1.5.15 Экология

Научная статья

УДК 504.054.5:628.35:504.062

МИКРОПЛАСТИК В СТОЧНЫХ ВОДАХ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УДАЛЕНИЯ НА ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ И ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ НА ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Запорожский Константин Игоревич, кандидат технических наук, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, Россия, Москва, zaporozhskii.k@yandex.ru

Аннотация. В статье представлен сравнительный анализ опубликованных исследований содержания и удаления микропластиковых частиц в муниципальных системах очистки сточных вод. Цель работы заключается в систематизации показателей поэтапной эффективности удаления и расчётной нагрузки микропластика на принимающие водные объекты. Методологическую основу составляет вторичный анализ научных публикаций и приведение концентрационных данных к сопоставимым показателям суточного количества частиц. Основной количественный пример основан на опубликованных результатах Murphy и соавторов (2016), согласно которым концентрация микропластика снижалась с 15,70 до 0,25 частиц/л. При принятом суточном расходе 260 954 м³ расчётная остаточная нагрузка составляет приблизительно 65,24 млн частиц в сутки. Дополнительно рассмотрены результаты исследований, посвящённых источникам микропластика, эффективности очистных технологий и ограничениям лабораторных методов определения. Показано, что высокая доля удаления частиц не исключает их дальнейшего поступления в водную среду. Сделан вывод о необходимости разграничения эффективности удаления, абсолютной нагрузки и экологического риска, определение которого требует данных об экспозиции и реакции водных

организмов.

Ключевые слова: микропластик; сточные воды; очистные сооружения; эффективность удаления; массовая нагрузка; принимающие водоёмы.

Original article

MICROPLASTICS IN WASTEWATER: A COMPARATIVE ANALYSIS OF REMOVAL AT TREATMENT PLANTS AND POTENTIAL LOADS ON RECEIVING WATERS

Zaporozhskii Konstantin Igorevich, Candidate of Technical Sciences, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russia, zaporozhskii.k@yandex.ru

Abstract. This paper presents a comparative analysis of published studies on the content and removal of microplastic particles in municipal wastewater treatment systems. The objective of the study is to systematize the indicators of stage-by-stage removal efficiency and the estimated microplastic load on receiving water bodies. The methodological basis is a secondary analysis of scientific publications and the reduction of concentration data to comparable indicators of daily particle counts. The main quantitative example is based on the published results of Murphy et al. (2016), according to which the microplastic concentration decreased from 15.70 to 0.25 particles/L. With an adopted daily flow rate of 260,954 m³, the estimated residual load is approximately 65.24 million particles per day. The results of studies devoted to microplastic sources, the efficiency of treatment technologies, and the limitations of laboratory determination methods are additionally considered. It is shown that a high proportion of particle removal does not exclude their further release into the aquatic environment. It is concluded that it is necessary to distinguish between removal efficiency, absolute load and ecological risk, the determination of which requires data on the exposure and response of aquatic organisms.

Keywords: microplastics; wastewater; treatment plants; removal efficiency;

particle load; receiving waters.

Актуальность исследования. Формирование и накопление микропластиковых частиц в компонентах биосферы признано одной из наиболее острых проблем современной экологии [1-3]. Под данным термином понимают фрагменты полимерных материалов размером менее 5 мм, которые традиционно подразделяют на первичные и вторичные. Первичный микропластик изначально производят в виде частиц микроскопического размера для использования в промышленных и бытовых целях, тогда как вторичные образуются в результате физико-химической и биологической деструкции крупногабаритного пластикового мусора под воздействием ультрафиолета, температурных перепадов и механического истирания [4]. Благодаря малым размерам и высокой устойчивости к природному разложению эти частицы широко распространяются в окружающей среде, мигрируя в атмосфере, гидросфере и почвах [5].

Значительная часть полимерного загрязнения поступает в поверхностные водные объекты через наземные источники, среди которых доминируют хозяйственно-бытовые стоки. Ежедневное использование косметических средств, содержащих абразивные гранулы, а также стирка изделий из синтетических тканей приводят к массовому смыву микроволокон и микросфер в канализационные сети. В этой связи муниципальные очистные сооружения канализации являются одним из ключевых путей поступления микропластика из антропогенных источников в водные экосистемы.

Инженерная инфраструктура очистных сооружений выполняет функцию критически важного барьера, улавливающего твердые взвешенные вещества. Технологические этапы, такие как удаление песка и жира, а также первичное отстаивание, демонстрируют высокую эффективность в отношении микрочастиц. На этапе сепарации жира и песка происходит интенсивное извлечение полимеров, включая специфические микросферы из косметики, которые обладают положительной плавучестью и легко снимаются с

поверхности аэрируемой жидкости [6-8]. Применение химических флокулянтов, в частности сульфата железа и полиакриламида, способствует агрегации мелкодисперсных частиц в хлопья, которые затем переходят в состав избыточного активного ила. В результате современные вторичные очистные комплексы способны задерживать до 98-99% микропластика, поступающего на вход вместе с неочищенным стоком [9].

Несмотря на высокие показатели эффективности улавливания, очистные сооружения остаются масштабным источником поступления микропластика в водоемы. Данное противоречие объясняется колоссальными объемами пропускаемых сточных вод. Даже при остаточной концентрации 0,25 частицы на литр ежедневный сброс очищенных сточных вод крупного предприятия, обслуживающего более 600 тысяч человек, приводит к поступлению в речную систему десятков миллионов полимерных фрагментов. За год количество сбрасываемых частиц исчисляется миллиардами. При этом в финальном стоке преобладают синтетические микроволокна и мелкие фрагменты, которые не оседают в отстойниках и проходят через все стадии биологической и физико-химической очистки [10].

Попадая в водную среду, микропластик не просто накапливается в донных отложениях и толще воды, но и вовлекается в биологические циклы. Мелкие полимерные частицы становятся доступными для гидробионтов различных трофических уровней, от зоопланктона до рыб и беспозвоночных. Организмы часто поглощают их случайно, принимая за пищевой объект, либо вместе с фекальными пеллетами жертв [11]. Помимо механического воздействия на пищеварительный тракт, микропластик может служить переносчиком стойких органических загрязнителей и тяжёлых металлов, сорбированных на его гидрофобной поверхности [12]. Таким образом, оценка экологического риска, связанного со сбросом очищенных сточных вод, требует детального понимания механизмов миграции микропластика, его количественного и качественного состава в эффлюенте, а также особенностей его дальнейшего поведения в

принимающем водном объекте.

Степень разработанности проблемы. Проблема загрязнения водных экосистем полимерными материалами микроскопических размеров приобрела в последние десятилетия характер глобального экологического вызова [13], [14]. Частицы пластика, не превышающие пять миллиметров в поперечнике, обнаруживаются повсеместно: от прибрежных зон до глубоководных впадин, от арктических льдов до тропических широт. Особую озабоченность вызывает тот факт, что муниципальные очистные сооружения, призванные защищать природные водоёмы от антропогенного загрязнения, сами становятся каналами поступления микропластика в гидросферу. Несмотря на то, что современные технологии очистки демонстрируют высокую эффективность удаления твёрдых взвешенных веществ, значительная часть полимерных частиц преодолевает все технологические барьеры и попадает в реки, озёра и моря вместе с очищенными сточными водами [15].

Степень научной разработанности данной проблематики остаётся неравномерной. Если вопросы распространения микропластика в морских акваториях и его воздействия на морские организмы получили достаточно подробное освещение в международной литературе, то механизмы прохождения полимерных частиц через технологические цепочки очистных сооружений канализации изучены в меньшей степени [16-18]. Отдельные исследования, проведённые в Скандинавии, Великобритании и Северной Америке, показали, что даже при эффективности удаления микропластика на уровне 98-99% абсолютное количество частиц, сбрасываемых в водные объекты, остаётся значительным из-за колоссальных объёмов пропускаемых стоков. Вместе с тем систематические данные о массовом балансе микропластика на различных стадиях очистки, о трансформации его гранулометрического состава и полимерной структуры в процессе очистки, а также количественные оценки экологического риска для конкретных водных объектов остаются фрагментарными.

Особенно недостаточно изучена роль различных технологических этапов в улавливании микропластика. Не вполне ясно, какая доля частиц задерживается на стадии решёток и песколовок, насколько эффективны первичные отстойники, какова роль биологической очистки и вторичного отстаивания [19]. Не менее важен вопрос о судьбе микропластика, перешедшего в осадки: возвращаются ли эти частицы в водную среду при утилизации илов или надёжно изолируются [20]. Отсутствие ответов на эти вопросы затрудняет разработку научно обоснованных рекомендаций по модернизации очистных сооружений и минимизации их вклада в загрязнение гидросферы полимерными материалами.

Материалы и методы исследования. Работа выполнена в формате вторичного сравнительного анализа опубликованных исследований миграции микропластика через технологические стадии муниципальных очистных сооружений. Основным количественным примером выступают данные F. Murphy, C. Ewins, F. Carbonnier и B. Quinn (2016), исследовавших содержание микропластиковых частиц в потоках сточных вод, осадков и сопутствующих технологических фракций. Для сопоставления используются также публикации Sheriff и соавторов (2023), Федотовой и соавторов (2023), Cavazzoli и соавторов (2023), посвящённые выявлению, удалению и экологическим последствиям микропластика в системах очистки сточных вод. В качестве основных аналитических показателей рассматриваются концентрация частиц на входе и после отдельных стадий, абсолютное количество частиц в суточном потоке, поэтапная и накопленная эффективность удаления.

В исследовании Murphy и соавторов (2016) рассмотрено распределение микропластиковых частиц между жидкими и твёрдыми потоками муниципальной системы очистки. Результаты отбора проб, пробоподготовки и инструментальной идентификации используются в настоящей статье исключительно как данные опубликованного первичного исследования. Сопоставление технологических стадий выполнено по изменению концентрации частиц в рассматриваемых потоках. Дополнительный авторский вклад

заключается в приведении соответствующих значений к единой расчётной форме, разграничении поэтапной и накопленной эффективности удаления и обсуждении ограничений использования концентраций для оценки нагрузки на принимающий водный объект.

Для обеспечения репрезентативности данных жидкие пробы отбирались методом составления композитных образцов: три раза по десять литров, объединённых в одну пробу для точек с высокой загрязнённостью, и пять раз по десять литров для очищенного стока. Фильтрация проводилась через сита с размером ячеи 65 микрометров с последующей дофильтровкой на бумажных фильтрах с порами 11 микрометров. Такой двухступенчатый подход позволял отделить крупный мусор и предотвратить забивание финальных фильтров. Твёрдые пробы осадка, песка и жира тщательно перемешивались, после чего отбирались аликвоты массой 2,5 грамма.

Критически важным аспектом методологии являлась минимизация контаминации образцов внешним микропластиком. Все работы проводились в специально подготовленном помещении, где персонал использовал хлопчатобумажные халаты, а под ними – одежду исключительно из натуральных тканей. Синтетические материалы были полностью исключены из рабочего процесса. Все стеклянные и металлические инструменты многократно промывались дистиллированной водой и проверялись под микроскопом до начала использования. Рабочие поверхности обрабатывались этанолом концентрации 70% не менее трёх раз перед каждым этапом работы.

Для контроля атмосферного загрязнения в лабораторном помещении оставлялись открытые чашки Петри с чистыми фильтрами на всё время проведения фильтрации и других манипуляций. Дополнительно применялась методика клейкой ленты, заимствованная из криминалистической практики: специальные плёнки с адгезивным слоем прижимались к рабочим поверхностям до и после проведения экспериментов для выявления возможных волокон и частиц. Результаты такого мониторинга показали, что при соблюдении всех мер

предосторожности контаминация остаётся на пренебрежимо низком уровне – в среднем менее четырёх волокон на одну пробу, причём подавляющее большинство из них представляло собой волокна целлюлозы или хлопка, а не синтетические полимеры.

Идентификация частиц проводилась в два этапа. Первоначально все фильтры исследовались под бинокулярным микроскопом при 20-100-кратном увеличении. На этом этапе фиксировались морфологические характеристики каждой частицы: размеры, форма (волокна, фрагменты, плёнки, гранулы, пена), цвет, степень прозрачности. Для повышения надёжности идентификации и исключения субъективных ошибок все частицы, предварительно классифицированные как микропластик, подвергались спектроскопическому анализу.

Определение химической природы полимеров осуществлялось методом инфракрасной спектроскопии с фурье-преобразованием (FTIR) в режиме отражения. Использовался микроскоп-спектрометр, позволяющий анализировать отдельные частицы размером от нескольких микрометров. Спектры регистрировались в диапазоне волновых чисел от 600 до 4000 обратных сантиметров с разрешением 4 обратных сантиметра. Для каждой частицы выполнялось 16 сканирований, что обеспечивало достаточное отношение сигнал/шум даже для небольших образцов. Идентификация проводилась путём сравнения полученных спектров с библиотеками эталонных спектров чистых полимеров.

Однако стандартные библиотеки спектров, составленные для идеальных лабораторных образцов, не всегда позволяли надёжно идентифицировать частицы, подвергшиеся длительному воздействию окружающей среды. Поверхностная деградация, биологическое обрастание, сорбция посторонних веществ – всё это вносило искажения в спектры. В связи с этим была создана дополнительная библиотека спектров, включавшая образцы микропластика, извлечённые из реальных объектов окружающей среды: пляжного мусора,

осадков сточных вод, косметических продуктов с микрогранулами. Такой подход существенно повысил достоверность идентификации.

Результаты исследования. Согласно опубликованным данным Murphy и соавторов (2016), средняя концентрация микропластиковых частиц на входе рассматриваемых очистных сооружений составляла 15,70 ± 5,23 частиц/л, а в очищенном стоке — 0,25 ± 0,04 частиц/л. Соответствующее снижение концентрации составляет приблизительно 98,41 %. Для промежуточных технологических стадий в используемом числовом ряду приведены значения 8,70 и 3,40 частиц/л. При постоянном суточном объёме сточных вод 260 954 м³ расчёт позволяет дополнительно оценить количество частиц, удаляемых между стадиями, и остаточную нагрузку на выпуске. При этом высокая эффективность снижения концентрации не означает отсутствия микропластика в сбрасываемой воде.

Прохождение через секцию удаления песка и жира привело к снижению концентрации до 8,70 частиц на литр, что соответствует эффективности удаления около 45%. На этой стадии из стока извлекалась значительная часть так называемых микрогранул – сферических частиц полиэтилена, используемых в косметических скрабах и зубных пастах. В пробах жира, собранного с поверхности аэрируемой воды, концентрация микропластика достигала 19,67 частиц на 2,5 грамма образца, что существенно превышало аналогичные показатели для песка и обезвоженного осадка. Положительная плавучесть полиэтилена и полипропилена способствует их концентрации в поверхностном слое, откуда они эффективно удаляются скиммерами.

Первичные отстойники, где происходит седиментация взвешенных веществ под действием гравитации с применением химических коагулянтов, обеспечили дополнительное снижение концентрации микропластика до 3,40 частиц на литр. Таким образом, на долю первичной очистки пришлось удаление ещё примерно 34% от исходного количества частиц. Механизм этого процесса связан с агрегацией мелких частиц в более крупные хлопья под действием

флокулянтов, после чего они осаждаются вместе с органической взвесью.

Биологическая очистка в сочетании со вторичным отстаиванием снизила концентрацию микропластика в очищенном стоке до 0,25 частицы на литр. Это соответствует общей эффективности удаления микропластика на уровне 98,41%. Несмотря на столь высокий процент очистки, абсолютное количество частиц, поступающих в реку, остаётся значительным. При среднесуточном расходе очищенных стоков 260 954 кубических метра в сутки, расчёт показывает, что в водоём ежедневно сбрасывается около 65 миллионов микропластиковых частиц. В годовом исчислении эта величина достигает 23,8 миллиарда частиц (таблица 1).

Таблица 1 - Расчётное изменение нагрузки микропластиковых частиц по опубликованному концентрационному ряду Murphy и соавторов (2016)

Стадия	Концентрация, частиц/л	Удалено на стадии, млн частиц/сут	Удалено на стадии, % от входного потока	Накопленная эффективность, %
Вход	15,70	—	—	—
После удаления песка и жира	8,70	1826,68	44,59	44,59
После первичных отстойников	3,40	1383,06	33,76	78,34
Очищенный сток	0,25	822,01	20,06	98,41

Источник: разработано автором.

При входной концентрации 15,70 частиц/л и расходе 260 954 м³/сут расчётное суточное поступление составляет приблизительно 4,097 млрд частиц. При концентрации очищенного стока 0,25 частиц/л остаточная нагрузка составляет около 65,24 млн частиц/сут.

Анализ полимерного состава микропластика на различных стадиях очистки выявил различия в соотношении полимеров. В неочищенных стоках доминировали алкидные смолы (28,7%), полистирол-акриловые сополимеры (19,1%), полиэфиры (10,8%) и полиуретаны (8,9%). Такой состав отражает разнообразие источников поступления: краски, покрытия, упаковочные

материалы, синтетические волокна. В очищенном стоке соотношение полимеров изменилось: возросла доля полиэфиров (28%), полиамидов (20%), полипропилена (12%) и акрила (12%). Это свидетельствует о том, что некоторые полимеры удаляются менее эффективно, возможно, из-за их физических характеристик – размера, плотности, формы.

Морфологический анализ показал преобладание фрагментов неправильной формы (67,3% от общего количества), что указывает на вторичное происхождение большей части микропластика в результате деградации крупных пластиковых изделий. Волокна составили 18,5%, плёнки – 9,9%, сферические гранулы – 3,0%, пенопласты – 1,3%. Цветовая гамма частиц оказалась разнообразной, однако чаще встречались красные (26,7%), синие (25,4%) и зелёные (19,1%) частицы.

Анализ размеров показал, что частицы в жидкой фазе очищенного стока в среднем мельче (0,598 миллиметра), чем частицы, извлечённые из твёрдых фракций - песка, жира и осадка (1,342 и 1,618 миллиметра соответственно). Это подтверждает гипотезу о том, что более крупные частицы эффективнее задерживаются на различных стадиях очистки, тогда как мелкие способны преодолевать технологические барьеры. Полученные различия были статистически значимыми.

Исследование суточной динамики содержания микропластика в осадке не выявило существенных вариаций между пробами, отобранными в 9:30 и 14:30 в разные дни. Это может свидетельствовать о достаточно стабильном поступлении микропластика в систему канализации в течение дня, по крайней мере в масштабах, фиксируемых данным методом. Однако для более определённых выводов необходимы исследования с большей частотой отбора проб и в разные сезоны года.

Обсуждение результатов исследования. Полученные данные позволяют сделать вывод о двойственной роли очистных сооружений в контексте проблемы микропластика. С одной стороны, современные технологии обеспечивают

высокую эффективность удаления полимерных частиц - более 98% [21]. Это достигается за счёт комбинации физических, химических и биологических процессов. Удаление жира и песка, где концентрируются лёгкие плавающие частицы, вносит наибольший вклад на начальных этапах. Первичное отстаивание с применением флокулянтов эффективно агрегирует и осаждает мелкодисперсные частицы. Биологическая очистка способствует дальнейшему удалению за счёт включения частиц в бактериальные хлопья и биоплёнки.

С другой стороны, при остаточной концентрации 0,25 частицы на литр из-за больших объёмов сброса в водный объект ежедневно поступают десятки миллионов частиц. Этот поток представляет собой существенный источник загрязнения для принимающего водоёма. Река, получающая такие объёмы микропластика, становится транспортным коридором для его дальнейшего переноса в эстуарии и морские акватории. Часть частиц оседает в донных отложениях русла, создавая долговременные очаги загрязнения. Другая часть поглощается гидробионтами, запуская механизмы биологического переноса по трофическим цепям [22].

Особого внимания заслуживает тот факт, что микрогранулы из косметических продуктов были обнаружены практически исключительно в пробах жира и практически отсутствовали в очищенном стоке. Это указывает на высокую эффективность удаления лёгких плавающих частиц и позволяет предположить, что при надлежащей организации процесса очистки микрогранулы могут представлять меньшую проблему для водных объектов, чем обычно предполагается. Основную массу сбрасываемого микропластика составляют волокна синтетических тканей и фрагменты деградировавшего пластика, которые труднее удалить из-за их размера и плотности, близкой к плотности воды.

Полимерный состав микропластика в очищенном стоке отличается от состава на входе, что имеет важные экологические последствия. Повышенная доля полиэфиров и полиамидов в сбросе связана с тем, что эти полимеры часто

используются в производстве синтетических волокон для одежды. При стирке такие ткани выделяют тысячи микроскопических волокон, которые попадают в канализацию. Эти волокна относительно легко проходят через очистные барьеры и после попадания в водную среду поглощаются фильтрующими организмами. Полиамиды и полиэфиры также характеризуются высокой устойчивостью к биодеградации, что обеспечивает их длительное сохранение в экосистемах.

Размер частиц в очищенном стоке в среднем меньше, чем в твёрдых отходах очистки, что согласуется с представлениями о селективности процессов удаления. Мелкие частицы обладают меньшей скоростью седиментации, хуже агрегируются, легче проходят через фильтрующие перегородки [23]. Вместе с тем именно мелкие частицы представляют наибольшую экологическую опасность, поскольку они доступны для поглощения широким спектром организмов, включая зоопланктон – основу пищевых сетей водных экосистем. Поглощённый микропластик может вызывать механические повреждения пищеварительного тракта, создавать ложное чувство насыщения, снижать потребление нормальной пищи.

Помимо прямых физических эффектов, микропластик выступает носителем химических загрязнителей. Гидрофобная поверхность полимерных частиц обладает высокой сорбционной ёмкостью по отношению к стойким органическим загрязнителям, тяжёлым металлам, другим токсичным веществам. Концентрации таких веществ на поверхности микропластика могут на порядки превышать их содержание в окружающей воде. При поглощении частиц организмами эти загрязнители десорбируются и поступают в ткани, вызывая токсикологические эффекты. Кроме того, сами полимеры могут содержать добавки – пластификаторы, антипирены, стабилизаторы, – которые способны мигрировать из пластика в окружающую среду и организмы.

Эффективность очистки, продемонстрированная в данном исследовании, характерна для современных сооружений с полноценной технологической цепочкой. Однако многие очистные сооружения, особенно в развивающихся

странах и малых населённых пунктах, не располагают таким оборудованием или работают с нарушениями технологического режима. В таких случаях эффективность удаления микропластика может быть существенно ниже, а вклад в загрязнение водных объектов – выше. Особую проблему представляют ливневые переливы, когда при сильных дождях часть неочищенных или частично очищенных стоков сбрасывается напрямую в водоёмы для предотвращения переполнения систем. В такие периоды поступление микропластика может возрастать многократно.

Существующие технологии доочистки (мембранная фильтрация, дисковые микрофильтры, флотация, сорбция) способны дополнительно снизить концентрацию микропластика в сбрасываемых стоках. Однако их внедрение требует значительных капитальных и эксплуатационных затрат. Альтернативный подход заключается в предотвращении поступления микропластика в канализацию на этапе его образования: ограничении использования микрогранул в косметике, установке фильтров на стиральных машинах для улавливания волокон и изменении потребительских привычек. Комплексное применение обоих подходов представляется наиболее перспективной стратегией.

Перспективным направлением исследований является оценка реального экологического риска для конкретных водных объектов. Для этого необходимо сопоставлять нагрузку микропластика от очистных сооружений с фоновыми концентрациями в водоёме, учитывать гидрологические условия, разбавление, транспорт частиц, их доступность для организмов. Важным аспектом остаётся изучение долгосрочных эффектов хронического воздействия микропластика на популяции и сообщества гидробионтов, а также возможного переноса загрязнителей по трофическим цепям до человека.

Таким образом, очистные сооружения канализации, выполняя важнейшую функцию защиты водных объектов от загрязнения органическими веществами и патогенами, одновременно становятся значимым источником поступления

микропластика в гидросферу. Совершенствование технологий очистки, разработка нормативов содержания микропластика в сбрасываемых стоках, внедрение систем мониторинга, снижение поступления микропластика в канализацию – всё это необходимые элементы комплексной стратегии борьбы с загрязнением водных экосистем полимерными материалами.

Выводы. Результаты исследования функционирования муниципальных очистных комплексов канализации выявляют парадоксальную закономерность. С одной стороны, действующие технологические цепочки обеспечивают высокую степень извлечения полимерных частиц, достигающую 98-99%. С другой стороны, из-за больших объёмов пропускаемых стоков в принимающие водоёмы ежесуточно поступают десятки миллионов полимерных частиц. Это означает, что, выполняя функцию защитного барьера, очистные сооружения одновременно остаются значительным точечным источником вторичного загрязнения гидросферы.

Серьезным препятствием на пути к объективной оценке экологических рисков выступает методологическая разрозненность. Применяемые сегодня подходы к отбору проб нередко ограничиваются единичными отборами, что не позволяет учесть суточную и сезонную динамику концентраций микропластика, а также влияние ливневых переливов. Последние способны многократно увеличить антропогенную нагрузку на речные системы в периоды пиковых осадков. Кроме того, опора исключительно на визуальную микроскопию неизбежно ведет к существенным погрешностям. Только применение спектроскопических методов, таких как инфракрасная Фурье-спектроскопия, в сочетании с тщательным контролем фоновой контаминации способно обеспечить достоверность получаемых данных.

Проблема атмосферного и лабораторного загрязнения образцов синтетическими волокнами приобретает критическое значение. Материалы опубликованных исследований показывают, что лабораторное определение микропластиковых частиц чувствительно к возможной внешней контаминации

образцов, особенно синтетическими волокнами. Контроль чистоты оборудования, лабораторной одежды, рабочих поверхностей и холостых проб является необходимой частью аналитической методики. В работе Murphy и соавторов приведены процедуры предотвращения загрязнения проб, которые следует рассматривать как элементы методологии первичного исследования. В настоящем сравнительном анализе эти сведения используются для характеристики ограничений воспроизводимости и сопоставимости результатов разных исследовательских групп.

В сложившихся условиях первоочередной задачей научного сообщества выступает разработка и внедрение унифицированных стандартов мониторинга микропластика в сточных водах и донных отложениях. Стандартизация должна охватывать все этапы: от выбора объема фильтруемой пробы и размера пор мембран до критериев химической идентификации полимеров. Без решения этой методологической проблемы количественная оценка экотоксикологического риска и моделирование путей миграции частиц по трофическим цепям остаются недостаточно обоснованными.

Таким образом, минимизация поступления микропластика в водные экосистемы требует комплексного подхода. Он должен включать не только модернизацию инженерной инфраструктуры за счет внедрения стадий третичной доочистки, таких как дисковое микрофильтрование или мембранная фильтрация, но и превентивные меры на уровне источника. Однако успех любых природоохранных инициатив напрямую зависит от качества аналитического инструментария. Лишь опираясь на строгие, научно обоснованные и воспроизводимые методики учета, экологи и инженеры смогут разработать эффективные стратегии защиты водных ресурсов от нарастающей полимерной нагрузки.

Список литературы

1. Русанова К. Р., Ксенофонтов Б. С., Бондаренко А. В. Очистка сточных вод от микропластика с исследованием природы и свойства загрязнений // Экология

промышленного производства. 2023. № 3. С. 19–27.

2. Sheriff I., Yusoff M. S., Halim H. B. Microplastics in wastewater treatment plants: A review of the occurrence, removal, impact on ecosystem, and abatement measures // Journal of Water Process Engineering. 2023. Vol. 54. Article 104039. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104039.

3. Федотова А. Ю., Астраханцева Е. В., Дягелев М. Ю. Исследование возникновения и удаления микропластика на очистных сооружениях канализации // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2023. № 4 (46). С. 28–33. DOI: 10.52684/2312-3702-2023-46-4-28-33.

4. Cavazzoli S., Ferrentino R., Scopetani C., Monperrus M., Andreottola G. Analysis of micro- and nanoplastics in wastewater treatment plants: key steps and environmental risk considerations // Environmental Monitoring and Assessment. 2023. Vol. 195. Article 1483. DOI: 10.1007/s10661-023-12030-x.

5. Сухомлинов В. П., Мелехов Р. В., Голосняков В. П. Эффективная очистка поверхностных стоков // Водоснабжение и санитарная техника. 2023. № 7. С. 60–64. DOI: 10.35776/VST.2023.07.07.

6. Mesquita D. P., Quintelas C., Ferreira E. C. Fate and occurrence of microplastics in wastewater treatment plants // Environmental Science: Advances. 2023. Vol. 2. P. 1616–1628. DOI: 10.1039/D3VA00167A.

7. Хлыстов И. А., Бугаева А. В., Сахаутдинова Р. Р., Гурвич В. Б. Обнаружение частиц микропластика в водной среде методом окрашивания // Гигиена и санитария. 2023. Т. 102. № 11. С. 1251–1254. DOI: 10.47470/0016-9900-2023-102-11-1251-1254.

8. Parashar N., Hait S. Recent advances on microplastics pollution and removal from wastewater systems: A critical review // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 340. Article 118014. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118014.

9. Федотова А. Ю., Дягелев М. Ю., Исаков В. Г., Абрамова А. А. Загрязнение микропластиком окружающей среды и удаление микропластика из сточных вод // Экологический вестник Северного Кавказа. 2024. Т. 20. № 1. С. 23–28.

10. Carnevale Miino M., Galafassi S., Zullo R., Torretta V., Rada E. C. Microplastics removal in wastewater treatment plants: A review of the different approaches to limit their release in the environment // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 930. Article 172675. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.172675.

11. Kamani H., Ghayebzadeh M., Ganji F. Tracking and risk assessment of microplastics in a wastewater treatment plant // Water and Environment Journal. 2024. Vol. 38. No. 4. P. 613–627. DOI: 10.1111/wej.12949.

12. Hajji S., Ben-Haddad M., Abelouah M. R., Rangel-Buitrago N., Ait Alla A. Microplastic characterization and assessment of removal efficiency in an urban and industrial wastewater treatment plant with submarine emission discharge // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 945. Article 174115. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174115.

13. Bodzek M., Pohl A., Rosik-Dulewska C. Microplastics in Wastewater Treatment Plants: Characteristics, Occurrence and Removal Technologies // Water. 2024. Vol. 16. No. 24. Article 3574. DOI: 10.3390/w16243574.

14. Анциферова М. А., Глушко А. Е., Беспалова Л. А., Клещенков А. В., Назаренко А. В. Микропластик в воде и проблемы его определения (на примере водных объектов Юга европейской части России) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2025. № 1. С. 115–124. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2025/1/115-124.

15. Zoccali A., Cantoni B., Azzellino A., Malpei F. Removal of microplastics in wastewater treatment plants: insights from a literature meta-analysis // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. No. 3. Article 116812. DOI: 10.1016/j.jece.2025.116812.

16. Томилов А., Сторчак Т., Гогои С. Б., Битнер М., Диденко Н. Микропластик в пресноводных экосистемах: источники, методы исследования и экологические последствия. Опыт российских исследователей и перспективы контроля загрязнения в ХМАО-Югре // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2025. № 1. С. 111–135. DOI: 10.36906/2311-4444/25-1/09.

17. Monira S., Fan L., McCance W., Roychand R., Bhuiyan M. A., Shah K., Thomas M., Pramanik B. K. Seasonal variation and removal efficiency of microplastics in wastewater treatment: a year-long study across three municipal water reclamation plants // Environmental Science: Water Research & Technology. 2025. Vol. 11. P. 1745–1757. DOI: 10.1039/D4EW00924J.

18. Wang M.-H., Chen C.-F., Liang Y.-Y., Chen C.-W., Dong C.-D. Microplastics and adsorbed contaminants in wastewater sludge: Assessing phthalate esters and alkylphenols as key pollutants // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. No. 5. Article 117657. DOI: 10.1016/j.jece.2025.117657.

19. Boisseaux P., Delignette-Muller M. L., Galloway T. A Quantitative Environmental Risk Assessment for Microplastics in Sewage Sludge Applied to Land // Environmental Science & Technology. 2025. Vol. 59. No. 49. P. 26526–26538. DOI: 10.1021/acs.est.5c08026.

20. Тульская Е. А., Синицына О. О., Калюжин А. С., Ряшенцева Т. М., Турбинский В. В., Трухина Г. М. и др. Гигиенические подходы к определению безопасного уровня микропластика в воде // Гигиена и санитария. 2026. Т. 105. № 1. С. 33–40. DOI: 10.47470/0016-9900-2026-105-1-33-40.

21. Çolakoğlu E. B., Uyanık İ., Mıhçıokur H., Yurtsever A. Microplastics in an industrial zone wastewater treatment plant: Characterization, fate, and risk assessment // Integrated Environmental Assessment and Management. 2026. Vol. 22. No. 4. P. 1297–1308. DOI: 10.1093/inteam/vjag027.

22. Cavazzoli S., Morère M., Andreottola G., Monperrus M. Meso- and microplastics accumulate and transfer hazardous contaminants from wastewater treatment plants to the environment // Environmental Research. 2026. Vol. 294. Article 123825. DOI: 10.1016/j.envres.2026.123825.

23. Wen M., Hou Y., Ou H., Wen Y., Lu Y., Liao Z. Source fingerprints, process fate, and risk redistribution of microplastics in a full-scale wastewater treatment plant receiving e-waste dismantling wastewater // Water Research. 2026. Vol. 305. Article 126514. DOI: 10.1016/j.watres.2026.126514.

24. Murphy F., Ewins C., Carbonnier F., Quinn B. Wastewater Treatment Works (WwTW) as a Source of Microplastics in the Aquatic Environment // Environmental Science & Technology. 2016. Vol. 50, No. 11. P. 5800–5808. DOI: 10.1021/acs.est.5b05416.

References

1. Rusanova K. R., Ksenofontov B. S., Bondarenko A. V. Ochistka stochnykh vod ot mikroplastika s issledovaniem prirody i svoistva zagryaznenii // Ekologiya promyshlennogo proizvodstva. 2023. № 3. S. 19–27.

2. Sheriff I., Yusoff M. S., Halim H. B. Microplastics in wastewater treatment plants: A review of the occurrence, removal, impact on ecosystem, and abatement measures // Journal of Water Process Engineering. 2023. Vol. 54. Article 104039. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104039.

3. Fedotova A. Yu., Astrakhantseva E. V., Dyagelev M. Yu. Issledovanie vozniknoveniya i udaleniya mikroplastika na ochistnykh sooruzheniyakh kanalizatsii // Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik Prikaspiya. 2023. № 4 (46). S. 28–33. DOI: 10.52684/2312-3702-2023-46-4-28-33.

4. Cavazzoli S., Ferrentino R., Scopetani C., Monperrus M., Andreottola G. Analysis of micro- and nanoplastics in wastewater treatment plants: key steps and environmental risk considerations // Environmental Monitoring and Assessment. 2023. Vol. 195. Article 1483. DOI: 10.1007/s10661-023-12030-x.

5. Sukhomlinov V. P., Melekhov R. V., Golosnyakov V. P. Effektivnaya ochistka poverkhnostnykh stokov // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. 2023. № 7. S. 60–64. DOI: 10.35776/VST.2023.07.07.

6. Mesquita D. P., Quintelas C., Ferreira E. C. Fate and occurrence of microplastics in wastewater treatment plants // Environmental Science: Advances. 2023. Vol. 2. P. 1616–1628. DOI: 10.1039/D3VA00167A.

7. Khlystov I. A., Bugaeva A. V., Sakhautdinova R. R., Gurvich V. B. Obnaruzhenie chastits mikroplastika v vodnoi srede metodom okrashivaniya // Gigiena i sanitariya. 2023. T. 102. № 11. S. 1251–1254. DOI: 10.47470/0016-9900-2023-102-11-1251-

1254.

8. Parashar N., Hait S. Recent advances on microplastics pollution and removal from wastewater systems: A critical review // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 340. Article 118014. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118014.

9. Fedotova A. Yu., Dyagelev M. Yu., Isakov V. G., Abramova A. A. Zagryaznenie mikroplastikom okruzhayushchei sredy i udalenie mikroplastika iz stochnykh vod // Ekologicheskii vestnik Severnogo Kavkaza. 2024. T. 20. № 1. S. 23–28.

10. Carnevale Miino M., Galafassi S., Zullo R., Torretta V., Rada E. C. Microplastics removal in wastewater treatment plants: A review of the different approaches to limit their release in the environment // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 930. Article 172675. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.172675.

11. Kamani H., Ghayebzadeh M., Ganji F. Tracking and risk assessment of microplastics in a wastewater treatment plant // Water and Environment Journal. 2024. Vol. 38. No. 4. P. 613–627. DOI: 10.1111/wej.12949.

12. Hajji S., Ben-Haddad M., Abelouah M. R., Rangel-Buitrago N., Ait Alla A. Microplastic characterization and assessment of removal efficiency in an urban and industrial wastewater treatment plant with submarine emission discharge // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 945. Article 174115. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.174115.

13. Bodzek M., Pohl A., Rosik-Dulewska C. Microplastics in Wastewater Treatment Plants: Characteristics, Occurrence and Removal Technologies // Water. 2024. Vol. 16. No. 24. Article 3574. DOI: 10.3390/w16243574.

14. Antsiferova M. A., Glushko A. E., Bespalova L. A., Kleshchenkov A. V., Nazarenko A. V. Mikroplastik v vode i problemy ego opredeleniya (na primere vodnykh ob"ektov Yuga evropeiskoi chasti Rossii) // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya. 2025. № 1. S. 115–124. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2025/1/115-124.

15. Zoccali A., Cantoni B., Azzellino A., Malpei F. Removal of microplastics in wastewater treatment plants: insights from a literature meta-analysis // Journal of

Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. No. 3. Article 116812. DOI: 10.1016/j.jece.2025.116812.

16. Tomilov A., Storchak T., Gogoi S. B., Bitner M., Didenko N. Mikroplastik v presnovodnykh ekosistemakh: istochniki, metody issledovaniya i ekologicheskie posledstviya. Opyt rossiiskikh issledovatelei i perspektivy kontrolya zagryazneniya v KhMAO-Yugre // Vestnik Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta. 2025. № 1. S. 111–135. DOI: 10.36906/2311-4444/25-1/09.

17. Monira S., Fan L., McCance W., Roychand R., Bhuiyan M. A., Shah K., Thomas M., Pramanik B. K. Seasonal variation and removal efficiency of microplastics in wastewater treatment: a year-long study across three municipal water reclamation plants // Environmental Science: Water Research & Technology. 2025. Vol. 11. P. 1745–1757. DOI: 10.1039/D4EW00924J.

18. Wang M.-H., Chen C.-F., Liang Y.-Y., Chen C.-W., Dong C.-D. Microplastics and adsorbed contaminants in wastewater sludge: Assessing phthalate esters and alkylphenols as key pollutants // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13. No. 5. Article 117657. DOI: 10.1016/j.jece.2025.117657.

19. Boisseaux P., Delignette-Muller M. L., Galloway T. A Quantitative Environmental Risk Assessment for Microplastics in Sewage Sludge Applied to Land // Environmental Science & Technology. 2025. Vol. 59. No. 49. P. 26526–26538. DOI: 10.1021/acs.est.5c08026.

20. Tul'skaya E. A., Sinitsyna O. O., Kalyuzhin A. S., Ryashentseva T. M., Turbinskii V. V., Trukhina G. M. i dr. Gigienicheskie podkhody k opredeleniyu bezopasnogo urovnya mikroplastika v vode // Gigiena i sanitariya. 2026. T. 105. № 1. S. 33–40. DOI: 10.47470/0016-9900-2026-105-1-33-40.

21. Çolakoğlu E. B., Uyanık İ., Mıhçıokur H., Yurtsever A. Microplastics in an industrial zone wastewater treatment plant: Characterization, fate, and risk assessment // Integrated Environmental Assessment and Management. 2026. Vol. 22. No. 4. P. 1297–1308. DOI: 10.1093/inteam/vjag027.

22. Cavazzoli S., Morère M., Andreottola G., Monperrus M. Meso- and microplastics

accumulate and transfer hazardous contaminants from wastewater treatment plants to the environment // Environmental Research. 2026. Vol. 294. Article 123825. DOI: 10.1016/j.envres.2026.123825.

23. Wen M., Hou Y., Ou H., Wen Y., Lu Y., Liao Z. Source fingerprints, process fate, and risk redistribution of microplastics in a full-scale wastewater treatment plant receiving e-waste dismantling wastewater // Water Research. 2026. Vol. 305. Article 126514. DOI: 10.1016/j.watres.2026.126514.

24. Murphy F., Ewins C., Carbonnier F., Quinn B. Wastewater Treatment Works (WwTW) as a Source of Microplastics in the Aquatic Environment // Environmental Science & Technology. 2016. Vol. 50, No. 11. P. 5800–5808. DOI: 10.1021/acs.est.5b05416.

Статья поступила в редакцию 14.05.2026; одобрена после рецензирования 25.06.2026; принята к публикации 16.10.2026.

The article was submitted 14.05.2026; approved after peer review 25.06.2026; accepted for publication 16.10.2026.