

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-1-34-44>

УДК 685.34.036

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРЕСНОЙ ВОДЫ МИКРОПЛАСТИКОМ: ИСТОЧНИКИ, ПОСЛЕДСТВИЯ И СТРАТЕГИИ СМЯГЧЕНИЯ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

**К. Бексейтова<sup>1,2\*</sup>, А. Байменов<sup>1,2</sup>, У. Жантикеев<sup>1</sup>, Е. Сайлауханулы<sup>1</sup>,  
А. В. Есин<sup>3</sup>, С. Михаловский<sup>4</sup>, С. Азат<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Сатбаев Университет, Алматы, Казахстан*

<sup>2</sup> *Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

<sup>3</sup> *Кафедра химической инженерии, Инженерный факультет,  
Эскишехирский технический университет, Эскишехир, Турция*

<sup>4</sup> *ANAMAD Ltd., Сассекский инновационный центр Science Park Square,  
Фалмер, Брайтон, Великобритания*

\*E-mail для контактов: bekalsu@mail.ru

Повсеместное присутствие микропластика в пресноводных экосистемах стало серьезной экологической проблемой, имеющей далеко идущие последствия как для водной жизни, так и для благополучия человека. В этом комплексном обзоре исследуется многогранная проблема загрязнения пресной воды микропластиком, углубляясь в его разнообразные источники, механизмы переноса, воздействие на окружающую среду, методы обнаружения и стратегии смягчения последствий. Экологические воздействия загрязнения микропластиком многочисленны и разнообразны, затрагивая водные организмы, пищевые сети и биоразнообразие в целом. Кроме того, загрязнение микропластиком вызывает опасения для здоровья человека из-за потенциальных рисков, связанных с потреблением загрязненных ресурсов пресной воды.

Обзор также выделяет факторы окружающей среды, влияющие на численность и распространение микропластика в пресноводных экосистемах, такие как гидрологические условия, антропогенная деятельность и биологические взаимодействия. Рассматриваются пути транспортировки и судьба микропластика, включая седиментацию, адсорбцию и биоаккумуляцию. В заключение статьи подчеркивается острая необходимость глобальной осведомленности, исследований и скоординированных действий для решения критической проблемы загрязнения пресной воды микропластиком.

**Ключевые слова:** микропластик, загрязнение пресной воды, источники, воздействие на окружающую среду.

### ВВЕДЕНИЕ

Пресноводные экосистемы, включающие реки, озера и источники подземных вод, представляют собой бесценные ресурсы, необходимые для поддержания жизни на Земле. Микропластик, который раньше считался преимущественно морской проблемой, теперь признан серьезным загрязнителем, проникающим в пресноводные водоемы по всему миру. Их источники разнообразны и связаны с фрагментацией более крупных пластиковых отходов и промышленными процессами. Поскольку микропластик сохраняется в окружающей среде, вопросы, связанные с его транспортировкой, воздействием на водную жизнь и последствиями для здоровья человека, становятся все более актуальными.

С 1940-х годов, когда производство пластмасс стало массовым, мы наблюдаем стремительный рост этой индустрии. К сожалению, вместе с удобствами и практичностью, которые принесли нам пластиковые изделия, пришла и теневая сторона – загрязнение биосферы микропластиком [1]. За последние три десятилетия мировое производство пластика выросло почти в три раза, и ожидается, что к 2050 году оно достигнет 33 миллиардов тонн [2, 3, 4]. Несмотря на рост осведомленности о пластиковом загрязнении окружающей среды и меры по его снижению, годовое производство пластика продолжает расти. Иссле-

дования [5], показали, что в обрабатывающей промышленности ежегодно образуется более 280 миллионов метрических тонн пластиковых отходов [6]. Процент мировых водных пластиковых загрязнителей, попадающих в морскую экосистему [7] на основе недавно опубликованных данных, показан на рисунке 1. Большинство крупнейших в мире загрязняющих водоемов находятся в Азии, а также несколько в Африке.

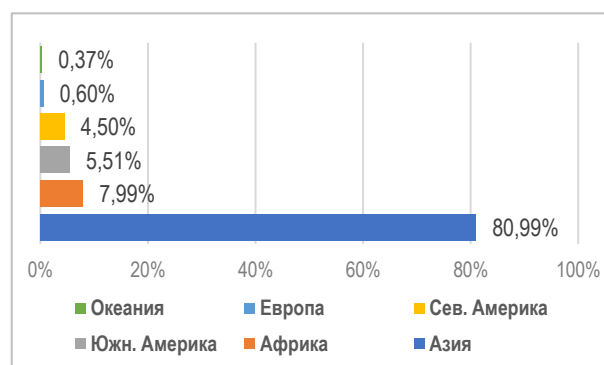


Рисунок 1. Глобальное загрязнение водных ресурсов пластиком (на долю более 1000 рек, 80% из которых расположены в Азии).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 1. Классификация микропластика

*Пластмассы* – это синтетические полимеры, которые по своей природе податливы (гибки), и им можно придавать различные формы [8]. Пластик состоит из длинных цепочек полимеров, состоящих из углерода, кислорода, водорода, кремния и хлоридов, которые получают из природного газа, нефти и угля [9]. Полиэтилен (ПЭ), полиамид (ПА), полипропилен (ПП), полиэстер (ПЭС), полиуретан (ПУ), акрил (АК), полистирол (ПС), полиэтилентерефталат (ПЭТ), поливинилхлорид (ПВХ), полиэтилен высокой плотности (ПЭВП), полиэтилен низкой плотности (ПЭНП), полиимид (ПИ), полиметилметакрилат (ПММА), политетрафторэтилен (ПФЭ), поливинилхлорид (ПВХ) и полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) являются наиболее распространенными синтетическими полимерами, на долю которых приходится 90% мирового производства пластика [10, 11]. Материалы, изготовленные из пластика, дешевы. А благодаря низкой стоимости производства, простоте, долговечности, прочности, коррозионной стойкости, хорошей тепло- и электропроводности, а также физико-химическим свойствам пластик стал важным и универсальным материалом во всех аспектах нашей жизни.

*Микропластик* – это кусочки пластика размером от миллиметра до нанометра, невидимые для человеческого глаза. Термин «микропластик» определялся по-разному разными исследователями (см. [12]), включая семинар по этой теме. Микропластик определяется как имеющий размер  $<5$  мм [13] (333 нанометра считаются практическим нижним пределом, когда для отбора проб используются нейстонные сети). Микропластики подразделяются на две группы в зависимости от их происхождения: первичные и вторичные микропластики [14].

*Первичный микропластик* представляет собой синтетические полимеры микроразмера, которые попадают непосредственно в окружающую среду в виде мельчайших частиц. Они используются в качестве отшелушивающих веществ в различных операциях, таких как химические составы, абразивные среды, химическая и нефтехимическая очистка, а также производство синтетической одежды. Их можно произвольно добавлять в такие предметы, как чистящие средства в гигиене и косметике (например, гели для душа). Они также могут быть вызваны истиранием крупных пластиковых предметов во время производства, использования или технического обслуживания, например, эрозией шин во время вождения или истиранием синтетического текстиля во время стирки. Микрошарики представляют собой форму первичного пластика (размером 2 мм), состоящего из гранул полиэтилена, полипропилена и полистирола и используемых в косметических и медицинских товарах [15].

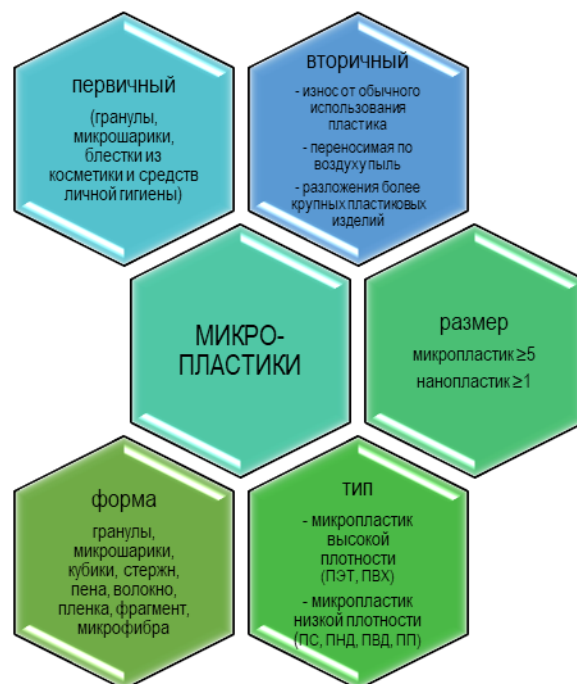


Рисунок 2. Классификация микропластика по размеру, типу и форме

*Вторичный микропластик* – это микропластик, образующийся в результате разложения более крупных пластиковых изделий на микроскопические кусочки пластика в морской экосистеме. Это происходит в результате экологических изменений, таких как микробное разложение, фотокатализ, высокотемпературное разложение, термическое разложение, гидролиз и другие процессы выветривания, связанные с неизбирательным сбросом, например, брошенными пластиковыми пакетами или непредвиденными потерями, например, рыболовными снастями. Микропластик в воде может как циркулировать, так и тонуть (рисунок 2) [16].

Микропластик имеет неправильную форму, например, кубическую, сферическую и стержневую, в зависимости от его морфологических особенностей, что следует учитывать при оценке рисков для окружающей среды и человека. Острые частицы микропластика могут вызвать токсичность, физически стимулируя организм человека. Кроме того, при синтезе пластиковых полимеров используются различные химические вещества, в зависимости от конечного использования, большинство из которых являются разрушителями жизненно-важных органов человека.

### 2. Влияние микропластика на живые организмы

Важно понимать пути воздействия микропластика на человека. Распространенными из них являются пероральный прием, вдыхание и контакт с кожей. Среди них основным путем воздействия является пероральный прием. Фактически, люди часто подвергаются воздействию микропластика несколькими способами одновременно [17].

*Пероральный прием.* Микропластик присутствует в наших повседневных потребностях, таких как питьевая вода, вода в бутылках, морепродукты, соль, сахар, чайные пакетики, молоко и т. д. Европейцы подвергаются воздействию около 11 000 частиц микропластика на человека в год из-за потребления моллюсков, а в зависимости от потребления пищи поступление пластиковых частиц в организм человека составляет 39 000–52 000 частиц на человека в год [18]. Подсчитано, что люди, заказывающие еду на вынос 4–7 раз в неделю, могут потреблять 12–203 кусочка микропластика через контейнеры [19]. Кроме того, исследования показывают, что поверхность силиконовых резиновых детских кроваток разрушается при их стерилизации паром, в ходе которой микрочастицы пластика выбрасываются в окружающую среду. По оценкам, общее количество микрочастиц пластика, попадающих в организм ребенка в течение одного года нормального кормления из бутылочки, достигает около 0,66 миллиона [20].

*Вдыхание.* Микропластик в воздухе состоит в основном из частиц и волокон полиэтилена, полистирол и полипропилена с размерами от 10 до 8000 мкм [21]. Крупнейшим источником микропластика (84%) в атмосфере являются дороги. Сообщается, что средняя концентрация микропластических волокон составляет 5,4 волокна/м<sup>3</sup> в наружном воздухе и 0,9 волокна/м<sup>3</sup> в воздухе помещений в Париже [22]. Средняя концентрация микропластика в наружном воздухе в Шанхае составляет 1,42 частиц/м<sup>3</sup>, а диапазон размеров составляет 23–5000 мкм [23]. По оценкам, ежегодное потребление микропластика колеблется от 74 000 до 121 000 частиц, если учитывать как пероральное, так и вдыхание. В легких человека обнаружены частицы микропластика размером менее 5,5 мкм и микропластические волокна размером 8,12–16,8 мкм, основными компонентами которых являются полиэтилен и полипропилен. Размер микропластика, обнаруживаемого в легочной ткани, меньше, чем в атмосфере. Это еще раз подтверждает возможность воздействия микропластика на человека при вдыхании и заставляет обратить внимание на потенциальный вред для организма человека [24].

Обычно считается, что микропластик не проходит через кожный барьер, но он все равно может увеличивать риск воздействия, откладываясь на коже. Например, использование потребительских товаров, содержащих микропластик (таких как крем для лица и очищающее средство для лица), увеличивает риск воздействия полиэтилена. Защитные чехлы для мобильных телефонов (РМРС) могут во время использования образовывать микропластик, попадающий на руки человека. Когда дети ползают или играют, они могут вступать в контакт с микропластиком на земле. Во время воздействия микропластика на кожу могут всасываться некоторые типичные пластиковые добавки, в том числе бромированные антипирены (BFR), бисфенолы (BP), триклозан (TCS) и фталаты.

Принято считать, что после попадания в организм человека микропластик выводится через желудочно-кишечный тракт и желчные пути. Однако исследователи обнаруживают существование микропластика в крови человека [25]. Люди начинают переосмысливать вред микропластика для здоровья человека.

Недавний обзор показывает, что микропластик транспортируется по всему организму посредством кровообращения, а наличие микропластика обнаружено в 15 биологических компонентах человека, таких как селезенка, печень, толстая кишка, легкие, фекалии, плацента, грудное молоко и т. д. Органами с высоким содержанием являются толстая кишка (28,1 частиц/г) и печень. (4,6 частиц/г). К основным типам обнаруженных микропластиков относятся ПЭ, ПЭТ, ПП, ПС, ПВХ и ПК. Беременные женщины и младенцы являются чувствительными людьми, подвергающимися воздействию микропластика [26].

Микропластик не только сам по себе токсичен, но и является переносчиком многих загрязняющих веществ, попадающих в биологические ткани и органы.

### 3. Транспорт и судьба микропластика

Среди водной среды больше всего исследований было проведено по распространенности и характеристикам микропластика в морской воде. Лишь в последнее время проводятся исследования микропластика в различных водных средах, включая пресную, сточные и грунтовые воды.

Интенсивная экономическая деятельность ухудшает качество воды, и было высказано предположение, что на концентрацию микропластика влияет экономическая деятельность, основанная на корреляции между низким качеством воды и высокими концентрациями микропластика. Некоторые частицы, возможно, мигрировали из отдаленных мест, но корреляция между микропластиком и плотностью населения указывает на то, что пластиковые частицы произошли из земных источников. В частности, содержание мелкого микропластика было самым высоким в регионах, связанных с более интенсивной антропогенной деятельностью. Однако даже в регионах с низкой плотностью населения высокие концентрации микропластика обнаруживаются в периферийных точках промышленно развитых территорий. В целом уровень загрязнения снижался по мере увеличения расстояния от устья до открытого моря. Например, концентрация микропластика уменьшалась по мере увеличения расстояния от устья Янцзы до Восточно-Китайского моря. Напротив, на тосканском побережье Италии количество плавающего микропластика увеличивалось по мере удаления от побережья [27].

Исследование характеристик сезонного распределения микропластика на шести пляжах Циндао, Китай, показало, что географическая изменчивость микропластика связана с прибрежными течениями [28]. Количество микропластика на шести пляжах увеличивалось с востока на запад, что совпадало с направлением океанского течения.

Изменения погоды, такие как осадки, снегопады, таяние снегов и тайфуны, среди других факторов окружающей среды, также влияют на обилие микропластика. В Мраморном море Турции наибольшая концентрация микропластика обнаружена осенью, а наименьшая – летом [29].

Хотя были проведены обширные исследования микропластика морской воды, информации о микропластике пресной воды недостаточно [30]. Тем не менее, исследования распространенности и поведения микропластика в пресной воде набирают обороты. Важность пресной воды нельзя недооценивать, учитывая, что она является источником воды, которая подается в домохозяйства посредством водоочистки.

*Трансформация микропластика в пресноводных экосистемах под воздействием биосферных компартиментов.* Внутренние пресноводные водоемы внутри и вокруг районов производства пластмасс подвергаются непосредственному воздействию окружающей среды, что отражает наличие микропластика в пресноводных водоемах. Также были проведены исследования содержания микропластика в отложениях по местам и сезонам, чтобы понять влияние окружающей среды на пресную воду. Микропластик (13,3 шт./л), что более чем в два раза превышает количество в контрольной зоне, был обнаружен в крупнейшей текстильной промышленной зоне Азии, расположенной в Китае. Из-за производственной и торговой деятельности близлежащей текстильной промышленности в местной пресной воде и отложениях был обнаружен высокий уровень загрязнения микропластиком. В поверхностных водах озера Окс-Боу в Нигерии 73,1% обнаруженного микропластика представляло собой гранулы, и было высказано предположение, что большое количество бисера, вероятно, было вызвано культурным наследием, связанным с производством бисера и использованием бисера в качестве рыболовных снастей [31]. Озеро Тайху в бассейне реки Тайху отличалось относительно высокой концентрацией микропластика (3,4–25,8 шт./л); Это можно объяснить тем, что промышленность и сельское хозяйство обеспечивают 14% валового внутреннего продукта Китая. Доминирующей частицей был целлофан, который относят к типичным полусинтетическим материалам [32].

По данным анализа проб воды и донных отложений в прудах Европейского Карпатского бассейна (регион Венгрии), концентрация микропластика на выходе из пруда всегда была ниже, чем на входе. Можно предположить, что пруд служит хранилищем микропластика. Наземные источники являются важными источниками микропластика в окружающей среде, а пруды для сбора ливневых вод также играют роль в транспортировке микропластика с суши в водную среду [33].

Поскольку в разных регионах пресноводные водоемы разного размера и с разным рельефом, гидрологический процесс является одним из важнейших

факторов, влияющих на численность и распространение микропластика. Количество микропластика, как правило, увеличивается в нижнем течении рек Сучжоу и Хуанпу в Китае, а уровень загрязнения микропластиком высок в городских центрах и устьях рек. Напротив, количество микропластика в виде волокон имеет тенденцию к уменьшению от небольших городских водоемов к морю.

*Факторы, влияющие на распространение микропластика в пресной воде.* Микропластик, присутствующий в пресной воде, различается по численности и распределению в зависимости от присущих ему свойств и факторов окружающей среды. Результаты анализа реальных проб окружающей среды из прудов с ливневой водой в Дании подтвердили, что мелкие частицы более распространены, чем крупные, из-за свойств микропластика. Кроме того, согласно Закону удара, конечная скорость частицы пропорциональна квадрату диаметра частицы; поэтому крупные частицы имеют тенденцию либо плавать на поверхности воды, либо опускаться на дно пруда [34]. Пробы воды из реки Чиваленгке в Индонезии содержали множество мелких частиц микропластика, тогда как крупные частицы были обнаружены в отложениях. Плотность полимера, а также конечная скорость, обусловленная размером частиц микропластика, могут влиять на седиментацию пластиковых частиц.

Плавающие твердые частицы вдоль рек Рейн и Маас в Нидерландах показали обилие микропластика; кроме того, в отложениях эстуария обнаружено большое количество микропластика [35]. Микропластик высокой плотности со временем оседает в отложениях, но и микропластик низкой плотности также часто оседает.

Это происходит из-за взаимодействия микропластика с агрегатами, биообрастаниями и фекалиями, которые могут улучшить седиментацию за счет снижения плавучести микропластика и увеличения плотности частиц. Ниже по течению реки Накдонг в Корее в отложениях обнаружено в 2827 раз больше микропластика, чем в поверхностном слое. Частицы с большими размерами и шероховатой поверхностью легко образуют биопленки и больше подвержены деградации. Из-за свойств микропластика и взаимодействия с окружающими веществами микропластик не распределяется равномерно в водной системе. В пользу этого свидетельствует различное распределение микропластика в пробах воды и донных отложений, полученных с помощью планктонных сетей из озера Тайху, Китай [36].

Распространение микропластика подвержено влиянию окружающей среды, прежде всего антропогенным и гидродинамическим факторам. В девяти озерах Патагонии в Аргентине обнаружены микропластики, главным образом, из городских поселений, текстиля и рыболовства. Микропластик, обнаруженный в озере Онтарио в Канаде, также коррелирует с близостью к городским районам, что указывает на

жизненно важный вклад городских территорий в производство микропластика.

Антропогенные вещества на основе красителей и различные химические композиции, такие как целлюлоза, полиэтилен, ПЭТ и ПВХ, происходят из различных источников, включая промышленность пластмасс, свалки, дороги и сточные воды. Химический состав, который может конкретно подтвердить влияние городских центров, представляет собой ацетат целлюлозы, который в основном содержится в выбрасываемых коммерческих сигаретных окурках [37]. В подтверждение этого пространственное распределение микропластика, обнаруженного в реках Сучжоу и Хуанпу в Китае, показало тенденцию к увеличению в городах и устьевых водных путях. Концентрация микропластика в озере Мид в США была высокой в местах прямого и искусственного использования и внесения. Широко известно, что сточные воды отражают все особенности города и напрямую влияют на пресную воду. Однако сточные воды очистных сооружений из трех рек водосбора Трента в Великобритании не привели к значительному увеличению концентрации микропластика, что подтверждает возможность существования различий в составе сточных вод. В целом, коммерческие и промышленные районы выделяют больше микропластика, чем жилые районы и районы автомагистралей [38]. Примечательно, что на Тибетском нагорье в Китае был обнаружен полиэтилен, который, как было показано, произошел из листов, используемых для мульчирования поверхности обрабатываемых почв во время выращивания сельскохозяйственных культур. Поскольку состав микропластика может варьироваться в зависимости от землепользования вокруг пресной воды, было предложено учитывать использование окружающих земель при анализе нагрузки микропластиком. Инновационным фактором, отражающим интенсивность антропогенной деятельности, является индекс ночной освещенности, который могут учитывать туристы и жители [39].

*Используемые методы отбора проб пресноводной среды.* Планктонную сеть, обычно используемую для извлечения микропластика из морской воды, сложно использовать в пресной воде из-за различных условий, преобладающих в этой среде. Планктонную сеть нельзя использовать, если водоем не велик и недостаточно глубок, чтобы вместить троллей. Кроме того, необходимы такие объекты, как лодки и мосты. Более того, измеренная величина фильтрации может быть неточной даже при измерении расходомером. В трех реках водосборного бассейна Трента в Великобритании вместо сетей «Мантэ» и «Нейстон» использовался дночерпательный метод, поскольку отбор проб был ограничен небольшими пресноводными водоемами [40]. Следует выбрать метод отбора проб, подходящий для среды отбора проб пресной воды.

Размер ячейки является одним из решающих факторов при выборе метода отбора проб. На реке Офан-

то в Италии, когда для отбора проб использовались планктонные сети с размером ячеек 333 мкм, через сеть проходили мелкие частицы, что приводило к занижению концентрации микропластика. Согласно исследованию грабницы в концентрации микропластика в зависимости от используемого размера ячейки, при использовании ячейки размером 80 мкм было обнаружено до 100 000 раз больше частиц микропластика, чем при использовании ячейки 450 мкм [41]. Поскольку размер ячеек может повлиять на концентрацию микропластика в полевых условиях, необходимо соблюдать осторожность при выборе подходящего размера ячеек.

Для удаления органических веществ из проб использовалось разложение с использованием кислотных и основных растворов, но поскольку они растворяют полимеры и неэффективны при удалении некоторых органических веществ, был предложен альтернативный метод, использующий окислительную обработку. Мокрое перекисное окисление (МПО; реакция Фентона) не оказывает существенного влияния на полимеры и эффективно удаляет органические вещества. Однако из-за высокой температуры (60–100 °C), возникающей в процессе окисления, некоторые полимеры, такие как ПА и ПЭ, плавятся или их масса уменьшается. В результате реакции окисления МПО, а также условий выветривания окружающей среды микропластики обесцвечиваются, что приводит к обнаружению прозрачных частиц при анализе микропластика [42]. При выборе окислителя для удаления органических веществ следует учитывать его влияние на повышение температуры, чтобы можно было поддерживать температуру ниже 60 °C, и проводить дальнейшие исследования по ограничению обесцвечивания микропластика.

Хотя более плотные растворы лучше удаляют микропластик из образцов, необходимо учитывать несколько факторов, таких как токсичность и стоимость. Хлорид цинка имеет плотность 1,7 г/см<sup>3</sup>, но имеет недостатки, связанные с коррозией и токсичностью. Дигидрат вольфрамата натрия (Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) и полистратам натрия (3Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>·9WO<sub>3</sub>·2H<sub>2</sub>O) содержат барит и имеют высокую плотность 1,4–1,6 г/см<sup>3</sup>, но они дороги. Поскольку NaCl имеет плотность 1,0–1,2 г/см<sup>3</sup>, его сложно отделить от микропластика с высокой плотностью, но он недорогой, обладает высокой растворимостью и низкой токсичностью. По этой причине во многих исследованиях в качестве раствора разделения по плотности был выбран NaCl. Для эффективного разделения микропластика необходимо разработать соответствующий протокол разделения по плотности.

*Идентификация микропластика.* Для выявления микропластика в водных системах было внедрено несколько аналитических инструментов.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) может анализировать поверхность микропластика на наноуровне, диапазон обнаружения не выражен, по-

скольку он не может анализировать типы микропластика. В начале исследования количественная оценка микропластика проводилась невооруженным глазом или с помощью микроскопа. Увеличилась частота использования приборов инфракрасного анализа для качественной оценки различных размеров и типов микропластика. Кроме того, был применен режим ослабленного полного отражения и проведен дополнительный анализ, такой как сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)-энергодисперсионная спектроскопия (ЭДС) или рентгеновская компьютерная томография (РКТ). Недавно стал использоваться рамановский спектрометр с более низким пределом обнаружения микропластика, чем у методов анализа на основе инфракрасного излучения.

Однако идентифицировать микропластики на наноуровне по-прежнему сложно из-за ограничений спектроскопического анализа, поэтому предлагается пиролизгазовая хроматография-масс-спектрометрия (Py-GC-MS).

*Анализ микропластика в сточных водах.* Метод анализа микропластика можно разделить на спектрометрический и термический анализ. Микропластик размером 1–5 мм можно различить невооруженным глазом, а размер в сотни микрон можно проанализировать с помощью оптического микроскопа. ИК-Фурье и рамановская спектроскопия в основном используются для анализа микропластиков размером в десятки микрометров. Термический анализ, такой как Py-GC-MS или термическая экстракция, десорбция, газовая хроматография-масс-спектрометрия (TED-GC-MS), рекомендуется для наноразмерных частиц [43].

По сравнению со спектрометрией, которая анализирует каждую частицу, термический анализ требует большего количества микропластика для достижения предела обнаружения. Спектроскопия требует много времени, поскольку ее необходимо проверить на наличие каждой частицы, подозреваемой в принадлежности к микропластику. Черные пигментированные волокна или прозрачные фрагменты часто недооцениваются, поскольку их невозможно идентифицировать. Они также могут быть переоценены, поскольку частицы немикрoпластика иногда идентифицируются как микропластики, или частицы микропластика при идентификации распадаются на более мелкие частицы. Чтобы четко отличить микропластик от частиц немикрoпластика, микропластик либо окрашивали по методу Роуза-Бенгала, либо улучшали процессы идентификации и расщепления, либо использовали отбеливающий реагент для удаления любых органических веществ, прикрепившихся к поверхности микропластика [44].

Размер сетки, используемой для отбора проб, постепенно уменьшается: от сетки, используемой в планктонной сети, используемой для сбора микропластика с большой площади, богатой органическими веществами, до сетки, используемой в фильтре,

используемом для отбора проб для анализа мелкого микропластика. Однако в спектроскопическом анализе, который может подтвердить форму, размер и состав частиц микропластика, частота ложноположительных результатов увеличивалась по мере уменьшения размера частиц. Когда размер частиц микропластика превышал 100 мкм, 83% частиц были визуально идентифицированы как пластиковые с помощью спектроскопии, тогда как процент подтверждения составлял только 63% при размере менее 50 мкм. Волокнистое черное вещество, обнаруженное в реках Рейн и Маас в Нидерландах, было идентифицировано как микропластик под микроскопом, но не было идентифицировано с помощью инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье. Типичный размер микропластика для идентификации полимера методом инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье ослабленного полного отражения составляет (ATR-FTIR) > 500 мкм [45]. Даже успешное извлечение микропластика из пресноводной среды может вызвать трудности в их интерпретации из-за ограничений аналитического оборудования. Из-за этого микропластик мелкого размера может быть недооценен; таким образом, необходимо проявлять осторожность при интерпретации в зависимости от размера микропластика.

#### **4. Состояние пластикового загрязнения водных экосистем Казахстана**

В Казахстане было проведено исследование с целью установить наличие микро- и макропластика в высокогорном озере Маркаколь. Цель исследования заключалась в определении пространственного распределения и изменчивости пластикового загрязнения вводной экосистеме озера. Исследование выявило наличие микро- и макропластика в озере и его основных притоках с различной концентрацией в зависимости от места отбора проб. Исследование показало, что концентрация микропластика в озере Маркаколь различается в разных зонах. В акватории озера общая концентрация микропластика составила 837,4 мкг/м<sup>3</sup>. Концентрации микропластика размером менее 0,315 мм установлены на разных участках озера до 520,8 мкг/м<sup>3</sup> и 113,0 мкг/м<sup>3</sup>. Кроме того, исследование выявило высокие концентрации микропластика в притоках озера с общей концентрацией 150 мкг/м<sup>3</sup>. Размеры пластикового мусора, обнаруженного как в речных водах, так и в акватории озера, варьировали от мезопластического мусора до частиц микропластика, полимерный состав представлен ПЭТ, ПЭ-ВД, ПЭБД, ПП и ПС. Исследование также показало наличие пластикового загрязнения, вызванного местной деятельностью человека, такой как рыболовство, туризм и неправильное удаление отходов. Кроме того, в статье подчеркивается важность анализа микропластика в водоемах для понимания его воздействия на водную среду и потенциального влияния на здоровье человека [46].

Исследование Баймуканова М. и соавторов было посвящено оценке воздействия пластикового загрязнения на биоразнообразие и экологию Каспийского моря в Казахстане. В ходе исследования были обнаружены различные виды микропластика и другие артефакты на береговой линии и побережье Каспийского моря, что указывает на новый тип загрязнения в этом районе. Наличие микропластика представляет угрозу для морских животных и может привести к накоплению загрязняющих веществ в пищевой цепи. В статье подчеркивается необходимость принятия мер по снижению пластикового загрязнения и защите морской экосистемы. Исследование пластикового загрязнения Каспийского моря выявило несколько конкретных выводов: на береговой линии и побережье Каспийского моря впервые обнаружены различные виды микропластика и другие микро- и макроартефакты; на побережье мыса Тупкараган обнаружены рыболовные сети из синтетических полимерных материалов, полиэтиленовые пакеты, пластиковые бутылки и другие твердые бытовые отходы [47].

Результаты этих исследований могут быть использованы для более масштабных проектов по борьбе с загрязнением микропластиком.

#### **5. Рекомендации по сокращению потребления пластика**

Пресная вода, ближайшая к суше, в первую очередь подвергается воздействию наземных отходов, в то время как сточные воды являются результатом антропогенной деятельности, а морская вода подвергается воздействию морской промышленности и является конечным пунктом назначения внутренних вод. Поэтому любая водная среда важна. Ежедневно образуется большое количество пластиковых отходов, которые сбрасываются в водную среду без адекватных процессов переработки отходов. Характеристики сбрасываемых пластиковых отходов зависят от антропогенной деятельности окружающей территории и факторов окружающей среды. Пластмассы, попадающие в окружающую среду, не находятся в промышленном виде, а обычно подвергаются коррозии и фрагментации под воздействием факторов окружающей среды. Состаренный микропластик поглощает высокие концентрации органических химикатов. Поэтому оценку токсичности следует проводить с использованием состаренного микропластика, а не промышленного пластика. Необходима дополнительная оценка токсичности вредных веществ, таких как тяжелые металлы и СО<sub>2</sub>, которые легко адсорбируются старым микропластиком. Одним из наиболее существенных ограничений исследований микропластика является отсутствие исследований пластиковых отходов в отложениях.

Согласно отчету ЮНЕП, сумма пластиковых отходов, обнаруженных на пляжах и плавающих в воде, составляет ~30%, тогда как большая часть морских отходов, 70%, оседает в отложениях [48]. Морские отходы, попадающие в осадок, сложно утилизиро-

вать, и они представляют угрозу для морских экосистем, поскольку потенциально токсичны. В частности, бентосные виды могут легко проглатывать пластиковые отходы, найденные на морском дне. Когда происходит изменение океанского течения или погодное явление, происходит вертикальное перемешивание слоя морской воды, а пластиковые отходы высвобождаются и перемещаются.

Поскольку водные системы являются конечным пунктом назначения микропластика, необходимо регулировать различные отрасли промышленности и все виды пластиковых изделий, производимых и сбрасываемых на землю, чтобы предотвратить увеличение количества пластиковых отходов в водных системах. Существует необходимость в эффективном управлении отходами и улучшении дренажных систем на суше. Эту проблему невозможно решить путем регулирования одной или двух стран, но глобальная коалиция и регулирование станут отличным началом решения проблемы. Кроме того, для каждой водной среды должна быть разработана технология удаления микропластика.

Факторы, влияющие на численность и распространение микропластика в водных средах, можно разделить на два типа. Это присущие микропластику свойства, такие как гидрофобность, удельный вес и размер, а также факторы окружающей среды, такие как биологические взаимодействия в водной среде, метеорологические явления и промышленные объекты вблизи водной системы.

Пластиковые отходы, которые уже были выброшены в окружающую среду, продолжают разлагаться и угрожать жизни на Земле. Чтобы предотвратить дальнейшее ухудшение ситуации, необходимо разработать комплексную систему управления отходами, чтобы остановить безрассудный сброс отходов в окружающую среду. Для точных исследований микропластика необходимо сначала определить методы сбора проб и предварительной обработки; затем необходимо разработать метод идентификации микропластика на наноуровне. Необходимо изучить оценку токсичности микропластика и связанных с ним загрязнителей, а также всех факторов окружающей среды, которые могут повлиять на микропластик. Наконец, необходимо исследовать поведение микропластика, контролировать путь его попадания в организм человека и минимизировать концентрацию микропластика, которая может попасть в организм человека. Если пластиковые отходы невозможно реально контролировать, предлагается провести исследования допустимого количества микропластика в организме человека без ущерба для здоровья человека.

В 2019 году Европейское агентство по химическим веществам предложило запретить добавлять микропластик в косметику, бытовую химию, краски и другую продукцию. Пока этот законопроект еще находится в стадии обсуждения. В США запрещено производить косметику и бытовую химию с микро-



пластиком с 2017 года, а продавать – с 2018 года. Аналогичный запрет действует в Нидерландах, Южной Корее, Канаде, Франции, на Тайване, в Великобритании, Швеции, Италии, Индии, Таиланде, Ирландии, Аргентине, Китае и Новой Зеландии. По данным Европейского химического агентства, в Европе ежегодно в окружающую среду попадает около 42 тыс. т микропластика, который специально добавлялся в различные материалы, и еще около 176 тыс. т случайно образованных полимерных частиц.

Еврокомиссия уже работает над законом о введении мер по сокращению микропластикового загрязнения окружающей среды на 30% к 2030 году.

Во многих странах приняты законы и конвенции об уменьшения использования пластика:

- Европа:
  - *Европейский союз*: Директива 2019/904 об одноразовых пластиковых изделиях.
  - *Франция*: Закон о запрете одноразовых пластиковых изделий.
  - *Германия*: Закон об упаковке.
  - *Великобритания*: Закон об окружающей среде.
- Азия:
  - *Китай*: Закон о защите окружающей среды.
  - *Индия*: Закон об управлении пластиковыми отходами.
  - *Япония*: Закон о переработке ресурсов.
  - *Южная Корея*: Закон об управлении отходами.
- Африка:
  - *Кения*: Закон о запрете одноразовых пластиковых пакетов.
  - *Руанда*: Закон о запрете одноразовых пластиковых пакетов.
  - *Танзания*: Закон о запрете одноразовых пластиковых пакетов.
- Америка:
  - *Канада*: Закон о защите окружающей среды.
  - *США*: Закон о сохранении и восстановлении ресурсов.
- Океания:
  - *Австралия*: Закон об охране окружающей среды и сохранении биоразнообразия.
  - *Новая Зеландия*: Закон об управлении отходами.

Существует необходимость в эффективном управлении отходами и предлагаются следующие меры смягчения загрязнения микропластиком:

- *Сокращение использования пластика*: уменьшение использования одноразовых пластиковых изделий, таких как пакеты, соломинки, столовые приборы и т. д.; поощрение использования многоразовых альтернатив, таких как тканевые сумки, металлические соломинки и т. д.; увеличение использования биоразлагаемых и компостируемых пластиковых изделий; разработка инновационных материалов, которые могут заменить пластик.

- *Улучшение системы сбора и переработки пластика*: увеличение количества пунктов сбора пластиковых отходов; повышение эффективности переработки пластика; разработка новых технологий переработки пластика; поощрение использования переработанного пластика в производстве новых продуктов.

- *Предотвращение попадания пластика в окружающую среду*: установка фильтров на сточных водах, чтобы предотвратить попадание микропластика в водоемы; уборка пластиковых отходов с пляжей, рек и океанов; проведение образовательных кампаний, чтобы повысить осведомленность о проблеме загрязнения микропластиком.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этом обзоре обобщаются данные о распространении и распределении микропластика в воде, основанные на недавних и высоко оцененных публикациях. Кроме того, подробно рассматриваются факторы окружающей среды, влияющие на микропластик, и его токсическое воздействие.

Несмотря на многочисленные исследования микропластика в водных системах, существует пробел в изучении микропластика размером менее 1,5 мкм. Это частично связано с ограничениями аналитических методов и неадекватным контролем за потерей микропластика во время отбора проб и предварительной обработки. Кроме того, отсутствие стандартизированных методов отбора проб и предварительной обработки для анализа микропластика затрудняет сравнение результатов исследований. Тем не менее, имеющиеся исследования выявили факторы окружающей среды, которые могут влиять на микропластик, и определили направления для будущих исследований.

Исследования в Казахстане показали наличие микро- и макропластика в высокогорном озере Маркаколь и Каспийском море. Эти исследования выявили пространственное распределение и изменчивость пластикового загрязнения в водных экосистемах. Результаты этих исследований подчеркивают важность изучения микропластика в водных экосистемах для понимания его воздействия на окружающую среду и потенциального влияния на здоровье человека.

Необходима систематизация результатов исследований путем стандартизации методов анализа микропластика и разработки технологий для анализа пластика на микро- и наноуровне. Исследования токсичности микропластика в окружающей среде остаются ограниченными.

Требуются исследования микропластика, свойства которого изменились из-за старения и загрязнений, прикрепленных к нему. Поскольку микропластик легко изменяется под воздействием окружающей среды, необходим постоянный мониторинг, а не разовый отбор проб. Особое внимание следует уделить совершенствованию методов управления и переработки пластиковых отходов.



### Благодарности

Работа проводилась при грантовом финансировании Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан. ИРН AP14869499-2022-2024 гг.

### ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Geyer R., Jambeck J. R., Law K. L., Production, use, and fate of all plastics ever made // Science Advances, – 2017. 3(7). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Plastic Europe, 2020. Plastics – the Facts 2020. Plastic Europe. Poole, M.A., O'Farrell, P.N., 1971. The assumptions of the linear regression model. Trans. Inst. Br. Geogr. 52, 145. <https://doi.org/10.2307/621706>
- Lord R., Plastics and Sustainability: A Valuation of Environmental Benefits, Costs and Opportunities for Continuous Improvement, <https://www.plasticpackagingfacts.org/wp-content/uploads/2016/11/ACC-report-July-2016.pdf>, accessed December 13, 2020
- Garside M., Global Plastic Production 1950–2018, accessed October 9, 2020. <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950>
- Sedlak, D. L., Three lessons for the microplastics voyage // Environ. Sci. Technol. – 2017, 51 (14), 7747– 7748. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03340>
- Hartmann N.B.; Hüffer T.; Thompson R.C.; Hassellöv M.; Verschoor A.; Daugaard A. E.; Rist S.; Karlsson T.; Brennholt Matthew Cole M.; Herrling M. P.; Hess M. C.; Ivleva N. P.; Lusher A. L.; Wagner M., Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris // Environ. Sci. Technol. – 2019, 53 (3), 1039–1047. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05297>
- Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E., & Purnell, P. (2018). An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling // Journal of Hazardous Materials, 344, 179–199. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014>
- Horodytska O, Cabanes A, Fullana A (2019) Plastic waste management: current status and weaknesses // Plastics in the Aquatic Environment – Part I. – P. 289–306. [https://doi.org/10.1007/978\\_2019\\_408](https://doi.org/10.1007/978_2019_408)
- Eriksen, M. (2014, December 10). Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea // PLOS ONE. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0111913>
- Eriksen, M., Lebreton, L. C. M., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borerro, J. C., Galgani, F., Ryan, P. G., & Reisser, J. (2014). Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea // PLoS ONE, 9(12), e111913. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>
- Duis, K., & Coors, A. (2016). Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects // Environmental Sciences Europe, 28(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-015-0069-y>
- Eerkes-Medrano, D., Thompson, R. C., & Aldridge, D. C. (2015). Microplastics in freshwater systems: A review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs // Water Research, 75, 63–82. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.012>
- Hernandez, L. M., Yousefi, N., & Tufenkji, N. (2017). Are There Nanoplastics in Your Personal Care Products? // Environmental Science & Technology Letters, 4(7), 280–285. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00187>
- Horton, A. A., Walton, A., Spurgeon, D. J., Lahive, E., & Svendsen, C. (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities // Science of the Total Environment, 586, 127–141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>
- Law, K. L., & Thompson, R. C. (2014). Microplastics in the seas // Science, 345(6193), 144–145. <https://doi.org/10.1126/science.1254065>
- Van Cauwenberghe, L., Devriese, L., Galgani, F., Robbens, J., & Janssen, C. R. (2015). Microplastics in sediments: A review of techniques, occurrence and effects // Marine Environmental Research, 111, 5–17. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.06.007>
- Verster, C., Minnaar, K., & Bouwman, H. (2017). Marine and freshwater microplastic research in South Africa // Integrated Environmental Assessment and Management, 13(3), 533–535. <https://doi.org/10.1002/ieam.1900>
- Wagner, M. (2020, November 13). Freshwater Microplastics. <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/42902>
- Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and Human Health: A Micro Issue? // Environmental Science & Technology, 51(12), 6634–6647. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00423>
- Microplastics ingested by humans can be found in every organ including the brain, new study finds, By Euronews, Published on 30/08/2023, <https://www.euronews.com/next/2023/08/30/microplastics-could-be-widespread-in-organs-and-impact-behaviour-new-study-suggests>
- Homin K., Jiyeon K., Seonghyeon J., Junho L., Chaehwi L., Yejoon Y., Microplastics in water systems: A review of their impacts on the environment and their potential hazards, Vol. 9, Issue 3, March 2023, e14359. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14359>
- Barboza L.G.A., Vethaak A.D., Lavorante B.R.B.O., Lundebye A.K., Guilhermino L., Marine Microplastic Debris: An Emerging Issue for Food Security, Food Safety and Human Health // Mar. Pollut. Bull. 2018,133, 336–348. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.047>
- Vethaak A. D., Legler J., Microplastics and Human Health // Science 2021, 371(6530),672–674. <https://doi.org/10.1126/science.abe5041>
- Murphy F., Ewins C., Carbonnier F., Quinn B., Waste water Treatment Works (WwTW) as a Source of Microplastics in the Aquatic Environment // Environ. Sci. Technol. – 2016, 50(11), P. 5800–5808. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05416>
- Yin J., Ju Y., Qian H., Wang J., Miao X., Zhu Y., Zhou L., Ye L., Nanoplastics and Microplastics May Be Damaging Our Livers // Toxics. – 2022 Oct; 10(10):586. <https://doi.org/10.3390/toxics10100586>
- Scheurer M., Bigalke M., Microplastics in Swiss Floodplain Soils // Environ. Sci. Technol. 2018;52:3591–3598. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06003>
- Corradini F., Meza P., Eguiluz R., Casado F., Huerta-Lwanga E., Geissen V., Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge

- disposal. // *Sci. Total Environ.* – 2019;671:411–420.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.368>
28. Lwanga E.H., Mendoza-Vega J., Quej V.K., Chi J.D.L.A., Del Cid L.S., Chi C., Escalona-Segura G., Gertsen H., Salánki T., Van Der Ploeg M., et al. Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain // *Sci. Rep.* – 2017;7:14071. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14588-2>
29. Mattsson K., Johnson E.V., Malmendal A., Linse S., Hansson L.-A., Cedervall T., Brain damage and behavioural disorders in fish induced by plastic nanoparticles delivered through the food chain // *Sci. Rep.* – 2017; 7:11452. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-10813-0>
30. Dris R., Gasperi J., Saad M., Mirande C., Tassin B., Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? // *Mar. Pollut. Bull.* – 2016;104:290–293.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.01.006>
31. Prata J.C. Airborne microplastics: Consequences to human health? // *Environ. Pollut.* – 2018;234:115–126.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.043>
32. Gautam R., Jo J., Acharya M., Maharjan A., Lee D., K.C. P.B., Kim C., Kim K., Kim H., Heo Y., Evaluation of potential toxicity of polyethylene microplastics on human derived cell lines // *Sci. Total Environ.* – 2022; 838:156089.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156089>
33. Kye H., Kim J., Ju S., Lee J., Lim Ch., Yoon Y., Microplastics in water systems: A review of their impacts on the environment and their potential hazards // *Heliyon*, Vol. 9, Issue 3, March 2023,  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14359>
34. Zhang D., Cui Y., Zhou H., Jin Ch., Yu X., Xu Y., Li Y., Zhang Ch., Microplastic Pollution in Water, Sediment, and Fish from Artificial Reefs Around the Ma'an Archipelago, Shengsi, China 703 // *Science of The Total Environment*, 2020,  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134768>
35. Baini M., Fossi M.C., Galli M., Caliani I., Campani T., Finoia M.G., Panti C., Abundance and characterization of microplastics in the coastal waters of Tuscany (Italy): the application of the MSFD monitoring protocol in the Mediterranean Sea // *Mar. Pollut. Bull.* 133 (2018) 543–552. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.06.016>
36. Gao F., Li J., Hu J., Sui B., Wang Ch., Sun Ch., Li X., Ju P. The seasonal distribution characteristics of microplastics on bathing beaches along the coast of Qingdao, China // *Sci. Total Environ.* 783 (2021), 146969.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146969>
37. Zhu J., Zhang Q., Li Y., Tan Sh., Kang Zh., Yu X., Lan W., Cai L., Wang J., Shi H., Microplastic pollution in the Maowei Sea, a typical mariculture bay of China // *Sci. Total Environ.* 658 (2019) 62–68.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.192>
38. Ory N.C., Lehmann A., Javidpour J., Stöhr R., Walls G.L., Clemmesen C., Factors Influencing the Spatial and Temporal Distribution of Microplastics at the Sea Surface – A Year-Long Monitoring Case Study from the Urban Kiel Fjord, Southwest Baltic Sea // *Science of The Total Environment*, 736 (2020), 139493.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139493>
39. Deng H., Wei R., Luo W., Hu L., Li B., Di Y., Shi H., Microplastic pollution in water and sediment in a textile industrial area, *Environ. Pollut.* 258 (2020), 113658.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113658>
40. Oni B.A., Ayeni A.O., Agboola O., Oguntade T., Obanla O., Comparing microplastics contaminants in (dry and raining) seasons for Ox- Bow Lake in Yenagoa, Nigeria, *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 198 (2020), 110656.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110656>
41. Ziajahromi S., Drapper D., Hornbuckle A., Rintoul L., Leusch F. D. L., Microplastic pollution in a stormwater floating treatment wetland: detection of tyre particles in sediment // *Sci. Total Environ.* 713 (2020),  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136356>
42. G. Bordos, B. Urbányi, A. Micsinai, B. Kriszt, Z. Palotai, I. Szabó, Z. Hantosi, S. Szoboszlai, Identification of microplastics in fish ponds and natural freshwater environments of the Carpathian basin, Europe // *Chemosphere* 216 (2019) 110–116.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.110>
43. Liu F., K. Olesen B., Borregaard A. R., Vollertsen J., Microplastics in urban and highway stormwater retention ponds // *Sci. Total Environ.* 671 (2019) 992–1000.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.416>
44. Hurley R., Woodward J., Rothwell James J., Microplastics integrating the coastal planktonic community in the inner zone of the Río de la Plata estuary (South America) // *Environmental Pollution*, Vol. 243, Part A, December 2018, P. 134–142.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.064>
45. Alfonso M.B., Scordo F., Seitz C., Manstretta G.M.M., Ronda A.C., Arias A.H., Tomba J.P., Silva L.I., Perillo G.M.E., Piccolo M.C., First evidence of microplastics in nine lakes across Patagonia (South America) // *Sci. Total Environ.* 733 (2020),  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139385>
46. Madibekov A., Ismukhanova L., Sultanbekova B., Zhadi A., Zhumatayev S., Musakulkyzy A., Bolatov K., Madibekova A., Micro- and Macroplastics Pollution in the Aquatic Environment of Markakol Lake Located in the Protected Area on the Mountain Slopes of the Southern Part of the Kazakh Altai Mountains // *Preprints*, 13 September 2023, P. 5–15.  
<https://doi.org/10.20944/preprints202309.0851.v1>
47. Баймуканов М.Т., Баймуканова Ж.М., Иргели, Казахстан о пластиковом загрязнении и потенциальном его воздействии на биоразнообразие каспийского моря // *Новости науки Казахстана.* – № 2 (149). – 2021. – С. 1–5. [Baymukanov M.T., Baymukanova Zh.M., Irgeli, Kazakhstan o plastikovom zagryaznenii i potentsial'nom ego vodeystvii na bioraznoobrazie kaspiskogo morya // *Novosti nauki Kazakhstana.* – No. 2 (149). – 2021. – P. 1–5. (In Russ.)]
48. Hitchcock J.N., Storm events as key moments of microplastic contamination in aquatic ecosystems // *Sci. Total Environ.* 734 (2020).  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139436>

## ТҰШЫ СУДЫ МИКРОПЛАСТИКАМЕН БАСТАУ: КӨЗДЕР, САЛДАРЛАР ЖӘНЕ АЗАРТУ СТРАТЕГИЯЛАРЫ (ӘДЕБИ ШОЛУ)

**К. Бексейтова<sup>1,2\*</sup>**, А. Байменов<sup>1,2</sup>, У. Жантеев<sup>1</sup>, Е. Сайлауханұлы<sup>1</sup>,  
А. В. Есин<sup>3</sup>, С. Михаловский<sup>4</sup>, С. Азат<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Сәтбаев атындағы университет, Алматы, Қазақстан*

<sup>2</sup> *Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан*

<sup>3</sup> *Инженерлік факультетінің химиялық инженерия кафедрасы,  
Эскишехир техникалық университеті, Эскишехир, Түркия*

<sup>4</sup> *ANAMAD Ltd, Сассекс инновациялық орталығы ғылыми парк алаңы,  
Фалмер, Брайтон, Ұлыбритания*

*\*Байланыс үшін E-mail: bekalsu@mail.ru*

Тұщы су экожүйелерінде микропластиктердің барлық жерде болуы су өміріне де, адамның әл-ауқатына да үлкен зардаптары бар күрделі экологиялық проблемаға айналды. Бұл жан-жақты шолу тұщы судағы микропластикалық ластанудың көп қырлы мәселесін, оның әртүрлі көздерін, тасымалдау механизмдерін, қоршаған ортаға әсерін, анықтау әдістерін және салдарын азайту стратегияларын зерттейді. Микропластикалық ластанудың қоршаған ортаға тигізетін әсері көп және алуан түрлі, су организмдеріне, қорықтарға және жалпы биоәртүрлілікке әсер етеді. Сонымен қатар, микропластикалық ластану ластанған тұщы су ресурстарын тұтынумен байланысты ықтимал қауіптерге байланысты адам денсаулығына алаңдаушылық тудырады.

Шолу сонымен қатар гидрологиялық жағдайлар, адам әрекеті және биологиялық өзара әрекеттесу сияқты тұщы су экожүйелеріндегі микропластиктердің көптігі мен таралуына әсер ететін экологиялық факторларды атап көрсетеді. Микропластиктердің тасымалдау жолдары мен тағдыры, соның ішінде тұндыру, адсорбция және биоаккумуляция қарастырылады. Мақала тұщы судағы микропластикалық ластанудың маңызды мәселесін шешу үшін жаһандық хабардарлықтың, зерттеулердің және келісілген әрекеттердің шұғыл қажеттілігін көрсетумен аяқталады.

**Түйін сөздер:** микропластиктер, тұщы сулардың ластануы, ластану көздері, қоршаған ортаға әсері.

## FRESHWATER POLLUTION BY MICROPLASTICS: SOURCES, CONSEQUENCES AND MITIGATION STRATEGIES (LITERATURE REVIEW)

**К. Bexeitova<sup>1,2\*</sup>**, A. Baimenov<sup>1,2</sup>, U. Zhantikeev<sup>1</sup>, E. Sailauhanuly<sup>1</sup>,  
A. V. Esin<sup>3</sup>, S. Mikhlovsky<sup>4</sup>, S. Azat<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Satbayev University, Almaty, Kazakhstan*

<sup>2</sup> *al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

<sup>3</sup> *Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,  
Eskisehir Technical University, Eskişehir, Turkey*

<sup>4</sup> *ANAMAD Ltd., Sussex Innovation Centre Science Park Square, Falmer, Brighton, UK*

*\*E-mail for contacts: bekalsu@mail.ru*

The ubiquitous presence of microplastics in freshwater ecosystems has become a serious environmental problem with far-reaching consequences for both aquatic life and human well-being. This comprehensive review examines the multifaceted problem of microplastic pollution in freshwater, delving into its diverse sources, transport mechanisms, environmental impacts, detection methods, and mitigation strategies. The environmental impacts of microplastic pollution are many and varied, affecting aquatic organisms, food webs and biodiversity in general. Additionally, microplastic pollution raises human health concerns due to the potential risks associated with consuming contaminated freshwater resources.

The review also highlights environmental factors that influence the abundance and distribution of microplastics in freshwater ecosystems, such as hydrological conditions, human activities and biological interactions. The transport routes and fate of microplastics, including sedimentation, adsorption and bioaccumulation, are considered. The article concludes by highlighting the urgent need for global awareness, research and coordinated action to address the critical issue of microplastic pollution in freshwater.

**Keywords:** microplastics, fresh water pollution, sources, environmental impact.