

Катунцев Сергей Олегович

Бакалавр, Иркутский национальный исследовательский технический
университет, г. Иркутск, Россия

Конашкова Ирина Альбертовна

Бакалавр, Иркутский национальный исследовательский технический
университет, г. Иркутск, Россия

Василевич Эльвира Эрнстовна

Кандидат технических наук, доцент кафедры инженерных коммуникаций и
систем жизнеобеспечения, Иркутский национальный исследовательский
технический университет, г. Иркутск, Россия

К ВОПРОСУ УДАЛЕНИЯ МИКРОПЛАСТИКА И ОСТАТКОВ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ ПИТЬЕВЫХ И СТОЧНЫХ ВОД

Аннотация

Статья посвящена проблеме загрязнения водных объектов микропластиком и остаточными фармацевтическими соединениями, включая PFAS. Показано, что традиционные методы водоподготовки (коагуляция, осаждение, фильтрация) недостаточно эффективны для удаления фармпрепаратов (10–60%) и PFAS (менее 20%), а также малых фракций микропластика (<10 мкм). Рассмотрены современные технологии доочистки: адсорбция на активированном угле и анионообменных смолах, мембранные биореакторы, холодная плазма, биогибридные системы. Отмечена высокая эффективность комбинации ГАУ и АИХ-смол для одновременного удаления обоих типов загрязнителей (>90%). Сделан вывод о необходимости внедрения

ступени доочистки на существующих станциях водоподготовки. Отмечено отсутствие в российских нормативах требований к содержанию данных веществ в питьевой воде, что требует гармонизации с международными стандартами.

Annotation

The article addresses the problem of water body pollution with microplastics and residual pharmaceutical compounds, including PFAS. It is shown that conventional water treatment methods (coagulation, sedimentation, filtration) are insufficiently effective for the removal of pharmaceuticals (10–60%) and PFAS (less than 20%), as well as small microplastic fractions ($<10\text{ }\mu\text{m}$). Advanced treatment technologies are considered: adsorption on activated carbon and anion-exchange resins, membrane bioreactors, cold plasma, and biohybrid systems. The high efficiency of the combined use of GAC and AIX resins for the simultaneous removal of both types of contaminants ($>90\%$) is noted. It is concluded that it is necessary to implement an advanced treatment stage at existing water treatment plants. The absence of requirements for the content of these substances in drinking water in Russian regulations is noted, which necessitates harmonization with international standards.

Ключевые слова: питьевое водоснабжение, сточные воды, микропластик, фармацевтические препараты, источники, загрязнение, пути миграции, технологии, очистка воды, сооружения

Keywords: drinking water supply, wastewater, microplastics, pharmaceuticals, sources, pollution, migration pathways, technologies, water treatment, facilities

Введение

Современная система питьевого водоснабжения столкнулась с принципиально новым вызовом — загрязнением воды микропластиком (МП) и фармацевтическими препаратами. Эти поллютанты, связанные понятием «emerging contaminants» (новые загрязняющие вещества), принципиально отличаются от традиционных способов очистки, что существующие очистные

сооружения никогда не проектировались с учетом необходимости их удаления [1]. Между тем, масштаб проблемы нарастает стремительно: глобальное производство пластика достигло 390,7 млн тонн в 2021 году и, по прогнозам, к 2050 году может составить 33 млрд тонн ежегодно [1]. Фармацевтические препараты и PFAS - группа синтетических фторорганических соединений, в молекуле которых много атомов фтора, присоединённых к алкильной цепи. За это вещества получили прозвище «вечные химикаты», которые обнаруживаются в водных объектах по всему миру, включая грунтовые воды и питьевые источники [2].

Особую тревогу вызывает тот факт, что микропластик обнаруживается повсеместно — даже в отдаленных, незаселенных регионах планеты [3]. Водопроводная вода, согласно глобальным исследованиям, в 81% проб демонстрирует наличие МП-частиц [3]. Программа ООН по окружающей среде (UNEP) уже назвала микропластик «PM_{2,5} частицами в водной среде», подчеркивая его потенциальную опасность для здоровья [1]. При этом среднегодовое потребление МП с питьевой водой оценивается в 257,5 г на человека, а число частиц может достигать 175 000 в литре. Фармацевтические загрязнители добавляют к этой картине риск развития устойчивости к антибиотикам и гормональных нарушений даже в сверхмалых концентрациях [2].

Технологический парадокс ситуации заключается в двойственной роли очистных сооружений. С одной стороны, традиционные способы водоподготовки — коагуляция, осаждение, фильтрация — действительно удаляют основную массу крупных частиц микропластика (размером более 20 мкм) с эффективностью до 95-99% [3, 1]. Однако, во-первых, эта эффективность резко падает для частиц диапазона менее 10 мкм, которые способны проникать через биологические барьеры организма [3, 1]. Во-вторых, сам процесс очистки может становиться источником вторичного загрязнения: фрагментация крупных частиц приводит к росту доли мелких фракций на выходе с очистных сооружений [1]. Кроме того, полимерные

мембраны и флокулянты способны выделять собственные микрочастицы (например, ПВХ, ПП, ПММА) в процессе старения и механического износа [1]. Что касается фармацевтических препаратов и PFAS, традиционные технологии (коагуляция, песчаная фильтрация) перед ними практически бессильны — эффективность удаления часто не превышает 20%.

Таким образом, формируется проблема: существующие представления об эффективности барьеров водоподготовки, сложившиеся в эпоху, когда микропластик и фармпрепараты не рассматривались как целевые загрязнители, нуждаются в критическом пересмотре. Требуется систематизация данных о том, какие именно фракции МП и какие группы фармацевтических соединений задерживаются на разных ступенях очистки, а какие — беспрепятственно проходят в распределительную сеть и далее к потребителю. В российском контексте эта проблема усугубляется отсутствием нормативных требований к содержанию данных поллютантов в питьевой воде и крайне ограниченным числом исследований на действующих станциях водоподготовки [4].

Источники поступления и пути миграции загрязнителей в системах питьевого водоснабжения

Микропластик и фармацевтические препараты поступают в источники питьевого водоснабжения преимущественно через недостаточно очищенные сточные воды. Исследования показывают, что содержание микропластика в сточных водах может достигать сотен частиц на литр, а концентрации фармацевтических препаратов варьируют от наногرامмов до микрограммов на литр [5]. Очистные сооружения, не оптимизированные для удаления этих загрязнителей, становятся основным путем их поступления в водные объекты [6].

Микропластик в водной среде подразделяется на первичный (намеренно производимые микрочастицы для косметики, моющих средств, фармацевтических капсул) и вторичный, образующийся при разложении

более крупных пластиковых отходов под действием ультрафиолета, механического истирания и микробиологической активности [7]. Особую опасность представляют частицы размером 1-100 мкм, способные проникать в биологические ткани, и 100-1000 мкм, обладающие высокой сорбционной способностью по отношению к другим загрязнителям [7].

Критически важной особенностью микропластика является его роль как вектора переноса фармацевтических препаратов. Полимерные частицы адсорбируют на своей поверхности лекарственные соединения, образуя устойчивые комплексы, которые увеличивают мобильность и токсичность загрязнителей [7].

Эффективность традиционных методов водоподготовки

Коагуляция и осаждение остаются наиболее широко применяемыми процессами в подготовке питьевой воды, однако их эффективность в отношении «emerging contaminants» существенно варьируется [8].

По микропластику: традиционные алюминий- и железосодержащие коагулянты демонстрируют эффективность удаления микропластика до 95%, при этом ключевым фактором оптимизации является дзета-потенциал частиц [8]. Как показано в экспериментах с холодной плазмой, поверхностная модификация полиэтиленовых частиц может приводить к их агрегации, что потенциально повышает эффективность последующего удаления седиментацией или фильтрацией [7].

По фармацевтическим препаратам: эффективность удаления фармпрепаратов традиционными методами составляет лишь 10-60% [8].

По PFAS («вечные химикаты»): Традиционные методы коагуляции и осаждения демонстрируют наименьшую эффективность — менее 20% удаления. Это связано с уникальными свойствами PFAS-соединений: их устойчивостью к химическому разложению и высокой подвижностью в водной среде [8].

Современные технологии доочистки

Неэффективность традиционных методов обусловила активное развитие технологий доочистки, способных удалять «emerging contaminants» до безопасных уровней.

Адсорбционные технологии

Гранулированный активированный уголь (ГАУ) зарекомендовал себя как эффективный метод удаления фармацевтических препаратов. Исследования показывают, что ГАУ обеспечивает удаление более 90% таких соединений, как диклофенак, при обработке до 20 000 объемов пустотного слоя. Комбинация ГАУ с анионообменными смолами (АИХ) представляет собой перспективное направление, поскольку эти технологии выполняют взаимодополняющие функции: ГАУ эффективен против фармпрепаратов, тогда как анионообмен — против PFAS [6].

В Болонском университете ведутся разработки адсорбционных процессов с использованием как коммерческих, так и инновационных адсорбентов. Исследования проводятся в непрерывном режиме на реальных сточных водах с учетом матричных эффектов, что позволяет моделировать процессы с помощью программных комплексов Comsol Multiphysics и AspenPlus и выполнять экономический анализ полноценных промышленных установок [2].

Мембранные биореакторы (МБР)

Мембранные биореакторы демонстрируют высокую эффективность удаления микропластика и фармпрепаратов — более 90%, обеспечивая превосходное качество очищенной воды по сравнению с традиционными методами. Однако существует значительная проблема обрастания мембран, которая влияет на эффективность и производительность мембранных систем. Разработка новых поколений МБР-решений должна быть направлена на создание экономически эффективных технологий, применимых в полномасштабных установках, и разработку стратегий борьбы с засорением мембран [5].

Биогибридные фильтрационные системы

Инновационным направлением является разработка биогибридных фильтрационных систем, сочетающих биологические и синтетические компоненты для создания синергетических эффектов. В рамках проекта DeDrug-Bio разрабатываются фильтрационные системы на основе микробиологически активных поверхностей, способные разрушать такие устойчивые загрязнители, как диклофенак, с помощью ферментов в безвредные побочные продукты.

Конструкция таких систем вдохновлена природой — морскими губками и кораллами, обладающими высокоэффективными механизмами фильтрации. Биогибридные системы являются энергоэффективными, саморегенерирующимися и могут интегрироваться в существующую инфраструктуру благодаря модульной конструкции [9].

Передовые окислительные процессы

Холодная плазма демонстрирует многообещающие результаты как поддерживающая технология для удаления как микропластика, так и фармацевтических остатков. Исследования показывают, что обработка холодной плазмой полиэтиленовых частиц приводит к образованию функциональных групп (гидроксильных, карбонильных) на поверхности, увеличивая их гидрофильность и поверхностную энергию, что способствует агрегации частиц, а более крупные агломераты легче отделить с помощью процессов осаждения, фильтрации или флотации. Наиболее впечатляющие результаты получены при удалении фармпрепаратов, адсорбированных на поверхности микропластика: эффективность удаления диклофенака превысила 98%, сульфаметоксазола — 99,99%, триметоприма — более 98% [7].

Сравнительный анализ технологий

Для систематизации данных об эффективности различных технологических решений целесообразно представить их в виде таблицы.

Таблица 1

Сравнительная эффективность технологий удаления «emerging contaminants»

Технология	Микропластик	Фармпрепараты	PFAS	Преимущества	Ограничения
Коагуляция/седиментация	До 95%	10-60%	<20%	Широко применяется, низкая стоимость	Неэффективна для малых частиц и PFAS
Песчаная фильтрация	95-99% (для 10-100 мкм)	30-50%	<10%	Распространена на станциях	Не удаляет растворенные загрязнители
ГАУ	-	>90%	50-70%	Высокая эффективность для фармпрепаратов	Требует регенерации/замены
Анионообмен (AIX)	-	-	>90%	Специфичен для PFAS	Неэффективен для других загрязнителей
МБР	>90%	>90%	данные отсутствуют	Комплексная очистка, высокое качество	Мембранное загрязнение
Холодная плазма	Агрегация частиц	>98%	данные отсутствуют	Удаляет оба типа загрязнителей	Лабораторная стадия

ГАУ+АИХ комбинация	-	>90%	>90%	Синергетический эффект	Сложность эксплуатаци и
Биогибридные системы	данные отсутствуют	Активное разложение	Активное разложение	Энергоэффективность, саморегенерация	В стадии разработки

Как итог из приведенных выше данных можно сделать выводы, что традиционные методы очистки (коагуляция, седиментация, фильтрация) не обеспечивают достаточной защиты от «emerging contaminants». Если крупные частицы МП (>100 мкм) удаляются с эффективностью 95-99%, то для частиц размером <10-20 мкм эффективность этих методов резко снижается, что создает риск проникновения наиболее опасных фрагментов в питьевую воду.

В отношении фармацевтических загрязнителей и PFAS традиционные решения очистки демонстрируют крайне низкую эффективность обычно не более 20-30%. Это свидетельствует о том, что существующие станции водоподготовки, спроектированные без учета этих поллютантов, не способны обеспечить барьерную функцию в отношении данной группы загрязнителей.

Для эффективного удаления emerging contaminants необходима ступень доочистки: гранулированный активированный уголь (>90% для фармпрепаратов), анионообменные смолы (>90% для PFAS) и их комбинация, мембранные биореакторы (>90%), а также перспективные технологии (холодная плазма >98%).

Отсутствие в российских нормативах требований к содержанию микропластика и фармпрепаратов в питьевой воде требует гармонизации с международными стандартами для стимулирования модернизации очистных сооружений.

Список литературы

1. Кудряшев К. А. Нормирование микро- и нанопластиков в России: перспективы создания первых ПДК для воды и почвы [Электронный ресурс] // GOST Assistant. — URL: <https://gostassistant.ru/article/normirovanie-mikroplastika-v-rossii-perspektivy-sozdaniya-pervyh-pdk-dlya-vody-i-pochvy> (дата обращения: 18.02.2026).
2. Baresel C., Andersson J., Olofsson L., Sundin A.-M., Malovanyu A., Högberg C.-J. et al. Assessing the potential of activated carbon and anion-exchange in combination to remove organic micropollutants from wastewater – Long term pilot trials at Kungsängsverket WWTP, Uppsala, Sweden // Science of The Total Environment. 2025. Vol. 964. Art. 178628. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178628. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969725002621> (дата обращения: 19.02.2026).
3. Cai T., Tang Z., Gu T., Tong K., Wang X., Chen H. et al. Microplastics in Drinking Water: A Review of Sources, Removal, Detection, Occurrence, and Potential Risks // Toxics. 2025. Vol. 13, No. 9. P. 782. DOI: 10.3390/toxics13090782. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12474263/> (дата обращения: 15.02.2026).
4. Capodaglio A. G. Micro- and Nano-Plastics in Drinking Water: Threat or Hype? Critical State-of-the-Art Analysis of Risks and Approaches // Journal of Xenobiotics. 2025. Vol. 15, No. 3. P. 85. DOI: 10.3390/jox15030085. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12194651/> (дата обращения: 18.02.2026).
5. Łukasiewicz E. Coagulation–Sedimentation in Water and Wastewater Treatment: Removal of Pesticides, Pharmaceuticals, PFAS, Microplastics, and Natural Organic Matter // Water. 2025. Vol. 17, No. 21. Art. 3048. DOI: 10.3390/w17213048. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/17/21/3048> (дата обращения: 21.02.2026).

6. Nguyen D., Nguyen M.-K., Truong Q.-M., Thai V.-A., Pham M.-T., Chang S.W., Nguyen D.D. et al. Microplastics and pharmaceuticals from water and wastewater: Occurrence, impacts, and membrane bioreactor-based removal // Separation and Purification Technology. 2025. Vol. 360. Art. 130959. DOI: 10.1016/j.seppur.2025.130959.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586625000863> (дата обращения: 19.02.2026).
7. Removal of pharmaceutical compounds and PFAS from wastewater, drinking water and groundwater [Электронный ресурс] // LISES Lab of Interdisciplinary Sciences for Environment and Society. — URL: <https://site.unibo.it/lises/en/research-fields/removal-of-pharmaceutical-compounds-and-pfas-from-wastewater-drinking-water-and-groundwater> (дата обращения: 17.02.2026).
8. Targeting pollutants: How the DeDrug-Bio project protects soil, water, and air with biohybrid filtration systems [Электронный ресурс] // Fraunhofer IFAM Magazine. — URL: <https://www.ifam.fraunhofer.de/en/magazine/DeDrug-Bio.html> (дата обращения: 21.02.2026).
9. Wypart-Pawul A., Karwowska B., Caban R., Grobelak A. Cold Plasma-Induced Changes in Polyethylene Particles and Their Binding Affinity to Selected Pharmaceuticals // Molecules. 2025. Vol. 30, No. 18. Art. 3756. DOI: 10.3390/molecules30183756.
URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12472714/> (дата обращения: 21.02.2026).

References

1. Baresel C., Andersson J., Olofsson L., Sundin A.-M., Malovanyy A., Högberg C.-J. et al. Assessing the potential of activated carbon and anion-exchange in combination to remove organic micropollutants from wastewater – Long term pilot trials at Kungsängsverket WWTP, Uppsala, Sweden // Science of The Total Environment. 2025. Vol. 964. Art. 178628. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178628.

URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969725002621>
(accessed: 19.02.2026).

2. Cai T., Tang Z., Gu T., Tong K., Wang X., Chen H. et al. Microplastics in Drinking Water: A Review of Sources, Removal, Detection, Occurrence, and Potential Risks // *Toxics*. 2025. Vol. 13, No. 9. P. 782. DOI: 10.3390/toxics13090782.

URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12474263/> (accessed: 15.02.2026).

3. Capodaglio A. G. Micro- and Nano-Plastics in Drinking Water: Threat or Hype? Critical State-of-the-Art Analysis of Risks and Approaches // *Journal of Xenobiotics*. 2025. Vol. 15, No. 3. P. 85. DOI: 10.3390/jox15030085.

URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12194651/> (accessed: 18.02.2026).

4. Kudryashev K. A. Rationing of micro- and nanoplastics in Russia: prospects for creating the first maximum permissible concentrations for water and soil [Electronic resource] // GOST Assistant.

URL: <https://gostassistant.ru/article/normirovanie-mikroplastika-v-rossii-perspektivy-sozdaniya-pervyh-pdk-dlya-vody-i-pochvy> (accessed: 18.02.2026).

5. Łukasiewicz E. Coagulation–Sedimentation in Water and Wastewater Treatment: Removal of Pesticides, Pharmaceuticals, PFAS, Microplastics, and Natural Organic Matter // *Water*. 2025. Vol. 17, No. 21. Art. 3048. DOI: 10.3390/w17213048.

URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/17/21/3048> (accessed: 21.02.2026).

6. Nguyen D., Nguyen M.-K., Truong Q.-M., Thai V.-A., Pham M.-T., Chang S.W., Nguyen D.D. et al. Microplastics and pharmaceuticals from water and wastewater: Occurrence, impacts, and membrane bioreactor-based removal // *Separation and Purification Technology*. 2025. Vol. 360. Art. 130959. DOI: 10.1016/j.seppur.2025.130959.

URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586625000863> (accessed: 19.02.2026).

7. Removal of pharmaceutical compounds and PFAS from wastewater, drinking water and groundwater [Electronic resource] // LISES Lab of Interdisciplinary Sciences for Environment and Society.
URL: <https://site.unibo.it/lises/en/research-fields/removal-of-pharmaceutical-compounds-and-pfas-from-wastewater-drinking-water-and-groundwater> (accessed: 17.02.2026).
8. Targeting pollutants: How the DeDrug-Bio project protects soil, water, and air with biohybrid filtration systems [Electronic resource] // Fraunhofer IFAM Magazine. URL: <https://www.ifam.fraunhofer.de/en/magazine/DeDrug-Bio.html> (accessed: 21.02.2026).
9. Wypart-Pawul A., Karwowska B., Caban R., Grobelak A. Cold Plasma-Induced Changes in Polyethylene Particles and Their Binding Affinity to Selected Pharmaceuticals // Molecules. 2025. Vol. 30, No. 18. Art. 3756. DOI: 10.3390/molecules30183756.
URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12472714/> (accessed: 21.02.2026).