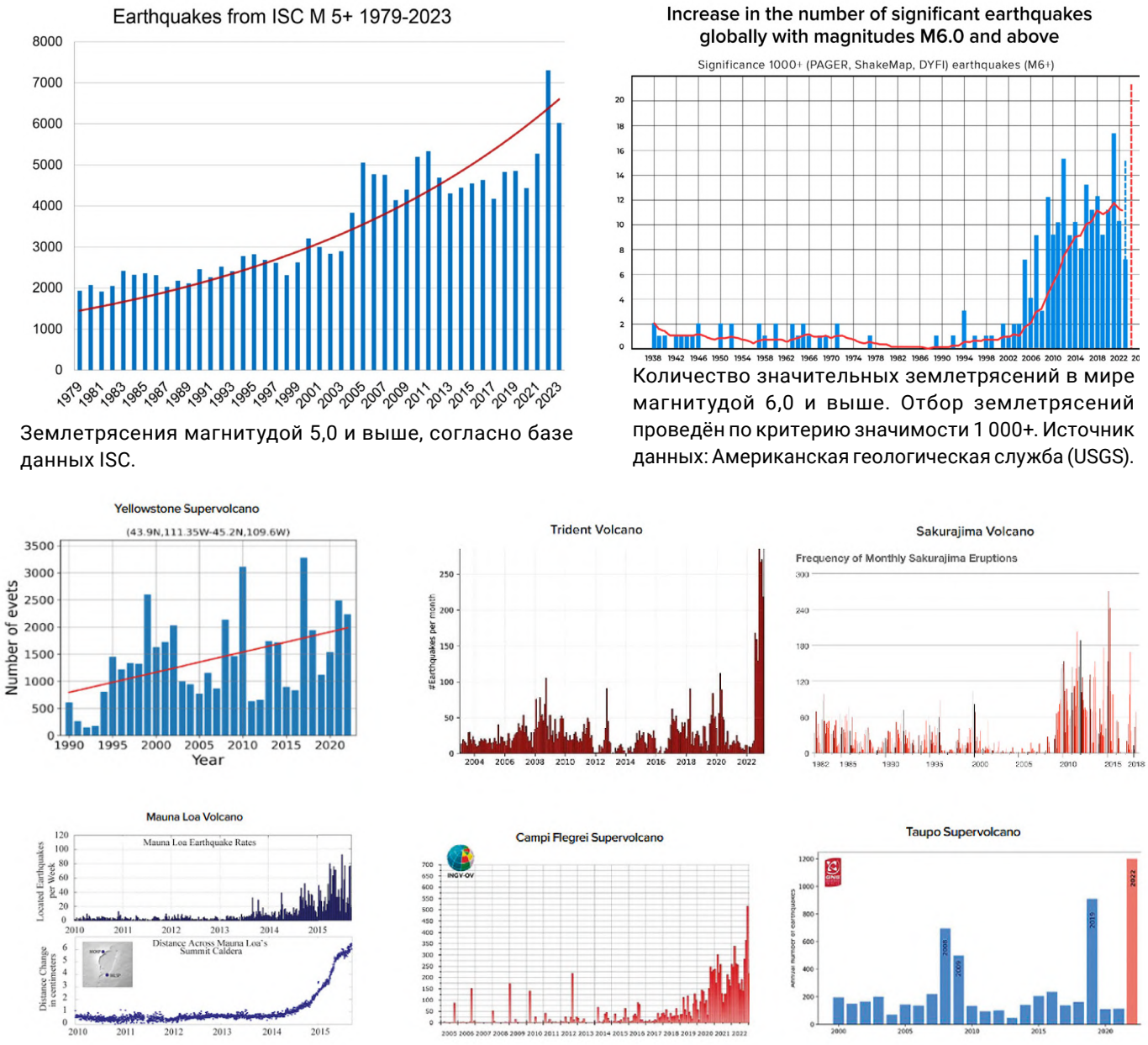
Источник: NOAA data on the position of the North Magnetic Pole https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/data/poles/NP.xy

Рисунок 136. Изменения геофизических параметров Земли в 1995 году

Эти аномалии указывают на глубокие изменения в ядре Земли, требующие в квадриллионы больше энергетических затрат, чем человечество произвело за всё время жизни цивилизации. Причиной является внешнее космическое воздействие, влияющее на земное ядро, как и на ядра других планет Солнечной системы. Это внешнее воздействие усиливает плавление мантии, что приводит к её подъёму ближе к поверхности. В результате запускается цепная реакция: усиливается вулканическая и сейсмическая активность, увеличивается нагрев из недр и рост природных катаклизмов по всему миру.

С 1995 года наблюдается заметный рост сейсмической активности, характеризующийся увеличением частоты, силы и энергии землетрясений. Эта тенденция заметна как на суше, так и в океанах, включая регионы, где ранее практически не фиксировалась сейсмическая активность. Всё это указывает на глобальный масштаб изменений. Важно отметить, что увеличение числа землетрясений магнитудой 5,0 и выше не связано с увеличением сети или чувствительности датчиков, а действительно отражает изменения в геодинамике Земли. По суммарным данным Международного сейсмологического центра, количество таких землетрясений за последние 25 лет существенно возросло и продолжает увеличиваться (рис. 137).

Кроме того, растёт сейсмическая активность вблизи вулканов, включая супервулканы, такие как Йеллоустон в США, Кампи Флегрей в Италии[360] и Таупо в Новой Зеландии[361], а также других вулканов, извержения которых происходили в предыдущие 12-тысячелетние циклы (рис. 137).



Землетрясения магнитудой 5,0 и выше, согласно базе данных ISC.

Количество значительных землетрясений в мире магнитудой 6,0 и выше. Отбор землетрясений проведён по критерию значимости 1 000+. Источник данных: Американская геологическая служба (USGS).

Рисунок 137. Рост сейсмической активности в общем по планете и вблизи вулканов и супервулканов.

Всё больше дней в году фиксируются извержения вулканов, причём выбрасываемая лава часто обладает аномальными свойствами: она перегрета и имеет необычный химический состав, характерный для магмы, поступающей из глубоких слоёв мантии.

[360]Fanpage.it. At Campi Flegrei 675 earthquakes in April 2023: it is the month with the most tremors in the last 20 years. (2023) https://www.fanpage.it/napoli/campi-flegrei-675-terremoti-aprile-2023 (Дата доступа 01.05.2025).
[361]GeoNet. Strong M5.6 earthquake consistent with continued minor volcanic unrest at Taupō. Volcanic Alert Level remains at Level 1. (2022) https://www.geonet.org.nz/vabs/7tu66lDztDnlaYDG0LYSgl (Дата доступа 01.05.2025).

Особую озабоченность вызывает увеличение числа глубокофокусных землетрясений, происходящих на глубинах более 300 км, иногда доходящих до 750 км под поверхностью Земли. Эти явления возникают не в земной коре, а в мантии, где материал мантии не разрушается, а деформируется, словно пластилин, что делает природу таких землетрясений необычной. Так как эти землетрясения происходят в условиях экстремального давления и высоких температур, можно сделать вывод, что эти мощные взрывы в мантии, сопоставимы по энергии с одновременным детонированием множества атомных бомб внутри мантии Земли.

Кроме того, глубокофокусные землетрясения часто инициируют мощные сейсмические толчки в земной коре, усиливая их разрушительное воздействие. С 1995 года наблюдается стремительный рост числа таких глубинных землетрясений (рис. 138), что совпадает с другими геодинамическими аномалиями, начавшимися в тот же период. Рост количества этих внутримантийных взрывов указывает на увеличение энергии в глубинах планеты и интенсивное плавление мантии, что может привести к масштабным извержениям вулканов.

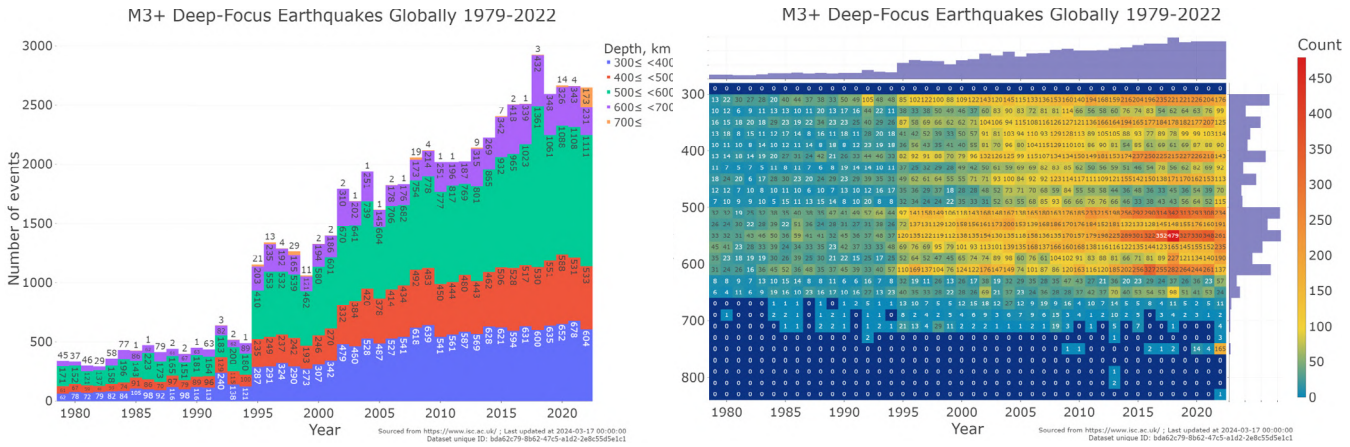


Рисунок 138. Рост числа глубокофокусных землетрясений на глубине свыше 300 км
Источник данных: база данных ISC

Под воздействием центробежных сил расплавленная магма в мантии с 1995 года начала активно подниматься к поверхности Земли, размывая и усиливая нагрев литосферы изнутри больше чем обычно. Этот подъём магмы приводит к увеличению геотермального потока из недр планеты и активирует магматические плюмы под ледниками Западной Антарктиды, Центральной Гренландии и Сибири. В результате ледники и вечная мерзлота начинают ускоренно таять снизу вверх[362, 363, 364].

Таким образом, причинами нагрева океана является поднимающаяся магма, которая особенно сильно нагревает океаническую кору, которая тоньше и уязвимее по сравнению с континентальной. Исторические данные из геологических и ледяных кернов свидетельствуют

[362]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

[363]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

[364]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

о том, что Земля сталкивалась с подобными катастрофическими циклами каждые 12 000 лет. Каждый второй цикл, то есть каждые 24 000 лет, планетарные катастрофы имеют более разрушительный характер (рис. 139).

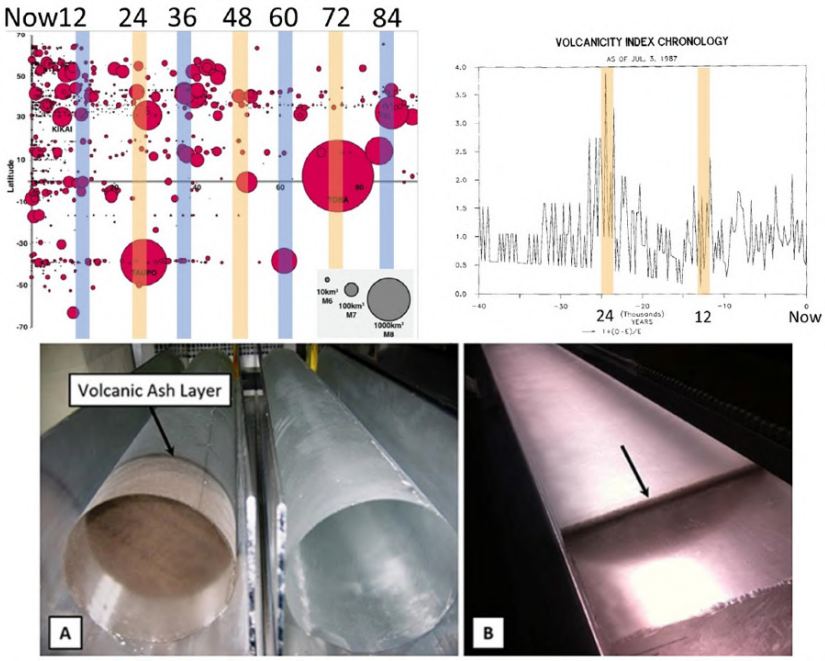


Рисунок 139. Графики иллюстрируют катастрофическую вулканическую активность, происходящую каждые 12 000 лет, и ещё более интенсивные события каждые 24 000 лет.

Источник: 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
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

Как раз в такой цикл входит сейчас Земля. Однако в этот раз из-за антропогенного загрязнения океана микро- и нанопластиком усилился тепловой дисбаланс в мантии, что приводит к увеличению числа глубокофокусных землетрясений, образованию новых магматических очагов и общей нестабильности планеты. Именно поэтому катаклизмы сейчас нарастают гораздо быстрее и сильнее, чем в предыдущих циклах. Фактически загрязнение океана стало главной причиной того, что Земля может не справиться с этим циклом. Важно понимать, что решение вопроса с загрязнением океана микро- и нанопластиком может замедлить развитие катаклизмов, но не остановит их.

Более подробно ознакомиться с информацией о геодинамической активизации недр Земли в данный период времени, цикле катаклизмов 12 000 лет и путях решения данной проблемы, можно в докладе

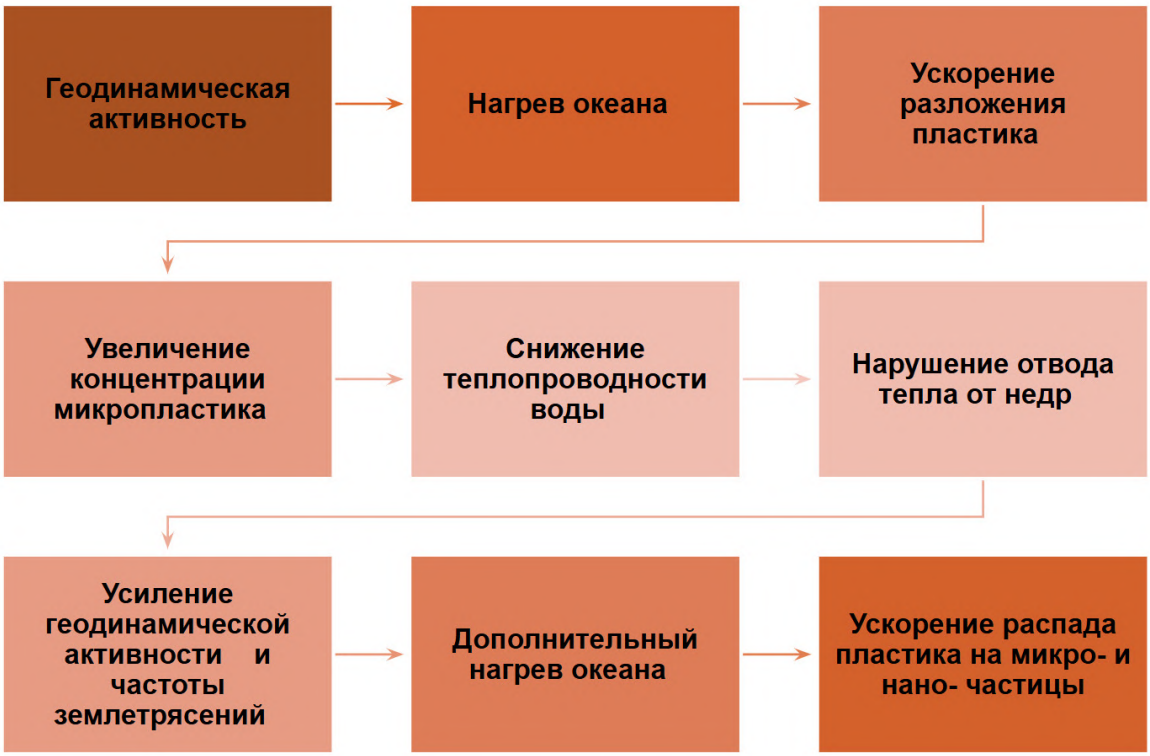
«О ПРОГРЕССИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ КАТАКЛИЗМОВ НА ЗЕМЛЕ И ИХ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЯХ»

Как показали многолетние междисциплинарные исследования геодинамических изменений в цикл 12 000 лет, причиной первичного нагрева океана является поднимающаяся магма, которая особенно сильно воздействует на океаническую кору, более тонкую и уязвимую по сравнению с континентальной. Загрязнение Мирового океана пластиком и накопление частиц микро- и нанопластика становится критическим фактором, изменяющим теплофизические свойства океана. Присутствие этих синтетических частиц в океанической воде существенно снижает её способность проводить тепло, что нарушает естественные процессы теплообмена между глубинными слоями океана и поверхностью, но что ещё более критично — нарушает отвод тепла от литосферных плит. В условиях цикла увеличения геодинамической активности во время цикла 12 000 лет критическое изменение теплопроводной функции океанической воды увеличивает не только нагрев океана и атмосферы, но и нагрев в недрах. Это приводит к увеличению плавления мантии и, как следствие, ещё более сильной геодинамической активности.

Это вызывает накопление избыточной энергии в недрах Земли, приводя к увеличению числа глубокофокусных землетрясений и ускоренному формированию новых магматических очагов. В свою очередь, эти процессы ещё больше усугубляют нестабильность планеты и ускоряют нагрев океана.

Формируется опасный замкнутый цикл:

геодинамическая активность нагревает океан → нагрев ускоряет разложение пластика → увеличение концентрации микропластика снижает теплопроводность воды → нарушается отвод тепла от недр → усиливается геодинамическая активность и частота землетрясений → ещё больше нагревается океан и тем ещё больше ускоряется процесс распада пластика на микро- и наночастицы.



Это приводит к росту частоты и силы экстремальных погодных явлений и природных катаклизмов, таких как наводнения, ураганы и тропические циклоны, которые сегодня достигают беспрецедентной интенсивности.

Таким образом, загрязнение океана микро- и нанопластиком не только наносит значительный ущерб здоровью человека, экосистемам, биосфере и климатической системе, но также способствует усилению нагрева океана. Кроме того, это усугубляет и без того разрушительные катастрофы 24 000-летнего цикла, в который сейчас вступила Земля. Это создаёт беспрецедентные риски не только для выживания человечества, но и самой планеты Земля.

Решение глобального экологического, климатического и геодинамического кризиса требует международного сотрудничества учёных различных дисциплин для срочной разработки и реализации комплексных мер. Эти решения должны включать не только очистку океана от микро- и нанопластика и снижение их негативного воздействия на здоровье человека, но и разработку фундаментальных решений для устранения геодинамических угроз. Ознакомиться с предложенными решениями можно в соответствующих докладах:

ДОКЛАД

«О ПРОГРЕССИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ КАТАКЛИЗМОВ НА ЗЕМЛЕ И ИХ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЯХ»

ДОКЛАД

«ОБ УГРОЗЕ ПРОРЫВА МАГМАТИЧЕСКОГО ПЛЮМА В СИБИРИ И ПУТЯХ РЕШЕНИЯ ДАННОЙ ПРОБЛЕМЫ»

ВЫВОДЫ. НАНОПЛАСТИК — ВЫЗОВ, КОТОРЫЙ НЕЛЬЗЯ ИГНОРИРОВАТЬ

Проблема пластикового загрязнения, особенно в формах микро- и нанопластика, вышла за рамки локальных экологических последствий и приобрела характер многоаспектной глобальной угрозы. Современные исследования подтверждают как прямое, так и опосредованное влияние МНП на климатическую систему, устойчивость экосистем и здоровье человека. Частицы микропластика способны проникать в живые организмы, вызывать воспалительные реакции, нарушать гормональный баланс, функции иммунной и репродуктивной систем, а также изменять физико-химические свойства окружающей среды — от морской воды до атмосферы.

Более 10 лет назад представители международного научного сообщества «АЛЛАТРА» выдвинули предположение о возрастающем влиянии пластикового загрязнения на климатические аномалии и обострение проблем общественного здоровья. Сегодня эти гипотезы находят подтверждение в независимых исследованиях, проведённых ведущими научными учреждениями. Быстрое накопление данных об экологических и биологических эффектах МНП открывает новые горизонты анализа, включая трансформацию климатических паттернов, изменения в гидросфере и нарастание системных рисков для устойчивого развития. Особую тревогу вызывает то, что даже микроскопические концентрации нанопластика могут запускать каскадные эффекты в биосфере и климате. Пластик перестал быть просто твёрдым мусором — он становится активным агентом трансформации среды обитания и человеческого организма. Последствия его распространения проявляются уже сейчас. Проблема МНП затрагивает не только экологию и медицину, но также требует осмысления в контексте национальной безопасности, макроэкономики и международных отношений.

В рамках стратегии противодействия данной угрозе Движение «АЛЛАТРА» предложило два ключевых направления, обладающие как прикладным, так и прогностическим потенциалом. Первым из них является масштабное внедрение технологий атмосферной генерации воды (АГВ), которые способны одновременно решать проблему дефицита пресной воды и вносить вклад в очистку атмосферы и океанов от микропластиковых частиц. Однако реализация АГВ-технологий требует учёта возможных рисков — в частности, повышения концентрации МНП в воздухе и, как следствие, усиления ингаляционного воздействия на человека. Это диктует необходимость параллельной разработки высокоэффективных фильтрационных и защитных систем.

Вторым стратегическим направлением, также предложенным «АЛЛАТРА», является разработка методов нейтрализации или экранирования электростатического заряда нанопластика — одного из главных факторов его токсичности. Заряженные частицы нанопластика активно взаимодействуют с клеточными мембранами, белками и генетическим материалом, формируя устойчивые молекулярные связи. Такие частицы проникают через

биологические барьеры, включая гематоэнцефалический, накапливаются в тканях и инициируют каскад клеточных нарушений — от окислительного стресса до апоптоза. Снижение электростатической активности микро- и нанопластика может значительно уменьшить его вредоносность и замедлить накопление в организме.

По оценкам авторов доклада, экранирование или нейтрализация электростатического заряда способно снизить потенциальную опасность МНП как минимум на 50 %, что делает данное направление исследований критически важным. Это создаст необходимый временной зазор для разработки более комплексных стратегий диагностики, профилактики и выведения МНП из человеческого организма и очищения биосферы. В этом контексте особую значимость приобретают исследования в сферах биофизики, нанотехнологий и молекулярной токсикологии.

Таким образом, эффективное реагирование на угрозу МНП требует не точечных мер, а глобального и междисциплинарного подхода. Необходима координация усилий в сфере научных исследований, технологических решений, нормативного регулирования и международной кооперации. Пластиковое загрязнение следует рассматривать не как узкую экологическую проблему, а как системный вызов, затрагивающий здоровье, безопасность, ресурсную обеспеченность и устойчивость социальной инфраструктуры.

Уникальность настоящего доклада заключается в комплексном междисциплинарном подходе, объединяющем данные из физики, химии, биологии, медицины. Такой синтез позволяет рассматривать проблему МНП как цивилизационный вызов, требующий решений на множественных уровнях. В настоящее время мировое сообщество постепенно осознаёт истинные масштабы данной угрозы. Несмотря на отсутствие универсального решения, именно стремление к его поиску и развитие научного сотрудничества могут определить путь к преодолению кризиса. Главный вызов — не в отсутствии решения, а в способности обнаружить его до наступления критической точки.

Список литературы

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

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

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

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

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

AllatRa TV. Anthropogenic factor in the oceans' demise: Popular science film. Time 55:00, (2025). https://allatra.tv/en/video/anthropogenic-factor-in-the-oceans-demise-popular-science-film (Дата доступа 01.05.2025).

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

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

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

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

American College of Cardiology. New evidence links microplastics with chronic disease. (2025) https://www.acc.org/About-ACC/Press-Releases/2025/03/25/10/19/New-Evidence-Links-Microplastics-with-Chronic-Disease (Дата доступа 01.05.2025).

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

Argo Program. 'Mission'. (n.d.) https://argo.ucsd.edu/about/mission/ (Дата доступа 10.05.2025).

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

Ask a Scientist Blog. If molecules in colder things get denser, why does ice float? WordPress. https://askascientistblog.wordpress.com/2015/11/04/if-molecules-in-colder-things-get-denser-why-does-ice-float (Дата доступа 01.05.2025).

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

Auta, H. S., Emenike, C. U., Jayanthi, B. & Fauziah, S. H. Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by Bacillus sp. and Rhodococcus sp. isolated from mangrove sediment. Marine Pollution Bulletin 127, 15–21 (2018). https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.036

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

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

Aykut, B., Pushalkar, S., Chen, R. et al. The fungal mycobiome promotes pancreatic oncogenesis via activation of MBL. Nature 574, 264–267 (2019). https://doi.org/10.1038/s41586-019-1608-2

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

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

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

Baker, E. T. & German, C. R. On the Global Distribution of Hydrothermal Vent Fields. in Mid-Ocean Ridges: Hydrothermal Interactions Between the Lithosphere and Oceans (eds German, C. R., Lin, J. & Parson, L. M.) 245–266 (American Geophysical Union, 2004).

Baker, E. T. et al. How many vent fields? New estimates of vent field populations on ocean ridges from precise mapping of hydrothermal discharge locations. Earth Planet. Sci. Lett. 449, 186–196 (2016). https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.05.031

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

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

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

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

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

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

Behrenfeld et al. 2009 Роберта Симмона https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton (Дата доступа 01.05.2025).

Bell, Katherine L. C., et al. "How Little We've Seen: A Visual Coverage Estimate of the Deep Seafloor." Science Advances, vol. 11, no. 19, 2025, eadp8602. https://doi.org/10.1126/sciadv.adp8602.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Broquet, A. & Andrews-Hanna, J. C. Geophysical evidence for an active mantle plume underneath Elysium Planitia on Mars. Nat Astron (2022). https://doi.org/10.1038/s41550-022-01836-3

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

Brown, S. K., 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://do i.org/10.1007/bf00868307

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

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

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

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

Chadwick, J., Keller, R., Kamenov, G., Yogodzinski, G. & Lupton, J. The Cobb hot spot: HIMU-DMM mixing and melting controlled by a progressively thinning lithospheric lid. Geochem. Geophys. Geosyst. 15, 3107–3122 (2014). https://doi.org/10.1002/2014gc005334

Chen, M. J., Karaviti, L. P., Roth, D. R. & Schlomer, B. J. Birth prevalence of hypospadias and hypospadias risk factors in newborn males in the United States from 1997 to 2012. Journal of Pediatric Urology 14, 425.e1-425.e7 (2018). https://doi.org/10.1016/j.jpurol.2018.08.024

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

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

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

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

China Environment News. Microplastics "secretly attack" the human body, how much damage can they cause? (2025) https://cenews.com.cn/news.html?aid=1205048 (Дата доступа 01.05.2025).

Climate.gov. 'The role of the ocean in tempering global warming'. (2014) https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/role-ocean-tempering-global-warming (Дата доступа 10.05.2025).

ClimateReanalyzer.org, Climate Change Institute, University of Maine, Dataset. NOAA OISST. https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=world2 (Дата доступа 01.05.2025).

Columbia Climate School. 'Is Global Heating Hiding Out in the Oceans?'. (2013) https://www.earth.columbia.edu/articles/view/3130 (Дата доступа 10.05.2025).

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

Crisp, J. A. Rates of magma emplacement and volcanic output. J. Volc. Geotherm. Res. 20, 177–211 (1984). https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90039-8

Da Costa Filho, P. A. et al. Detection and characterization of small-sized microplastics (≥ 5 μm) 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

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/advs.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. Babies vs. Plastics Report. (2023) https://www.earthday.org/babies-vs-plastics-what-every-parent-should-know (Дата доступа 01.05.2025).

Encrenaz, T. et al. HDO and SO2 thermal mapping on Venus - IV. Statistical analysis of the SO2 plumes. A&A 623, A70 (2019). https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833511

Encyclopædia Britannica. Neuron. Britannica. (2025) https://www.britannica.com/science/neuron (Дата доступа 01.05.2025).

Enders, K., Lenz, R., Stedmon, C. A. & Nielsen, T. G. Abundance, size and polymer composition of marine microplastics ≥ 10 μm in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution. Marine Pollution Bulletin 100, 70–81 (2015). https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.027

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

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

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

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

European Severe Storms Laboratory. Hailstorms of 2024 https://www.essl.org/cms/hailstorms-of-2024 (Дата доступа 01.05.2025).

Fanpage.it. At Campi Flegrei 675 earthquakes in April 2023: it is the month with the most tremors in the last 20 years. (2023) https://www.fanpage.it/napoli/campi-flegrei-675-terremoti-aprile-2023 (Дата доступа 01.05.2025).

Federal Office of Public Health. Impact of pollution on embryonic development - Nanoparticles: Risk for babies in the womb. FOPH. (2024) https://www.bit.admin.ch/en/nsb?id=101285 (Дата доступа 01.05.2025).

Feldkamp, M. L. et al. Gastroschisis prevalence patterns in 27 surveillance programs from 24 countries, International Clearinghouse for Birth Defects Surveillance and Research, 1980–2017. Birth Defects Research 116, e2306 (2024). https://doi.org/10.1002/bdr2.2306

Fernando, B. et al. A Tectonic Origin for the Largest Marsquake Observed by InSight. Geophysical Research Letters 50, e2023GL103619 (2023). https://doi.org/10.1029/2023GL103619

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

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

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

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

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

Garbage Patches. Marine Debris Program. NOAAA https://marinedebris.noaa.gov/discover-marine-debris/garbage-patches (Дата доступа 01.05.2025)

Gase, A. et al. Subducting volcaniclastic-rich upper crust supplies fluids for shallow megathrust and slow slip. Sci. Adv. 9, eadh0150 (2023). https://doi.org/10.1126/sciadv.adh0150

GeoNet. Strong M5.6 earthquake consistent with continued minor volcanic unrest at Taupō. Volcanic Alert Level remains at Level 1. (2022) https://www.geonet.org.nz/vabs/7tu66lDztDnlaYDG0LYSgl (Дата доступа 01.05.2025).

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

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

Gigault, J. et al. Current opinion: What is a nanoplastic? Environmental Pollution 235, 1030–1034 (2018). https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024

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

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

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

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

Guo, X. et al. Discovery and analysis of microplastics in human bone marrow. Journal of Hazardous Materials 477, 135266 (2024). https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135266

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

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

Harrison, R. G. Atmospheric electricity and cloud microphysics https://cds.cern.ch/record/557170/files/p75.pdf (Дата доступа 01.05.2025).

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

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

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

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

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

Hofstede, L. T., Vasse, G. F. & Melgert, B. N. Microplastics: A threat for developing and repairing organs? Cambridge Prisms: Plastics 1, e19 (2023). https://doi.org/10.1017/plc.2023.19

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

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

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

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

IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory. Day length – Earth orientation parameters: https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plotname=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223 (Дата доступа 01.05.2025).

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

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

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

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

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

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

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

Jeong, B. et al. Maternal exposure to polystyrene nanoplastics causes brain abnormalities in progeny. Journal of Hazardous Materials 426, 127815 (2022). https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127815

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

Jochum, M. et al. Elevated Micro- and Nanoplastics Detected in Preterm Human Placentae. Preprint (2025). https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5903715/v1

Johnson, Gregory C., et al. "Argo-Two Decades: Global Oceanography, Revolutionized." Annual Review of Marine Science, vol. 14, 2022, pp. 379–403. https://doi.org/10.1146/annurev-marine-022521-102008.

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

Karim, A. et al. Interfacial Interactions between Nanoplastics and Biological Systems: toward an Atomic and Molecular Understanding of Plastics-Driven Biological Dyshomeostasis. ACS Appl. Mater. Interfaces 16, 25740–25756 (2024). https://doi.org/10.1021/acsami.4c03008

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

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

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

Khatuntsev, I. V. et al. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging. Icarus 226, 140–158 (2013). https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018

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

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

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

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

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

Kopp, G. & Lean, J. L. A New, Lower Value of Total Solar Irradiance: Evidence and Climate Significance. Geophysical Research Letters 38, L01706 (2011). https://doi.org/10.1029/2010GL045777

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

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

LaFemina, P. C. Plate Tectonics and Volcanism. in The Encyclopedia of Volcanoes (ed. Sigurdsson, H.) 65–92 (Academic Press, 2015). https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00003-1

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

Laufkötter, C., Zscheischler, J. & Frölicher, T. L. High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming. Science 369, 1621–1625 (2020). https://doi.org/10.1126/science.aba0690

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

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

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

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

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

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

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

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

Li, D., Shi, Y., Yang, L. et al. Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation. Nat Food 1, 746–754 (2020). https://doi.org/10.1038/s43016-020-00171-y

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

Li, N. et al. Prevalence and implications of microplastic contaminants in general human seminal fluid: A Raman spectroscopic study. Science of The Total Environment 937, 173522 (2024). https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173522

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

Li, X. et al. Mitochondrial proteins and congenital birth defect risk: a mendelian randomization study. BMC Pregnancy Childbirth 25, 444 (2025). https://doi.org/10.1186/s12884-025-07562-8

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

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

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

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

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

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

Lyons, J.J., Haney, M.M., Fee, D. et al. Infrasound from giant bubbles during explosive submarine eruptions. Nat. Geosci. 12, 952–958 (2019). https://doi.org/10.1038/s41561-019-0461-0

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

Mandal, M., Roy, A., Popek, R. & Sarkar, A. Micro- and nano- plastic degradation by bacterial enzymes: A solution to 'White Pollution'. The Microbe 3, 100072 (2024). https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100072

Manzi, F., Schlösser, P., Owczarz, A. & Wolinska, J. Polystyrene nanoplastics differentially influence the outcome of infection by two microparasites of the host Daphnia magna. Phil. Trans. R. Soc. B 378, 20220013 (2023). https://doi.org/10.1098/rstb.2022.0013

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

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

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

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

Microplastics pose risk to ocean plankton, climate, other key Earth systems. Mongabay. (2023) https://news.mongabay.com/2023/10/microplastics-pose-risk-to-ocean-plankton-climate-other-key-earth-systems (accessed 1 May 2025).

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

Montano, L. et al. First evidence of microplastics in human ovarian follicular fluid: An emerging threat to female fertility. Ecotoxicology and Environmental Safety 291, 117868 (2025). https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.117868

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

Moresco, V. et al. Binding, recovery, and infectiousness of enveloped and non-enveloped viruses associated with plastic pollution in surface water. Environmental Pollution 308, 119594 (2022). https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119594

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

Muhonja, C. N., Makonde, H., Magoma, G. & Imbuga, M. Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. PLOS ONE 13, e0198446 (2018). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198446

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

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

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

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

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

NASA. Steamy relationships: How atmospheric water vapor amplifies Earth's greenhouse effect. (2022) https://science.nasa.gov/earth/climate-change/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifies-earths-greenhouse-effect (Дата доступа 01.05.2025).

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

NASA. What are Phytoplankton? https://earthobservatory.nasa.gov/features/Phytoplankton (Дата доступа 01.05.2025).

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

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

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

NBC News. '12 months of record ocean heat has scientists puzzled and concerned'. (2024) https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179 (Дата доступа 10.05.2025).

NBC News. Oceans hit record-hot temperatures. (2024) https://www.nbcnews.com/science/environment/oceans-record-hot-rcna143179 (Дата доступа 01.05.2025).

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

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

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

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

Nippon.com. Japan's aging society. https://www.nippon.com/en/features/h00194 (Дата доступа 01.05.2025).

NOAA Ocean Exploration. 'Marine Life'. (n.d.) https://oceanexplorer.noaa.gov/explainers/marine-life.html (Дата доступа 10.05.2025).

NOAA Ocean Service. 'How far does light travel in the ocean?'. (n.d.) https://oceanservice.noaa.gov/facts/light_travel.html (Дата доступа 10.05.2025).

NOAA. Data on the position of the North Magnetic Pole. https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/data/poles/NP.xy (Дата доступа 01.05.2025).

NOAA. Earth had its warmest year on record; Upper-ocean heat content was record high while Antarctic sea ice was record low. https://www.ncei.noaa.gov/news/global-climate-202312 (Дата доступа 01.05.2025).

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

NOAA. Ocean heat content. www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT (Дата доступа 01.05.2025).

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

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

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

OECD (2023) Note: Regional summary data was calculated by Our World in Data based on OECD-provided data. OurWorldinData.org/plastic-pollution | CC BY https://ourworldindata.org/grapher/share-plastic-fate?time=2019..latest (Дата доступа 01.05.2025).

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

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

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

Ostle, C. et al. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. Nat Commun 10,

Our World in Data. Annual plastic waste by disposal method, World, 2000 to 2019. https://ourworldindata.org/grapher/plastic-fate (Дата доступа 01.05.2025).

Our World in Data. Cancer deaths by type, World. https://ourworldindata.org/grapher/cancer-deaths-by-type-grouped (Дата доступа 01.05.2025).

Our World in Data. Deaths from diabetes by type 1980-2021. https://ourworldindata.org/grapher/deaths-from-diabetes-by-type (Дата доступа 01.05.2025).

Our World in Data. Microplastics in the ocean. https://ourworldindata.org/grapher/microplastics-in-ocean (Дата доступа 01.05.2025).

Our World in Data. Number of deaths from cardiovascular diseases by age, worldwide. https://ourworldindata.org/grapher/cardiovascular-disease-deaths-by-age (Дата доступа 01.05.2025).

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

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

Park, S. Y. & Kim, C. G. Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a landfill site. Chemosphere 222, 527–533 (2019). https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.159

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

Pegler, S.S., Ferguson, D.J. Rapid heat discharge during deep-sea eruptions generates megaplumes and disperses tephra. Nat Commun 12, 2292 (2021). https://doi.org/10.1038/s41467-021-22439-y

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

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

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

Polyak, B. G., & Khutorskoy, M. D. (2018). Heat flow from the Earth's interior as an indicator of deep-seated processes. Georesources, 20(4), Part 2, 366–376. https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.366-376

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

Plastics News. Study highlights health hazards of microplastics. (2019) https://www.plasticsnews.com/news/study-highlights-health-hazards-microplastics (Дата доступа 01.05.2025).

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

Pollack, H. N., Hurter, S. J. & Johnson, J. R. Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. Rev. Geophys. 31, 267–280 (1993). https://doi.org/10.1029/93RG01249

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

Ragusa, A. et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. Environment International 146, 106274 (2021). https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274

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

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

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

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

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

Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. Commun Earth Environ 3, 168 (2022). https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3

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

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

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

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

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

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

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

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

Rosenthal, Y. et al. Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years. Science 342, 617–621 (2013). https://doi.org/10.1126/science.1240837

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

Rubin, B. S. Bisphenol A: An endocrine disruptor with widespread exposure and multiple effects. The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology 127, 27–34 (2011). https://doi.org/10.1016/j.jsbmb.2011.05.002

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

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

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

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

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

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

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

Science News Explores. Seafloor hosts surprising number of deep-sea vents. (2016) https://www.snexplores.org/article/seafloor-hosts-surprising-number-deep-sea-vents (Дата доступа 10.05.2025).

ScienceDirect. Food allergy. ScienceDirect Topics. https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/food-allergy (Дата доступа 01.05.2025).

ScienceDirect. Inflammatory bowel disease. ScienceDirect Topics. https://www.sciencedirect.com/topics/pharmacology-toxicology-and-pharmaceutical-science/inflammatory-bowel-disease (Дата доступа 01.05.2025).

ScienceDirect. Ingestion. ScienceDirect Topics. https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/ingestion (Дата доступа 01.05.2025).

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

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

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

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

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

Sharma, R. K. et al. Impact of Microplastics on Pregnancy and Fetal Development: A Systematic Review. Cureus 16, e60712 (2024). https://doi.org/10.7759/cureus.60712

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

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

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

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

Sori, M. M. & Bramson, A. M. Water on Mars, With a Grain of Salt: Local Heat Anomalies Are Required for Basal Melting of Ice at the South Pole Today. Geophysical Research Letters 46, 1222–1231 (2019). https://doi.org/10.1029/2018GL080985

Stallings, E. B. et al. National population-based estimates for major birth defects, 2016–2020. Birth Defects Research 116, e2301 (2024). https://doi.org/10.1002/bdr2.2301

Strass, V. H., Rohardt, G., Kanzow, T., Hoppema, M. & Boebel, O. Multidecadal warming and density loss in the Deep Weddell Sea, Antarctica. Journal of Climate 33, 9863–9881 (2020). https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0271.1

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

Sun, D., Li, F., Jing, Z., Hu, S., & Zhang, B. (2023). Frequent marine heatwaves hidden below the surface of the global ocean. Nature Geoscience, 16(12), 1099–1104. https://doi.org/10.1038/s41561-023-01325-w

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

Sun, R. et al. Preliminary study on impacts of polystyrene microplastics on the hematological system and gene expression in bone marrow cells of mice. Ecotoxicology and Environmental Safety 218, 112296 (2021). https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112296

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

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

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

Sustainable Plastics. Scientists find microplastics in clouds above Mount Fuji. Sustainable Plastics. https://www.sustainableplastics.com/news/scientists-find-microplastics-clouds-above-mount-fuji (Дата доступа 01.05.2025).

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

Taylor, R., Turnbull, D. Mitochondrial DNA mutations in human disease. Nat Rev Genet 6, 389–402 (2005). https://doi.org/10.1038/nrg1606

The Cool Down. 'Experts raise concerns about record-breaking phenomenon observed in Atlantic Ocean: 'It's just astonishing''. (2024) https://www.thecooldown.com/outdoors/ocean-temperature-pollution-sudden-spike/ (Дата доступа 10.05.2025)

The European Space Agency (ESA). https://www.esa.int (Дата доступа 01.05.2025).

The Guardian. Autism could be diagnosed with stool sample, scientists say. https://www.theguardian.com/science/article/2024/jul/08/autism-could-be-diagnosed-with-stool-sample-microbes-research (Дата доступа 01.05.2025).

The Guardian. Hot blob: vast patch of warm water off New Zealand coast puzzles scientists. (2019) https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists (Дата доступа 10.05.2025).

The Guardian. Mental health overtakes cancer and obesity as Britons' biggest health worry. (2024) https://www.theguardian.com/society/2024/sep/20/mental-health-overtakes-cancer-and-obesity-as-britons-biggest-health-worry (Дата доступа 01.05.2025).

The Guardian. Scientists unveil bionic robo-fish to remove microplastics from seas. https://www.theguardian.com/environment/2022/jun/22/scientists-unveil-bionic-robo-fish-to-remove-microplastics-from-seas (Дата доступа 01.05.2025).

The Guardian. Shanna Swan: 'Most couples may have to use assisted reproduction by 2045'. (2021) https://www.theguardian.com/society/2021/mar/28/shanna-swan-fertility-reproduction-count-down (Дата доступа 01.05.2025).

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

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

The Ocean Foundation. Ocean conservation. The Ocean Foundation. https://oceanfdn.org (Дата доступа 01.05.2025).

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

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

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

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

Tsujimura, A. et al. Erectile Function and Sexual Activity Are Declining in the Younger Generation: Results from a National Survey in Japan. The World Journal of Men's Health 43, 239–248 (2025). https://doi.org/10.5534/wjmh.240137

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

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

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

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

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

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

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

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

United Nations Malaysia. Policy brief on solid waste management. UN Malaysia. https://malaysia.un.org/sites/default/files/2022-02/POLSOLSum_1.pdf (Дата доступа 01.05.2025).

University of Newcastle. Plastic ingestion by people could be equating to a credit card a week. https://www.newcastle.edu.au/newsroom/featured/plastic-ingestion-by-people-could-be-equating-to-a-credit-card-a-week (Дата доступа 01.05.2025)

University of Stirling. Hitch-hiking viruses can survive on microplastics in freshwater, new study finds. (2022) https://www.stir.ac.uk/news/2022/june-2022-news/hitch-hiking-viruses-can-survive-on-microplastics-in-freshwater-new-study-finds (Дата доступа 01.05.2025).

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

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

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

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

Vanuytsel, T., Bercik, P. & Boeckxstaens, G. Understanding neuroimmune interactions in disorders of gut–brain interaction: from functional to immune-mediated disorders. Gut 72, 787–798 (2023). https://doi.org/10.1136/gutjnl-2020-320633

Vieira, F., & Hamza, V. M. Global heat flow: New estimates using digital maps and GIS techniques. Int. J. Terr. Heat Flow Appl. Geotherm. 1, 6–13 (2018).

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

Viterito, A. 1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History. Int. J. Environ. Sci. Nat. Res. 29, 556271 (2022). https://doi.org/10.19080/IJESNR.2022.29.556271

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

VRT NWS. Brain contains "full plastic spoonful" of microplastics. (2025) https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2025/02/04/microplastics-in-de-hersenen (Дата доступа 01.05.2025).

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

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

Wang, Y. et al. Robust, Healable, Self-Locomotive Integrated Robots Enabled by Noncovalent Assembled Gradient Nanostructure. Nano Lett. 22, 5409–5419 (2022). https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.2c01375

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

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

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

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

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

Wong, A. P. S. et al. Argo Data 1999–2019: Two Million Temperature-Salinity Profiles and Subsurface Velocity Observations From a Global Array of Profiling Floats. Front. Mar. Sci. 7, 00700 (2020). https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00700

Wong, M. H. et al. Evolution of the Horizontal Winds in Jupiter's Great Red Spot From One Jovian Year of HST/WFC3 Maps. Geophysical Research Letters 48, e2021GL093982 (2021). https://doi.org/10.1029/2021GL093982

Woods Hole Oceanographic Institution. Warming ocean. WHOI Argo. https://www2.whoi.edu/site/argo/impacts/warming-ocean (Дата доступа 01.05.2025).

World Energy Council. World Energy Resources: Solar 2013. (2013) https://www.worldenergy.org/publications (Дата доступа 10.05.2025).

World Health Organization. 1 in 10 babies worldwide are born early, with major impacts on health and survival. (2023) https://www.who.int/news/item/06-10-2023-1-in-10-babies-worldwide-are-born-early--with-major-impacts-on-health-and-survival (Дата доступа 01.05.2025).

World Health Organization. 1 in 6 people globally affected by infertility. (2023) https://www.who.int/news/item/04-04-2023-1-in-6-people-globally-affected-by-infertility (Дата доступа 01.05.2025).

World Health Organization. Global cancer burden growing, amidst mounting need for services. (2024) https://www.who.int/news/item/01-02-2024-global-cancer-burden-growing--amidst-mounting-need-for-services (Дата доступа 01.05.2025).

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

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

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

World Health Organization. WHO releases first-ever list of health-threatening fungi. (2022) https://www.who.int/news/item/25-10-2022-who-releases-first-ever-list-of-health-threatening-fungi (Дата доступа 01.05.2025).

World Meteorological Organization (WMO) confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level. https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level (Дата доступа 01.05.2025).

World Meteorological Organization (WMO). State of the Global Climate 2024. https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024 (Дата доступа 01.05.2025).

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

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

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

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

Yadav, A., Vuković, L. & Narayan, M. An Atomic and Molecular Insight into How PFOA Reduces α-Helicity, Compromises Substrate Binding, and Creates Binding Pockets in a Model Globular Protein. J. Am. Chem. Soc. 146, 12766–12777 (2024). https://doi.org/10.1021/jacs.4c02934

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

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

Yoshida, S. et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). Science 351, 1196–1199 (2016). https://doi.org/10.1126/science.aad6359

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

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

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

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

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