

## Влияние полимерных отходов на гомеостатические механизмы водных экосистем

Хайруллина Л. Б.<sup>1</sup>, Мамаева Н. Л.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Тюменский индустриальный университет  
Тюмень, Россия

<sup>2</sup>Тюменский научный центр СО РАН  
Тюмень, Россия  
[hairullina.1964@mail.ru](mailto:hairullina.1964@mail.ru), [mamaeva.natali2011@mail.ru](mailto:mamaeva.natali2011@mail.ru)

В статье рассматриваются проблемы загрязнения водных экосистем полимерными отходами. Цель работы – исследование статистики образования полимерных отходов в мировом сообществе, по отдельным странам и их влияние на гомеостатические механизмы водных экосистем. Как показали исследования, количество производимого пластика через каждые десять лет увеличивается, причем с 1950 по 1960 и с 1960 по 1970 год показатель вырос примерно в 4 и 4,4 раза, соответственно; с 1970 по 1980 год примерно в 2 раза; с 1980 по 2000 год – примерно в 1,7 раза каждые десять лет; с 2000 по 2010 год и с 2010 по 2019 год – примерно в 1,4 раза каждый рассматриваемый период. Линия тренда имеет «восходящий» характер, а высокий коэффициент аппроксимации позволяет сделать прогноз об увеличении количества пластиковых отходов на ближайшие десятилетия. Такое образование полимерных отходов ведет к загрязнению суши, а далее мигрирует в водные экосистемы. Как показали исследования, почти за 20 лет количество пластиковых отходов, как в океанах, так и в реках и озерах увеличивается. Пластмассы являются частью сложных биогеохимических циклов через живые организмы, поглощающие пластик, они по пищевым цепям поступают в организм человека. Следовательно, загрязнение водных экосистем приводит к нарушению гомеостатических процессов, которые вызывают изменения в окружающей среде. Решением проблемы загрязнения водных экосистем является правовое регулирование вопросов сбора полимерных отходов и развитие перспективных технологий по их переработке, то есть вторичное полимерное сырье должно перейти в новую продукцию. Это решит вопросы экологической безопасности по загрязнению водных экосистем полимерными отходами.

*Ключевые слова:* водные экосистемы, полимерные отходы, экологическая безопасность, гомеостаз, утилизация отходов.

### ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение водных систем полимерными отходами является глобальной проблемой, требующего решения для сохранения флоры и фауны нашей планеты (Пластиковое загрязнение, 2023). Большинство полимеров, используемых в нашей повседневной жизни, имеют длительный срок разложения, содержат токсичные тугоплавкие вещества, которые не поддаются переработке, и, поэтому представляют самую вредную и стойкую фракцию морского мусора (Ровенских и др., 2020; Старикова, Мамаева, 2023; Хайруллина, Мамаева, 2023).

Такие вторичные полимеры вносят значительный вклад в тонны пластиковых отходов, ежегодно обнаруживаемых в водных экосистемах. Хотя, вторичные полимерные отходы образуются в результате жизнедеятельности человека, но из суши попадают в водную среду. Воздействие солнечного света, температуры, влажности, волн и ветра начинают разрушать пластик на кусочки длиной менее пяти миллиметров. Эти микропластики часто потребляются морскими организмами, находящимися в основании пищевой цепи, такими как планктон и личинки рыб, что приводит к концентрации проглоченного пластика в верхней части пищевой цепи. Пластмассы производятся с использованием токсичных химических веществ, поэтому, эти токсичные вещества попадают в морскую пищевую цепочку, включая рыбу, которой питаются люди. Пластиковые отходы представляют опасность для морской живности, так как они часто путаются с пищей или могут стать ловушкой для рыб и морских животных, приводят к ухудшению качества воды и вымиранию некоторых видов, накапливаются в

пищевых цепях, что приводит к биоаккумуляции токсичных веществ, которые попадают в человеческий организм через потребление рыбы и морепродуктов.

Вторичные полимерные отходы оказывают негативное влияние на гомеостатические механизмы водных экосистем. Вовлечение полимерных отходов в биогеохимические процессы водных экосистем ведет к нарушению их единства структуры и функционирования (Хучунаева, 2023). По прогнозам аналитиков, если не решать эту проблему, то такая тенденция сохранится и к 2050 году в океане будет больше пластика, чем рыбы по весу. Также, когда пластмассы распадаются в морской среде, они переносят микрочастицы пластмасс, синтетические и целлюлозные микроволокна, токсичные химические вещества, металлы и микрозагрязнители в воды и отложения и в конечном итоге в морские пищевые цепи (Проблема загрязнения и ее решение, 2021).

Актуальность работы усиливается тем, что биоаккумуляция микропластика в водной биоте рассматривается как потенциальная угроза организмам более высоких трофических уровней, в том числе человеку, который находится на вершине пищевой цепи, а данных о влиянии микропластика на водную среду и биоту в Российской Федерации недостаточно. Однако, в зарубежных источниках найдены сведения, согласно которым отмечено нарушение репродуктивного и пищевого поведения, связанного с микропластиком (Синицина и др., 2023).

Цель работы – исследование статистики образования полимерных отходов в мировом сообществе и по отдельным странам, и их влияние на гомеостатические механизмы водных экосистем.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализ проводился по материалам зарубежных и отечественных исследований по состоянию загрязнения полимерными отходами водных экосистем и их обращению: количество образованных пластиковых отходов, как в мире почти за 70 лет, так и по отдельным странам, а также приведен международный показатель Mismanaged Waste Index (MWI) и обозначен его статус. Анализировали сравнительные данные за 2000 и 2019 годы по количеству полимерных отходов в водных экосистемах (океаны, реки и озера). Количественные и качественные данные приведены согласно Our World in Data (2023), World Population Review (2024) и обзорам Plastic Overshoot Day (2023, 2024). Количественные данные обработаны с применением программы Excel с построением линии тренда и нахождением величины достоверности аппроксимации ( $R^2$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Водные экосистемы занимают огромную часть нашей планеты, обладают глубокими и обширными территориями и, поэтому становятся конечным хранилищем полимерных отходов. Благодаря силе тяжести, полимерные отходы, естественным образом перемещаются с суши в водные объекты. Загрязнение водных экосистем пластиком наблюдается повсеместно: от океанских впадин до поверхности водных ресурсов, в глубоководных отложениях океана, на дне морей и озер и в прибрежных зонах. На поверхности океана пластиковый мусор сосредоточен в океанских круговоротах, которые образуются из-за чередования зональных ветров и переносу внутренних вод к экватору в субтропиках и к полюсу в субполярных океанах. Океанские течения концентрируют пластиковые отходы внутри водоворотов. Морские виды экосистемы также могут задохнуться или запутаться в пластиковом мусоре.

Штормы, воздействие волн, океанские течения, гидратация и воздействие процессов атмосферного выветривания (например, окисления) и ультрафиолетового излучения ведут к разрушению пластиковых частиц до постоянно уменьшающихся размеров – микропластики. Уменьшенные до миллиметров и микро- масштабов пластиковые частицы оседают в глубоководных отложениях, где их находится в четыре раза больше по сравнению с поверхностными водами океана (Ровенских и др., 2020).

Микропластики часто потребляются морскими организмами, находящимися в основании пищевой цепи, такими как планктон и личинки рыб, что приводит к концентрации проглоченного пластика в верхней части пищевой цепи.

Пластиковые отходы представляют опасность для морских обитателей, т.к. их часто путают с пищей или могут стать ловушкой для рыб и морских животных, приводят к ухудшению качества воды и вымиранию некоторых видов, накапливаются в пищевых цепях, что приводит к биоаккумуляции токсичных веществ. В дальнейшем попадают в человеческий организм через потребление рыбы и морепродуктов.

Ежегодное увеличение образования пластиковых отходов приводит к проблеме мирового масштаба (рис. 1).

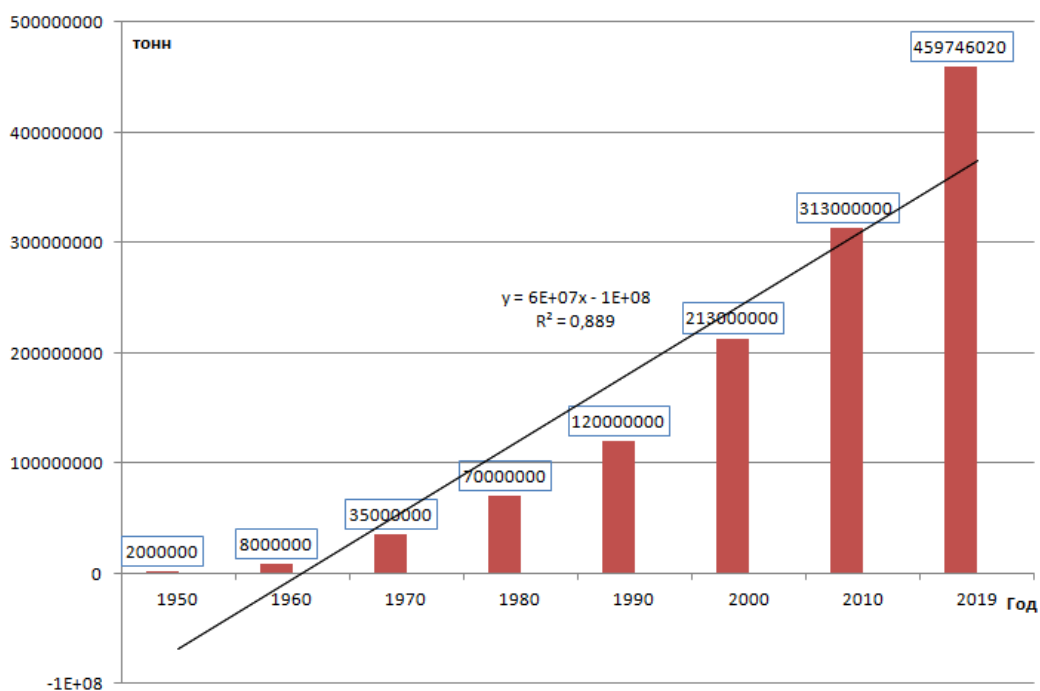


Рис. 1. Общее количество образования пластиковых отходов в мировом сообществе

Согласно диаграмме, которая построена по данным Data Page (2023), количество производимого пластика через каждые десять лет увеличивается, причем с 1950 по 1960 год и с 1960 по 1970 год показатель вырос в 4 и 4,4 раза, соответственно; с 1970 по 1980 год в 2 раза; с 1980 по 2000 – в 1,7 раза каждые десять лет; с 2000 по 2010 год и с 2010 по 2019 год – в 1,4 раза каждый рассматриваемый период. Линия тренда имеет «восходящий» характер и описывается следующим уравнением:  $y = 6E+07x - 1E+08$ , а высокий коэффициент аппроксимации ( $R^2 = 0,889$ ) позволяет сделать прогноз об увеличении количества пластиковых отходов на ближайшие десятилетия.

Как отмечается Data Page (2023), по прогнозам к 2060 году мировое производство пластика может составить 1 230 627 200 т, что будет составлять в 2,7 раза больше производства пластмасс по сравнению с 2019 годом и в 615 раз выше производства пластика по сравнению с 1950 годом. Почти за 70 лет (при сравнении 1950 с 2019 годом) производство пластика выросло в 230 раз и составило 459 746 020 т (2019 г.) по сравнению с 2 млн. т (1950 г.). Такое образование полимерных отходов ведет к загрязнению суши, а далее они мигрируют в водные экосистемы. Пластмассы являются частью сложных биогеохимических циклов через живые организмы, такие как китообразные, морские птицы, млекопитающие и бактерии, поглощающие пластик. На рисунке 2 представлены риски и воздействие морского мусора на водные экосистемы.

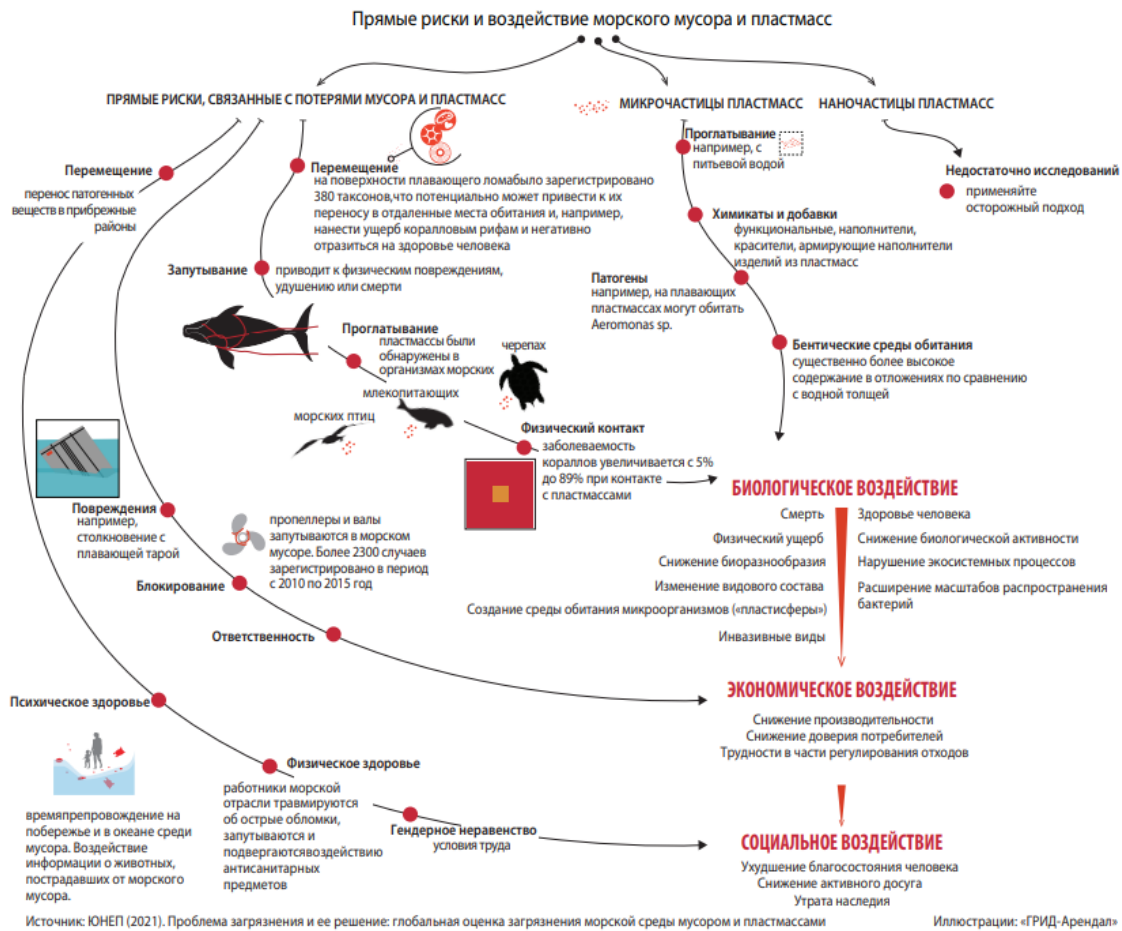


Рис. 2. Прямые риски и воздействия морского мусора и пластмасс на водные экосистемы (Проблема загрязнения и ее решение, 2021)

Прямые риски, в основном, связаны с перемещением пластиковых отходов, наносящие вред всем обитателям морских экосистем и приводящие к загрязнению прибрежных зон. Продукты распада: микропластики и наночастицы оказывают биологическое воздействие на все живые организмы, включая человека. Все это ведет к снижению биоразнообразию обитателей водных экосистем и нарушению гомеостатических механизмов.

Наибольшее количество образования пластиковых отходов, если рассматривать статистику по отдельным двадцати странам, образуется в Китае и США (рис. 3). Наименьшее количество в ОАЭ и Южной Африке. Россия, в представленном графике по данным Plastic Pollution by Country (2024), занимает 11 место.

По сравнению с 2010 годом, по материалам Data Page (2023), Россия по образованию пластиковых отходов занимала 8 место и их количество составляло 5 839 685 т, что в 1,8 раза было больше по сравнению с настоящим временем. Что касается других стран, например, Японии, то в настоящее время, наблюдается снижение количества образуемых пластиковых отходов в 2 раза, в Германии – в 4 раза, в Китае и США примерно в 1,6 раза. Учитывая текущую тенденцию к урбанизации в Индии, быстрый рост населения и повышение уровня жизни данный показатель повысился в 1,6 раза.

Как отмечают специалисты (Сперанская и др., 2021), почти половину в твердых коммунальных отходах составляет упаковка – 42 %, существенную долю (около трети) занимает упаковочная пленка (35 %), на третьем месте – ПЭТ-бутылки (12 %), а на прочие полимерные отходы приходится 11 %. Поскольку пластик легкий, большая часть этого

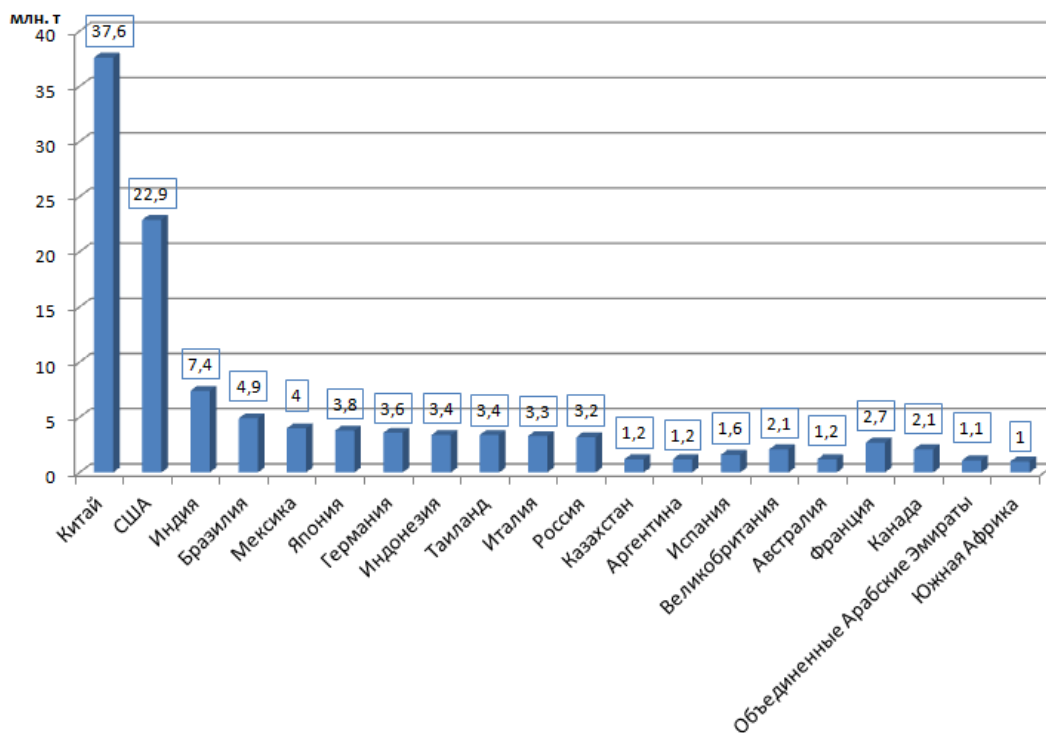


Рис. 3. Количество образования пластиковых отходов в отдельных странах

загрязнения наблюдается на поверхности океана и вокруг нее, но пластиковый мусор и частицы сейчас встречаются в большинстве морских и наземных местообитаний, включая морские глубины, Великие озера, коралловые рифы, пляжи, реки и устья рек. Подводные каньоны также являются важными местами накопления, способствуя переносу такого мусора в морские глубины. Наиболее ярким свидетельством проблемы пластика в океане являются участки мусора, которые скапливаются в регионах, где присутствует круговое океанское течение, образованное ветрами Земли и силами, создаваемыми вращением планеты (Ровенских и др., 2020). На океанических водоворотах встречаются накопления значительных участков мусора. Макропластиковые отходы могут распадаться при непогоде на более мелкие фрагменты пластикового мусора, известные как микропластики, когда их размер меньше 5 мм. Воздействие солнечного света, температуры, влажности, волн и ветра начинают разрушать пластик на кусочки длиной менее пяти миллиметров (Ровенских и др., 2020).

Все эти отходы необходимо утилизировать, так как главная цель – это минимизация образования и повторное использование отходов. В настоящее время, существуют различные способы утилизации, такие как, рециклинг, регенерацию и рекуперация отходов. На данном этапе развития производства, эти методы являются неэффективными. С одной стороны, полимерные отходы являются ценным ресурсом, с другой стороны – неэффективное управление такими отходами приводит к попаданию их в окружающую среду. И требуются технологии утилизации вторичных полимерных отходов, повышающие маржинальность конечной продукции, такие как их переработка с получением новых изделий.

Бурный рост количества полимерных отходов приводит к превышению возможности систем управления отходами по их эффективному обращению, т.е. когда отходы становятся плохо управляемыми, попадают в окружающую среду. Это основывается на следующих принципах в области обращения с отходами: во-первых, количестве пластиковых отходов, которые производит население; во-вторых, насколько хорошо обрабатывается пластик, когда он становится отходами; в-третьих, количество экспортируемых и импортируемых пластиковых отходов.

Так, согласно Докладам «Plastic Overshoot Day» (2023, 2024) в мире за 2024 год этот день – 5 сентября – День превышения нормы потребления пластика (для сравнения, в 2023 году критическая точка была 28 июля). Что касается России, то дата, когда количество пластика превышает способность этой страны управлять им в 2024 году была 27 апреля (для сравнения, в 2023 году – 8 января). Этот день служит суровым напоминанием о срочной необходимости улучшения инфраструктур управления и переработки пластика по всему миру.

Согласно международному показателю MWI (Mismanaged Waste Index), используемого для количественной представленных на графике стран, MWI выше у Индии – 98,55 % в сравнении с 2024 г. – 68,62 % (Sarah Perreard et al., 2024), Таиланда – 98,49 % в сравнении с 2024 г. – 45,88 % (Sarah Perreard et al., 2024) и Индонезии – 98,42 % в сравнении с 2024 г. – 43,78 % (Sarah Perreard et al., 2024), а ниже у Канады. Индекс неуправляемых отходов, который на 2024 год для России равен 67,5% (Sarah Perreard et al., 2024) в сравнении с 2023 г. – 97,82 % (Sarah Perreard et al., 2023) (рис. 4). График сделан авторами, согласно данным Plastic Pollution by Country (2024).

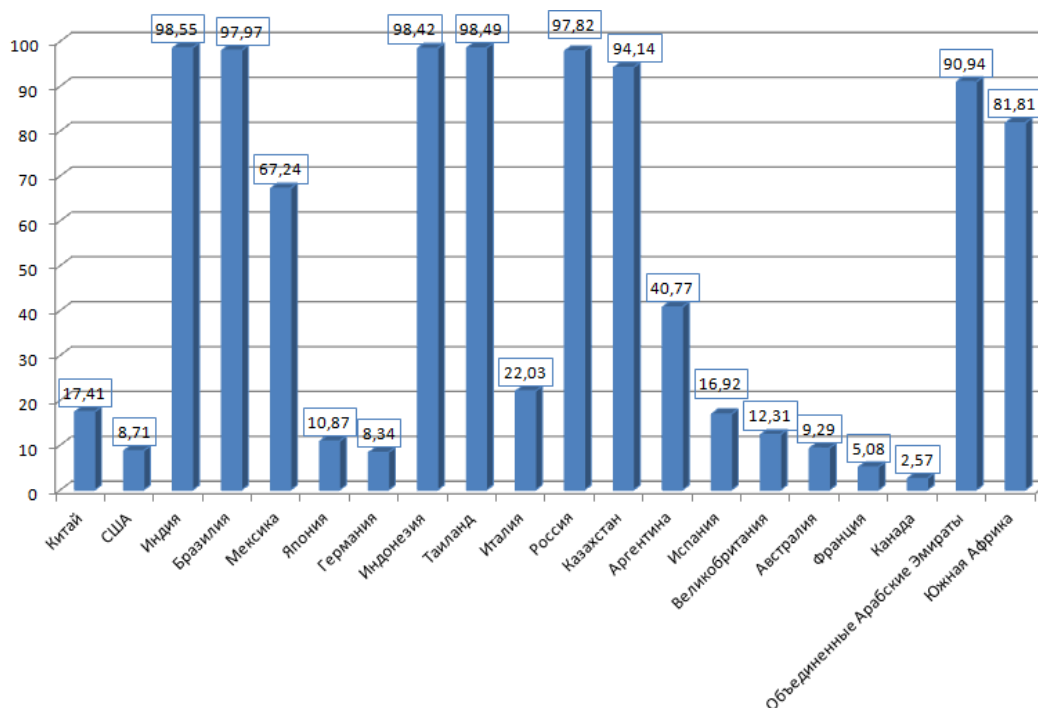


Рис. 4. Показатель MWI по различным странам

В текущем году (2024 г.) по Российской Федерации и по ряду других стран, анализируя оценку неэффективного обращения пластиковых отходов в рассматриваемых странах, мы наблюдаем положительную динамику. Человечество задумывается о том, что загрязнения экосистем нашей планеты может привести к экологической катастрофе. Загрязнения водных экосистем приводит к нарушению гомеостатических процессов, которые приводят к изменениям в окружающей среде.

Статус показателя MWI (рассчитывается, как отношение суммы неуправляемых или неэффективно утилизированных отходов на количество образованных отходов) по странам представлен на рисунке 5.



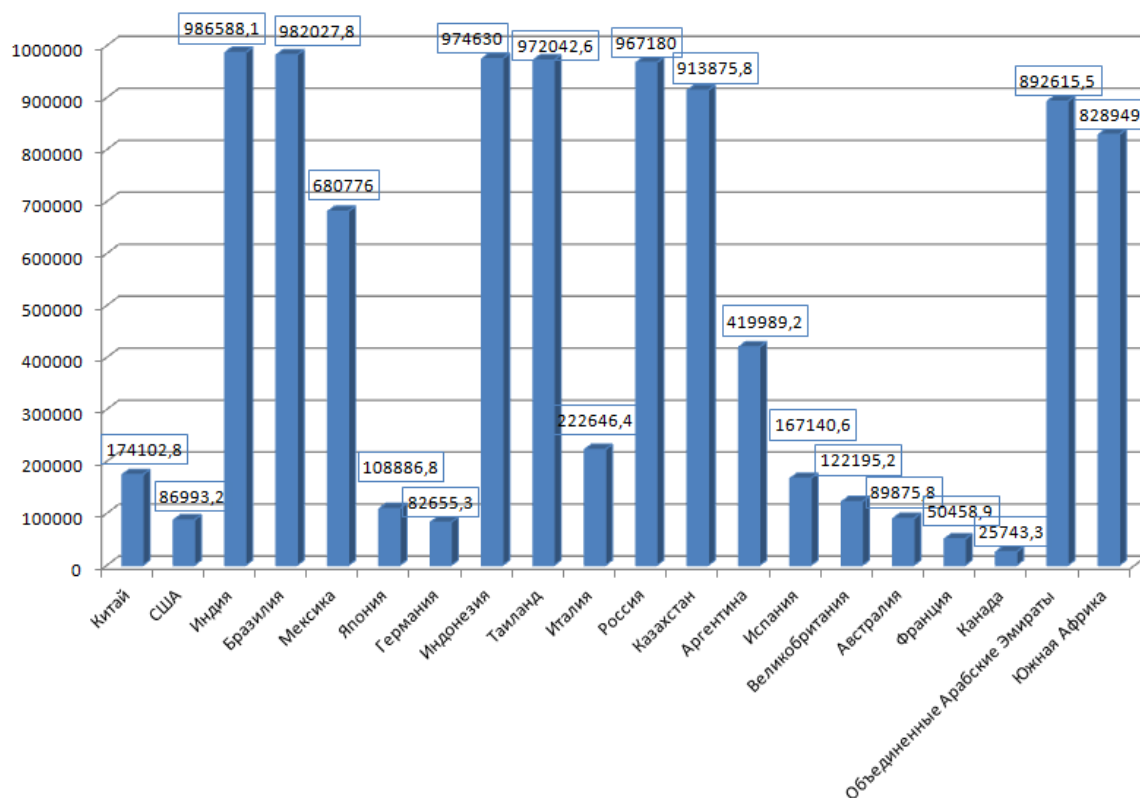
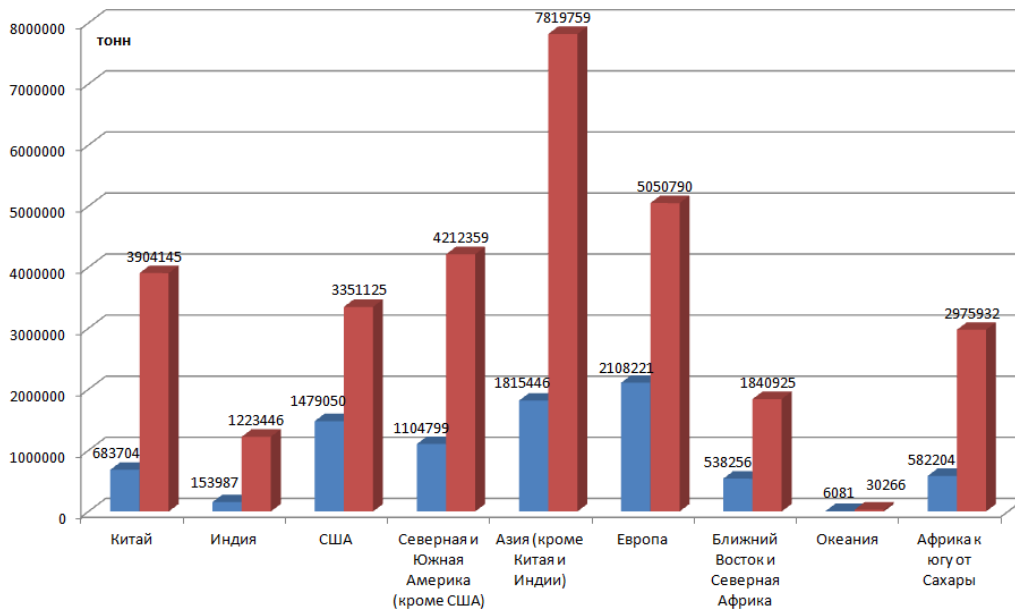


Рис. 5. Отношение суммы не утилизированных и неэффективно утилизированных отходов на количество образованных отходов

Наибольшее высокое значение наблюдается MWI у Индии, Бразилии, Индонезии. Также имеют очень высокий статус Таиланд, Россия, Казахстан, Объединенные Арабские Эмираты и Южная Африка. Высокий статус у Мексики, средний – Аргентина, низкий – Италия и Испания, все остальные страны, представленные на графике, имеют очень низкий статус MWI согласно Plastic Pollution by Country (2024).

Таким образом, чем выше MWI, тем больше отходов попадает в окружающую среду, в частности, в водные объекты. Так, в 2019 году в океанах накопилось 30 408 748 т пластиковых отходов, а в реках и озерах – 109 437 000 т, что составило в 3,6 раза и в 2,8 раза больше, соответственно, по сравнению с 2000 годом (Data Page, 2023). При рассмотрении пластикового загрязнения в 2000 и 2019 годах по странам и регионам было выявлено следующее (рис. 6). График сделан авторами, согласно данным Data Page (2023).

Из графиков видно, что почти за 20 лет количество пластиковых отходов, как в океанах, так и в реках и озерах, по всем рассматриваемым странам и регионам увеличивается. В океанах этот показатель варьируется от 2,3 раз в США до 7,9 раз в Индии, в реках и озерах от 1,6 раз в США до 6,2 раз в Индии. Первые три региона по более сильному возрастанию загрязнения пластиковыми отходами водных объектов в 2000 году по сравнению с 2019 являются Африка к югу от Сахары, Океания и Азия (кроме Китая и Индии). В то же время, первые два региона (Африка к югу от Сахары, Океания) не являются основными загрязнителями водных объектов по количеству пластиковых отходов по сравнению с Азией (кроме Индии) и Европой. Если проанализировать данные Plastic Pollution by Country (2024), то количество пластиковых отходов, сброшенных в водные объекты, больше в Китае, Индии и США (рис. 7).



Б

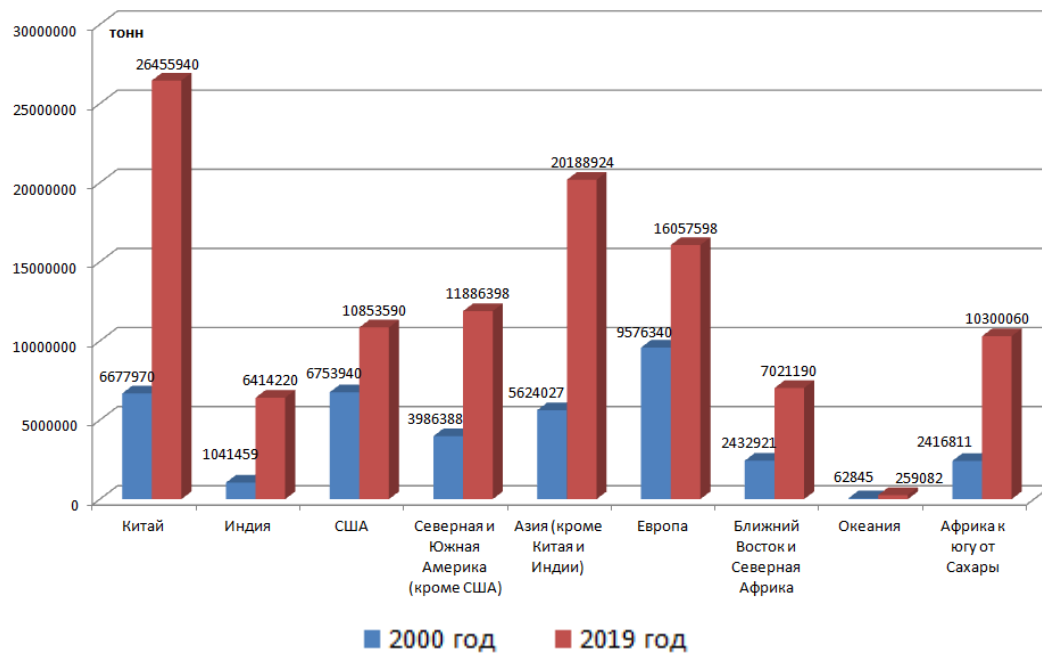


Рис. 6. Количество пластиковых отходов, сброшенных в водные объекты (А – океан; Б – реки и озера)

Несмотря на то, что количество пластиковых отходов, сброшенных в водные объекты, больше в вышеупомянутых странах, выброс количества их на человека больше в Таиланде, Индонезии и Бразилии (рис. 8). График сделан авторами, согласно данным Data Page (2023).

Также необходимо данный показатель исследовать в динамике, так, например, по России в 2024 году зарегистрировано 50 831 тонна микропластика, что на 2 844 тонны больше предыдущего года (Sarah Perreard et al., 2024).



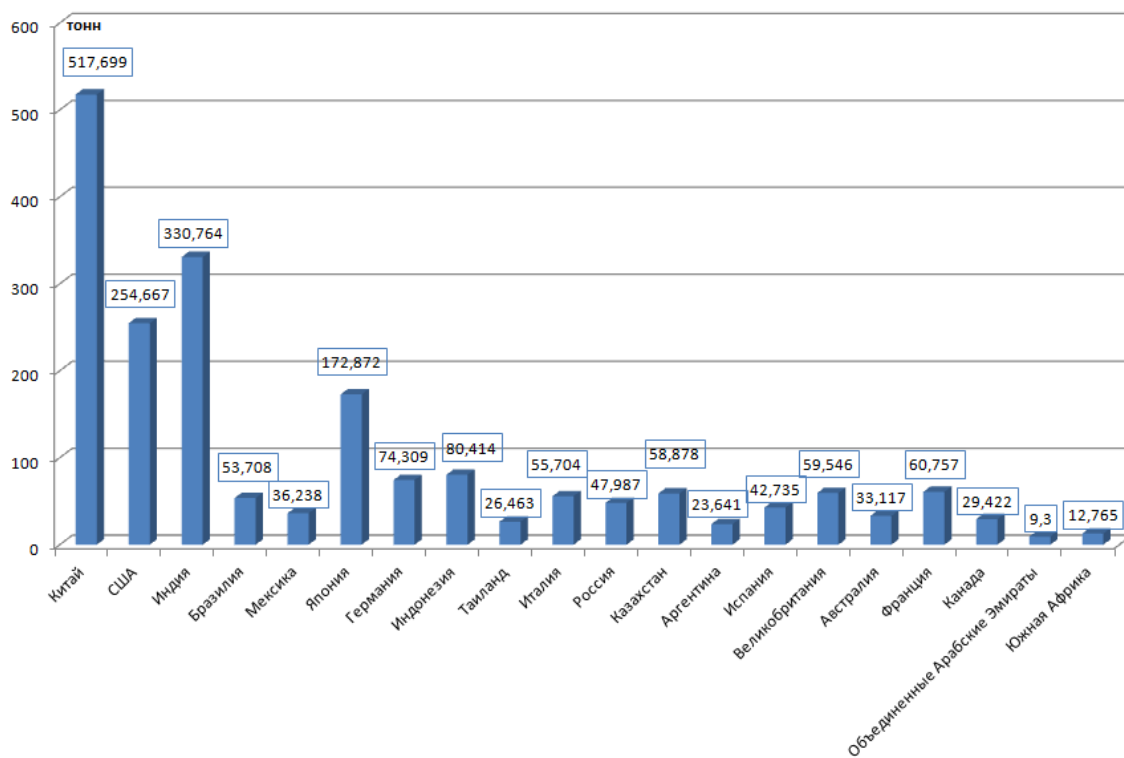


Рис. 7. Количество пластиковых отходов, сброшенных в водные объекты

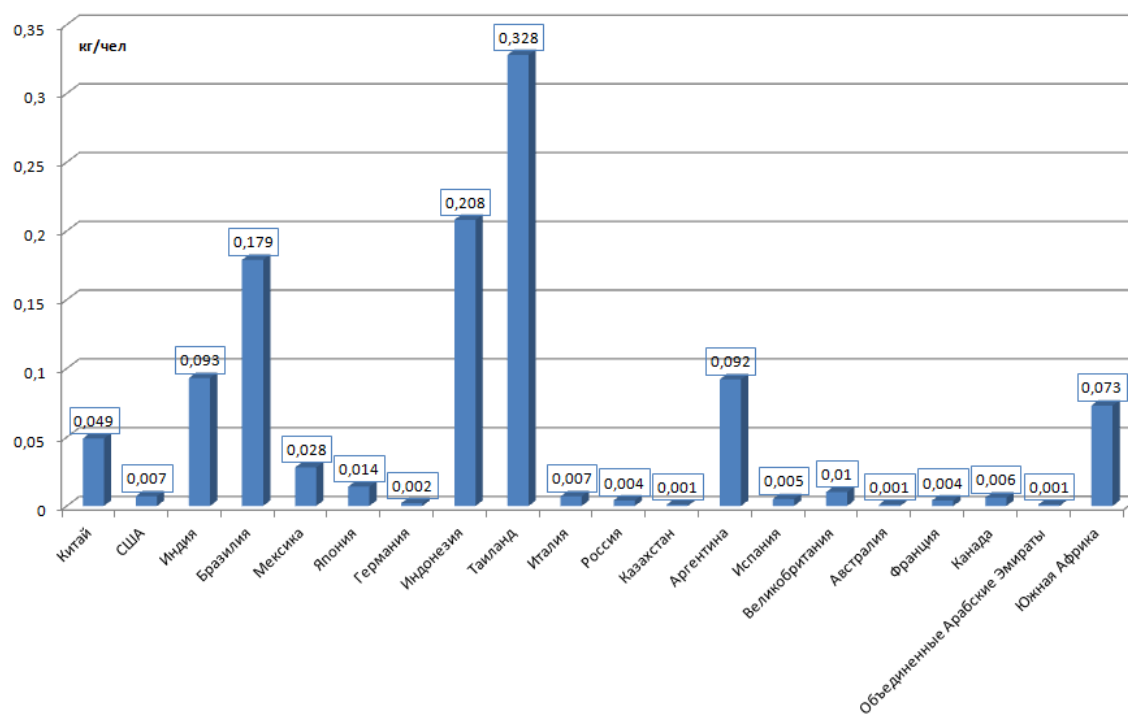


Рис. 8. Количество пластиковых отходов, сброшенных в водные объекты на душу населения

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, количество производимого пластика через каждые десять лет увеличивается, причем с 1950 по 1960 год и с 1960 по 1970 год показатель вырос в 4 и 4,4 раза, соответственно; с 1970 по 1980 год – в 2 раза; с 1980 по 2000 год – в 1,7 раза каждые десять лет; с 2000 по 2010 год и с 2010 по 2019 год – в 1,4 раза каждый рассматриваемый период. Линия тренда имеет «восходящий» характер, а высокий коэффициент аппроксимации позволяет сделать прогноз об увеличении количества пластиковых отходов на ближайшие десятилетия. Такое образование полимерных отходов ведет к загрязнению суши, а далее мигрирует в водные экосистемы. Значительные объемы нерегулируемых отходов, поступающие в водные объекты, в основном от густонаселенных районов, расположенных вблизи океанов, морей, крупных рек и др. Загрязнения водной среды мусором и пластиковыми отходами нарушают механизмы функционирования морских объектов. Продукты распада пластмасс – микрочастицы, являются токсичными веществами, попадают в открытое водное пространство и в дальнейшем, ассимилируются в отложениях, в морских пищевых цепях. Все это оказывает влияние на гомеостатические механизмы водных экосистем. Как показали исследования, почти за 20 лет количество пластиковых отходов, как в океанах, так и в реках и озерах увеличивается. Решением проблемы загрязнения водной экосистемы является правовое регулирование вопросов сбора полимерных отходов и развитие перспективных технологий по их переработке, т.е. вторичное полимерное сырье должно перейти в новую продукцию. Это решит вопросы экологической безопасности по загрязнениям водных экосистем полимерными отходами.

## Список литературы

- Пластиковое загрязнение: обзор международно-правовых инструментов. 19 октября 2023 года // Центр международных и сравнительно-правовых исследований. – 2023. – 29 с.
- Проблема загрязнения и ее решение: Глобальная оценка загрязнения морской среды мусором и пластмассами. Сводный доклад // Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде. – Найроби, 2021. – 44 с.
- Ровенских А. С., Игумина В. А., Карючина А. Е., Нагибина И. И. Загрязнение Мирового океана пластиковыми отходами // Научный журнал. Молодой ученый. – 2020. – № 18 (308). – С. 224–227. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/308/69343/> (дата обращения: 28.07.2024).
- Синицына О. О., Еремин Г. Б., Турбинский В. В., Пушкарева М. В., Ширяева М. А., Маркова О. Л., Борисова Д. С. Загрязнение микропластиком воды – угроза здоровью человека и окружающей среде. Обзор литературы // Анализ риска здоровью. – 2023. – № 3. – С. 172–179. DOI: 10.21668/health.risk/2023.3.17.
- Сперанская О., Понизова О., Цитцер О., Гурский Я. Пластик и пластиковые отходы в России: ситуация, проблемы и рекомендации // Международная Сеть по Ликвидации Загрязнителей (International Pollutants Elimination Network). – 2021. – 92 с.
- Старикова Г. В., Мамаева Н. Л. Обращение с отходами производства и потребления: монография. – Тюмень: ТИУ, 2023. – 162 с.
- Хайруллина Л. Б., Мамаева Н. Л. Правовые аспекты экологической безопасности при обращении с отходами // Евразийский юридический журнал. – 2023. – № 1 (176). – С. 364–365.
- Хучунаева Л. В. Оценка экологического состояния водных объектов вблизи полигона твердых коммунальных отходов (поселок Кашхатау, Кабардино-Балкарская Республика) // Экосистемы. – 2023. – Выпуск 34. – С. 225–231.
- Data Page: Global plastics production. Part of the following publication: Hannah Ritchie, Veronika Samborska and Max Roser (2023) Plastic Pollution. Data adapted from Geyer et al., OECD. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ourworldindata.org/> (просмотрено 28.07.2024).
- Plastic Pollution by Country 2024. World Population Review. Retrieved July 28, 2024 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/plastic-pollution-by-country> (просмотрено 28.07.2024).
- Sarah Perreard, Dr Feiyi Li, Dr Julien Boucher, Adrienne Gaboury, Noémie Voirin, Martina Gallato, Riccardo Puppi Plastic Overshoot Day – Report 2023, EA-Environmental Action 2023. – 272 p.
- Sarah Perreard, Julien Boucher, Martina Gallato, Melissa I. Gomis, Paolo Mazzatorta, Adrienne Gaboury, Noémie Voirin Plastic Overshoot Day – Report 2024, EA-Earth Action, 2024. – 264 p.

**Khairullina L. B., Mamaeva N. L. Influence of Polymer Wastes on the Homeostatic Mechanisms of Aquatic Ecosystems // Ekosistemy. 2024. Iss. 39. P. 16-26.**

The article deals with the problems of pollution of aquatic ecosystems by polymer wastes. The purpose of the research is to study the statistics of polymer waste generation in the global community, in individual countries and their impact on the homeostatic mechanisms of aquatic ecosystems. According to the conducted research, the amount of plastic produced increases every ten years, and from 1950 to 1960 and from 1960 to 1970, respectively; about 2 times from 1970 to 1980; about 1.7 times every ten years from 1980 to 2000; approximately 1.4 times every ten years from 2000 to 2010 and 2010 to 2019, respectively. The trend line has an "upward" character, and a high approximation coefficient makes it possible to make a forecast about an increase in the amount of plastic waste for the coming decades. The research reveals that the amount of plastic waste, both in the oceans, rivers and lakes, has been increasing for almost 20 years. Plastics are part of complex biogeochemical cycles: through living organisms that absorb plastics. They enter the human body via food chains. Consequently, pollution of aquatic ecosystems results in disruption of homeostatic processes that cause changes in the environment. The solution to the problem of pollution of aquatic ecosystems is the legal regulation of the collection of polymer waste and the development of promising technologies for their processing, i.e., secondary polymer raw materials should be converted into new products. This will solve environmental safety issues related to pollution of aquatic ecosystems by polymer waste.

*Key words:* aquatic ecosystems, polymer wastes, environmental safety, homeostasis, waste utilization.

*Поступила в редакцию 03.08.24*

*Принята к печати 10.09.24*