

УДК 504.064:004.8

ФОКША Е.А., студент гр. ТБ-21М (НИУ МИЭТ)
Научный руководитель ПОПОВА Н.В., к.т.н., доцент (НИУ МИЭТ)
г. Москва

АВТОМАТИЗАЦИЯ АНАЛИЗА МИКРОПЛАСТИКА В ОСАДКАХ СТОЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Микропластик является антропогенным загрязнителем, привлекающим всё большее внимание научного сообщества и регулирующих органов [1, 2], что обусловлено его повсеместным распространением в окружающей среде [1, 3, 4] и негативным влиянием на экосистемы [3, 6] и потенциально на здоровье человека [4, 5, 6].

Одним из основных источников поступления микропластика в окружающую среду являются городские очистные сооружения, которые, принимая сточные воды от населения и промышленности, аккумулируют значительные объёмы микрочастиц [7, 8]. Современные очистные сооружения способны удалять до 97% микропластика из сточных вод, однако практически вся удалённая масса загрязнителя концентрируется в осадке сточных вод [9]. При дальнейшем обращении с осадком – его захоронении на иловых полях или использовании в сельском хозяйстве после компостирования – возникает риск вторичного загрязнения почв, поверхностных и грунтовых вод [7, 8, 10]. Это делает осадки сточных вод важным объектом для экологического мониторинга, а разработку методов их количественного анализа – актуальной научно-практической задачей.

В настоящее время разрабатывается методика количественного анализа микропластика в осадках сточных вод, базирующаяся на международном стандарте ISO 24187:2023 «Principles for the analysis of microplastics present in the environment» [11], которая включает в себя следующие основные этапы:

1. Отбор проб и контроль привнесённого загрязнения – с использованием хлопковой одежды, стеклянной посуды, фильтрацией реактивов, обязательной постановкой холостых проб [12];
2. Пробоподготовка, включающая удаление органической матрицы (окисление 30–35% H_2O_2 или реактивом Фентона при температуре не выше 50°C), плотностное разделение ($NaCl$, при необходимости NaI), фильтрацию через мембранные фильтры (стекловолоконные или поликарбонатные, диаметр пор 0,45–100 мкм) [12];
3. Микроскопический анализ (предварительная идентификация) с использованием стереомикроскопа и метода «горячей иглы» для быстрого отбора потенциальных частиц микропластика [12];
4. Спектральную идентификацию полимеров (в нашем случае используется Рамановская спектроскопия) для подтверждения синтетической природы частиц с созданием библиотеки спектральных сигнатур российских пластиков;

5. Количественную оценку – расчёт концентрации (частиц/г сухого осадка) и распределения частиц по размерам и морфологическим типам (волокна, фрагменты, плёнки, гранулы) на основе подтверждённых данных.

На этапе отработки предлагаемой методики на реальных пробах с городских очистных сооружений были выявлены узкие места, требующие оптимизации – ручной микроскопический анализ и последующая спектральная идентификация.

Временные затраты на анализ пробы осадка объёмом 1 литр при текущем подходе составляют:

- пробоподготовка (химическая обработка + сушка): от 2 до 8 дней;
- микроскопический анализ одной пробы под биноклем: от 2–3 часов до нескольких дней в зависимости от степени загрязнённости фильтра;
- извлечение и архивация частиц пинцетом: дополнительно 1–3 часа на пробу;
- спектральный анализ (каждая частица индивидуально): от нескольких минут до часов.

Помимо временных затрат, существенную проблему представляет человеческий фактор: оператор может пропускать мелкие или прозрачные частицы (особенно размером менее 100 мкм), ошибочно классифицировать природные включения как пластик, а длительная работа приводит к снижению внимания. Межоператорная вариабельность при ручном подсчёте может достигать 30–50%, что ставит под сомнение воспроизводимость результатов.

Таким образом, анализ одной пробы может занимать до 12 дней. Для научных исследований (1–2 пробы в месяц) такая трудоёмкость ещё приемлема. Однако в случае принятия государственных нормативов и введения обязательного мониторинга содержания микропластика в осадках сточных вод потребуется потоковый анализ десятков и сотен проб в месяц, при котором ручной метод становится экономически нецелесообразным.

В данной работе акцент сделан на оптимизацию ручного микроскопического анализа в парадигме бережливого производства, что позволяет системно выявить и устранить основные виды потерь:

- избыточная обработка – ручной перебор и извлечение каждой частицы;
- ожидание – длительный анализ блокирует работу лаборанта и оборудования;
- дефекты – ошибки пропуска и ложного обнаружения (в том числе из-за человеческого фактора);
- излишние перемещения – физическое перемещение частиц в архивные планшеты;
- неиспользованный потенциал – квалифицированный лаборант тратит время на рутинный счёт вместо экспертной работы.

В качестве решения предложена автоматизация этапа микроскопического скрининга с использованием технологий компьютерного зрения и машинного обучения. В последние годы для автоматизации анализа микропластика всё активнее применяются методы глубокого обучения, например, в работе [13] предложена архитектура Mask R-CNN для детекции микроволокон в осадках сточных вод, достигнута средняя точность (mAP) 68–72% на датасете из более

чем 1200 изображений, а также создано приложение MicroFiberDetect, значительно сокращающее время анализа. В [14] для классификации форм микропластика на гиперспектральных изображениях (11 042 частицы, 7 матриц, включая сточные воды) предложена архитектура MobileNet, которая показала точность до 100% на тестовой выборке. Эти результаты подтверждают перспективность использования компьютерного зрения для потокового анализа микропластика и в сложных матрицах, таких как осадки сточных вод.

В рамках настоящего исследования разрабатывается программное обеспечение для автоматизации микроскопического анализа с использованием методов искусственного интеллекта, включая компьютерное зрение и машинное обучение. Под компьютерным зрением понимается совокупность алгоритмов, позволяющих автоматически выделять и распознавать частицы микропластика на микроскопических изображениях. Машинное обучение обеспечивает обучение нейросетевых моделей на размеченных датасетах и их последующее применение для детекции, сегментации и классификации частиц по морфологическим признакам.

Программное обеспечение выполняет две основные функции:

1. Обучение нейросетевых моделей на размеченных датасетах (собственных и открытых).
2. Автоматизированный анализ микроскопических изображений новых проб с использованием обученной модели, включающий автоматический подсчёт и формирование количественных отчётов.

Такой подход позволяет не только автоматизировать рутинные операции, но и повысить воспроизводимость результатов за счёт исключения человеческого фактора.

Для обучения нейросетевых моделей планируется использование:

- собственных датасетов – не менее 500 размеченных фотографий, полученных в ходе апробации методики на пробах с очистных сооружений;
- данных из открытых мировых источников (публичные наборы изображений микропластика);
- коллекций других исследовательских групп (при наличии соглашений о научном сотрудничестве).

Общий целевой объём обучающей выборки составляет не менее 1000 размеченных изображений, что сопоставимо с объёмами, использованными в работе [13], и обеспечит устойчивую работу модели на уровне точности детекции не менее 75%.

Автоматизированный анализ изображений включает следующие этапы:

1. Получение фотографий поверхности фильтра с осаждёнными частицами микропластика с помощью цифровой камеры стереомикроскопа (автоматическое или полуавтоматическое сканирование).
2. Предварительная обработка – нормализация освещения, удаление шума (гауссовское размытие), коррекция неравномерного фона, улучшение контраста.
3. Сегментация и детекция частиц с использованием свёрточных нейронных сетей. Планируется сравнение нескольких архитектур (U-Net, Mask R-CNN, YOLOv8) для выбора оптимальной по соотношению точность/скорость.

4. Классификация по морфологическим признакам с автоматическим измерением геометрических параметров (площадь, периметр, диаметр Фере, фактор формы).

5. Формирование количественных отчётов по концентрации частиц (частиц/г сухого осадка) и распределению по размерам.

Ожидается, что внедрение разрабатываемого программного обеспечения позволит предоставить удобный инструментарий для обучения нейросетевых моделей на основе собственных и открытых датасетов, а также сократить время микроскопического анализа одной пробы от нескольких часов при ручном подсчёте до 10–20 минут при автоматизированной обработке, снизить межоператорную вариабельность с 30–50% до менее 5% и обеспечить масштабируемость метода для задач потокового мониторинга.

Дальнейшие исследования будут направлены на расширение обучающих выборок, повышение точности классификации типов полимеров, завершение создания библиотеки спектральных сигнатур российских пластиков, оптимизацию этапа спектральной идентификации, создание цифровой лабораторной информационной системы для хранения, обработки и прослеживания результатов на всех этапах – от приёма пробы до формирования итогового отчёта. Реализация этих направлений позволит создать полноценную технологическую платформу для массового мониторинга микропластика в осадках сточных вод.

Список литературы:

1. Kamalasekaran K., Sundramoorthy A.K. A review on microplastics: sources, environmental fate, degradation pathways, and analytical identification methods // RSC Advances. 2026. Vol. 16. P. 13851–13874.
2. Лунева Е.В. Правовая охрана поверхностных водных объектов от микропластика в России // Журнал российского права. 2023. № 2. DOI: 10.12737/jrl.2022.021.
3. Лазарева А.М., Ипатова В.И., Ильина О.В., Тодоренко Д.А., Маторин Д.Н., Байжуманов А.А. Токсическое влияние микрочастиц пластика на культуру *Scenedesmus quadricauda*: взаимодействие между микрочастицами пластика и водорослью // Вестник Московского университета. Серия 16. Биология. 2021. № 4.
4. Константинова Ю.С., Чуев А.С. Микропластик в пищевой цепи: невидимая угроза и пути решения // Российский вестник гигиены. 2026. № 1. С. 46–51. DOI: 10.24075/rbh.2026.157.
5. Mondola M.S.A., et al. Microplastic release from food processing to the environment: contamination pathways, health implications, and sustainability perspectives // Sustainable Food Technology. 2026. DOI: 10.1039/D5FB00847F.
6. O'Connor A., et al. Toxicological impacts of microplastic fibers: A review assessing risk to human and aquatic health // Environmental Research. 2026. Vol. 288(Pt 2). 123272. DOI: 10.1016/j.envres.2025.123272.
7. Фокша Е.А. Городские очистные сооружения как источник загрязнения водных объектов микропластиком // Производственные системы будущего: опыт внедрения Lean и экологических решений: сборник статей Международной

научно-практической конференции. Кузбасский государственный технический университет. 2025. С. 420–426. [Самоцитирование]

8. Gündoğdu S., et al. Micro- and nanoplastic pollution in urban influenced aquatic environments // *Marine Pollution Bulletin*. 2026. Vol. 223. 119048.

9. Saur T., Paillet F., Robert S., Alibar J.-C., Loret J.-F., Barillon B. Fate of Microplastic Pollution Along the Water and Sludge Lines in Municipal Wastewater Treatment Plants // *Microplastics*. 2025. Vol. 4(2). 19.

10. Bandini F., Taskin E., Bellotti G., et al. The treatment of the organic fraction of municipal solid waste as a possible source of micro- and nano-plastics in agroecosystems // *AGRIS/FAO*. 2024.

11. ISO 24187:2023 – Principles for the analysis of microplastics present in the environment. International Organization for Standardization.

12. Ершова А.А. Методические рекомендации обработки природных проб для выделения частиц микропластика. Лаборатория исследования пластикового загрязнения природной среды «ПластикЛаб», Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ). 2024. 14 с.

13. Martí-Pérez F., Domínguez-Rodríguez A., Ferri C., Monserrat C., Luján-Facundo M.-J., Ferrer-Polonio E., Bes-Piá A., Mendoza-Roca J.-A. Detection of microfibrils in wastewater sludge with deep learning // *Results in Engineering*. 2025. Vol. 26. 104208.

14. Liu Y., Zhao G., Liu F., Højris M.R., Mandáková T., Borregaard T., Vollertsen J. Deep learning-based shape classification for hyperspectral-imaged microplastics // *Analytical Chemistry*. 2025. Vol. 97(38). P. 20798–20808.