



Разработка и апробация программного обеспечения для количественной оценки микрочастиц пластика в биологических объектах на примере почечной ткани крыс

©Д.О. Каримов^{1,2}, Ю.В. Рябова^{1*}, А.Р. Ахмадеев¹, Э.Ф. Репина¹, Н.Ю. Хуснутдинов¹, Э.Р. Кудояров¹

¹ Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека, Уфа, Россия

² Национальный НИИ общественного здоровья им. Н.А. Семашко, Москва, Россия

* Ю.В. Рябова, Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека, 450106, Уфа, ул. Степана Кувыкина, 94, ryabovayuvl@yandex.ru

Поступила в редакцию 17 июля 2025 г. Исправлена 18 октября 2025 г. Принята к печати 20 сентября 2025 г.

Резюме

Актуальность: Микропластики пластика повсеместно обнаруживаются в окружающей среде и доказано накапливаются в тканях животных и человека, вызывая окислительный стресс, воспаление и другие токсические эффекты. Точность оценки их органоспецифического распределения ограничена, поскольку высокочувствительные спектроскопические методы являются дорогими и трудоёмкими, а визуальная гистология – субъективной.

Цель исследования: Разработка и апробация программного обеспечения для автоматизированной количественной оценки микропластиков в биологических тканях на основе методов компьютерного зрения.

Материалы и методы: Экспериментальная апробация проведена на биологических образцах, полученных от лабораторных животных, подвергшихся воздействию микропластиков полистирола размером 100, 500 и 1000 нм. Обработка микрофотографий выполнялась с применением светофильтра EGFP. Представлены результаты разработки и апробации программного обеспечения для количественной оценки микропластиков пластика в тканях экспериментальных животных с использованием библиотек OpenCV, NumPy и Tkinter на языке Python 3.10.

Результаты: Полученные количественные данные подтверждают, что после однократного системного введения полистирольные частицы диаметром 100, 500 и 1000 нм накапливаются в паренхиме почек, и характер их депонирования зависит от геометрических параметров. Наибольшее число отдельных частиц обнаружено в группах 100 и 1000 нм, тогда как максимальная плотность конгломератов пришлась на фракцию 500 нм.

Заключение: Разработанное программное обеспечение обеспечивает гибкость за счет настройки параметров обработки изображений, что делает его применимым для различных типов биологических образцов. Полученные данные подтверждают эффективность предложенного подхода, который позволяет минимизировать влияние человеческого фактора и стандартизировать процесс анализа.

Ключевые слова: микропластик, методы компьютерного зрения, программное обеспечение, количественная оценка, эксперимент

Цитировать: Каримов Д.О., Рябова Ю.В., Ахмадеев А.Р., Репина Э.Ф., Хуснутдинов Н.Ю., Кудояров Э.Р. Разработка и апробация программного обеспечения для количественной оценки микропластиков пластика в биологических объектах на примере почечной ткани крыс. *Инновационная медицина Кубани*. 2026;11(2):64–70. <https://doi.org/10.35401/2541-9897-2026-11-2-64-70>

Development and Validation of Software for Quantitative Assessment of Microplastic Particles in Biological Specimens: A Rat Kidney Model

©Denis O. Karimov^{1,2}, Yuliya V. Ryabova^{1*}, Aidar R. Akhmadeev¹, Elvira F. Repina¹, Nadezhda Yu. Khusnutdinova¹, Eldar R. Kudoyarov¹

¹ Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, Russian Federation

² N.A. Semashko National Research Institute of Public Health, Moscow, Russian Federation

* Yuliya V. Ryabova, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, 94 Stepana Kuvykina St., Ufa, 450106, Russian Federation, ryabovayuvl@yandex.ru

Received: 17 July, 2025. Received in revised form: October 18, 2025. Accepted: September 20, 2025.

Abstract

Background: Microplastic particles (MPs) are ubiquitous detected in the environment and have been shown to accumulate in animal and human tissues, inducing oxidative stress, inflammation, and other toxic effects. The accuracy of assessing their organ-specific distribution remains limited: highly sensitive spectroscopic techniques are expensive and labor-intensive, while visual histology is subjective.



Objective: To develop and validate software for the automated quantitative assessment of microplastic particles in biological tissues using computer vision methods.

Materials and methods: Experimental validation was conducted on biological samples obtained from laboratory animals exposed to polystyrene microplastic particles measuring of 100, 500 and 1000 nm. Microphotographs were processed using an EGFP filter set. The results of the development and validation of software for the quantitative assessment of microplastic particles in the tissue of experimental animals are presented, implemented using the OpenCV, NumPy and Tkinter libraries in Python 3.10.

Results: The obtained quantitative data demonstrate that following a single systemic administration, polystyrene particles with diameters of 100, 500, and 1000 nm accumulate in the renal parenchyma, with deposition patterns dependent on their geometric parameters. The highest number of individual particles was observed in the 100 and 1000 nm groups, whereas the maximum density of conglomerates was found in the 500 nm fraction.

Conclusions: The developed software provides flexibility through adjustable image processing parameters, making it applicable to various types of biological samples. The obtained data confirm the effectiveness of the proposed approach, which minimizes the influence of the human factor and enables standardization of the analysis process.

Keywords: microplastics, computer vision, software, quantitative assessment, experimental study

Cite this article as: Karimov DO, Ryabova YuV, Akhmadeev AR, Repina EF, Khusnutdinova NYu, Kudoyarov ER. Development and validation of software for quantitative assessment of microplastic particles in biological specimens: a rat kidney model. *Innovative Medicine of Kuban*. 2026;11(2):64–70. <https://doi.org/10.35401/2541-9897-2026-11-2-64-70>

Введение

Микрочастицы пластика (МП) на сегодняшний день признаны одними из наиболее распространённых антропогенных загрязнителей [1, 2]. Они обнаруживаются в морской и пресной воде, донных отложениях, почвах, атмосферном аэрозоле, в продуктах питания и питьевой воде [1]. Актуальные данные, опубликованные в мировой научной литературе, свидетельствуют о способности МП накапливаться в организме млекопитающих [3, 4] и человека [5, 6], что подтверждает способность полимерных частиц преодолевать биологические барьеры и системно распространяться.

Результаты *in vitro* и *in vivo* экспериментов указывают на широкий спектр неблагоприятных эффектов МП: индукцию окислительного стресса, воспалительную реакцию, нарушение барьерной функции эпителия и апоптоз [3, 4, 7–9]. Тяжесть токсического действия во многом определяется физико-химическими характеристиками частиц [10]. Мелкие фракции свободно проникают внутрь клеток, тогда как частицы порядка 2000 нм и выше способны задерживаться в органах с интенсивной перфузией, включая почки [11–14]. Дополнительный риск формирует свойство МП адсорбировать гидрофобные загрязнители, повышая их биодоступность [15, 16].

Несмотря на возрастающий объём работ о биологическом действии МП, сведения о тканеспецифическом накоплении остаются фрагментарными. Применяемые количественные методы, основанные на инфракрасной или Раман-спектроскопии, термодеструктивном анализе и масс-спектрометрии, обеспечивают высокую чувствительность, но требуют дорогостоящего оборудования, сложной пробоподготовки и не всегда позволяют учесть агрегацию частиц в тканях [17, 18]. Полуколичественная визуальная оценка гистологических срезов легче внедряется в лабораторную практику, однако остаётся субъективной и мало сопоставимой между исследовательскими лабораториями. С учётом вышесказанного, формат

компьютерного зрения с автоматизированным подсчётом и морфометрией представляется оптимальным компромиссом между доступностью и воспроизводимостью.

Одним из перспективных направлений в этой области является использование методов компьютерного зрения, которые уже доказали свою эффективность в задачах анализа изображений в биологии и медицине [19]. Однако специализированные решения, адаптированные к детекции микропластика в биологических тканях, до сих пор отсутствуют.

Цель исследования

Разработка и апробация программного обеспечения для автоматизированной количественной оценки микрочастиц пластика в биологических тканях на основе методов компьютерного зрения.

Материалы и методы

Программное обеспечение для количественной оценки микрочастиц пластика и их конгломератов в биологических образцах было разработано на языке Python 3.10 с использованием библиотек OpenCV и NumPy. Код не накладывал ограничений на размер входного файла, что позволило анализировать микрофотографии в высоком разрешении. Использовались изображения в формате TIFF (англ. Tagged Image File Format). Рабочий цикл программы включал шесть этапов: выбор входного и выходного каталогов, задание параметров частиц (форма и размер), преобразование RGB-изображения в 8-битное градационное и формирование суммарной маски с использованием дилатации для учёта как ярких, так и слабосветящихся объектов при разной освещённости. Затем выполнялся многоступенчатый анализ контуров: их поиск, фильтрация по площади и округлости, окрашивание и подсчёт. Для классификации по форме применялась метрика округлости ($O=4\pi \times S/P^2$), с пороговым значением, задаваемым вручную. Далее формировалась маска, исключая индивидуальные частицы,

проводилась пороговая обработка для выявления конгломератов и анализ их контуров. Пример обработки изображения представлен на рисунке 1. На финальном этапе осуществляется сохранение обработанных изображений с учётом классификации обнаруженных объектов (рис. 1В). Программой самостоятельно выполняется расчёт метрик: площадь МП и их конгломератов в образце, плотность МП и их конгломератов в образце. Далее осуществляется экспорт результатов анализа в виде таблицы Microsoft Excel. Разработанное программное обеспечение учитывает следующие параметры: количество МП, их общая площадь и плотность МП из расчёта на 1000×1000 пикселей; количество конгломератов МП, площадь конгломератов МП и их плотность.

Относительная плотность МП или их конгломератов на единицу площади рассчитывалась по формуле (2): $D=N/A$, где D – искомый параметр, N – число частиц или их конгломератов, A – общая площадь.

Создание графического интерфейса было осуществлено с использованием стандартной кроссплатформенной событийно-ориентированной графической библиотеки Tkinter, предназначенной для организации диалогов в программе с помощью оконного графического интерфейса. Интерфейс включает области выбора каталогов, поля для ввода параметров, кнопку запуска обработки и область отображения статуса текущей операции.

Экспериментальная апробация программного обеспечения осуществлялась в эксперименте *in vivo* (одобрено биоэтическим комитетом учреждения, протокол № 01-10 от 09.10.2024 г.). В обращении с животными соблюдены юридические и этические нормы, принятые в Российской Федерации. Уход за животными осуществляли в соответствии с ГОСТ 33215–2014 «Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила оборудования помещений и организации проце-

дур», манипуляции выполнялись в соответствии с Директивой Европейского парламента и Совета Европейского союза 2010/63/ЕС от 22.09.2010 г. о защите животных, используемых для научных целей. В исследовании использовались крысы-самки линии Wistar возрастом 12–14 недель и массой тела 180–200 г на начало исследования. Учёт стадий эстрального цикла не проводился, однако благодаря идентичным условиям содержания и случайному распределению животных по группам, влияние полового цикла на результаты считается минимальным. Животных в количестве 12 особей разделили на 4 равные группы. С учётом ограниченного количества животных в каждой группе для повышения достоверности результатов от каждого органа отбиралось по 4 образца тканей из случайных областей, что в сумме обеспечивало 12 наблюдений на группу. Одна из которых являлась контрольной («С»), а другие были подвергнуты внутрисердечному введению суспензии микрочастиц полистирола (далее – МП) размером 100, 500 либо 1000 нм, общим объёмом 1 мл («М100», «М500», «М1000» соответственно). Использовались МП, меченные флуоресцентным красителем на стадии производства. Частицы имели сферическую форму и были предоставлены производителем в виде 1%-й суспензии в дистиллированной воде (QiuHuan, КНР).

Внутрисердечное введение, хотя и не соответствует предполагаемым путям поступления МП в организм [20], было выбрано для точного контроля дозы и исключения кишечной абсорбции, легочных фильтров. Известно, что до 10% наночастиц размером 60 нм оседают в кишечнике крыс [11], а более крупные частицы хуже распределяются в тканях [12]; частицы свыше 150 мкм вовсе не проникают в кровоток [13]. По данным К.Е. Сагг и соавт. (2012), лишь 0,3% перорально введённых частиц размером 2 мкм преодолевают кишечный барьер [14].

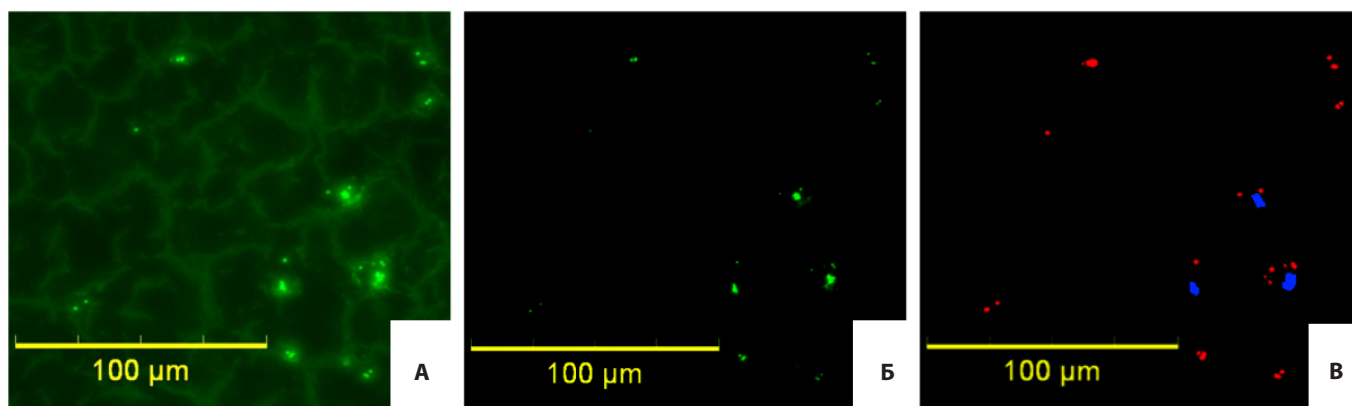


Рисунок 1. Пример результата: исходная микрофотография ткани (А); промежуточный этап (Б) и сегментация; и классификация, где красным отмечены индивидуальные МП; синим – конгломераты (В)

Figure 1. Example of results: original tissue microphotograph (A); intermediate processing stage (Б) and segmentation; classification, with individual MPs marked in red and conglomerates in blue (B)

После 5 ч воздействие осуществлялось умерщвление животных, предварительно наркотизированных углекислым газом, путём декапитации. Период времени в 5 ч позволяет оценить начальные стадии распределения и метаболизма МП в организме, что важно для понимания их биодоступности и потенциального воздействия на ткани.

Сразу же после осуществлялся отбор образцов для приготовления срезов на микротоме-криостате Leica CM 1520 (Leica BioSystems, Германия) при -70° в криогеле ($n=12$ для каждой группы). После срезы помещались на предметное стекло и немедленно фотографировались при увеличении $\times 200$ со светофильтром EGFP в имиджере Celena X (Logos Biosystems Inc., Южная Корея). Дальнейшая количественная оценка содержания МП в биологических образцах осуществлялась с применением специально разработанной программы Microplastic detector, описанной выше (получен Патент РФ на программу для ЭВМ, № 2024685872 от 02.11.2024 г.).

Для валидации разработанного программного обеспечения была проведена полуколичественная оценка накопления микрочастиц пластика в образцах почек, исследованных ранее количественно с помощью описанного выше способа. Анализ проводили при увеличении $\times 400$, регистрируя флуоресцирующие объекты (отдельные частицы или их конгломераты) в соответствующем канале. Для каждого поля зрения два оператора, «ослепленные к групповой принадлежности» образцов, наличие микрочастиц оценивали по четырёхбалльной шкале. Индекс накопления микрочастиц для каждого органа рассчитывали, как среднее арифметическое значение баллов, полученных для 30 случайно выбранных полей зрения. Использованный метод был подробно описан ранее коллективом авторов [21].

Статистическая обработка результатов осуществлялась с использованием статистического пакета SciPy

на языке Python 3.10 при помощи метода Bootstrap с поправкой Холма-Бонферрони. Различия признавали достоверными при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты

Микрофотографии ткани почек крыс контрольной и опытных групп представлены на рисунке 2. В контрольных препаратах почек фиксировалось лишь ровное фоновое свечение паренхимы без видимых посторонних включений. В образцах животных, получивших микропластик, визуализировались отдельные флуоресцирующие частицы и их конгломераты.

В контрольной группе среднее количество МП составило $6,58 \pm 2,01$ ед., тогда как в группах «М100», «М500» и «М1000» значения были значительно выше: $4071,83 \pm 496,30$ ед., $2088,67 \pm 562,31$ ед. и $4399,42 \pm 829,25$ ед. соответственно ($p=0,001$ для всех групп). Между группами «М100» и «М500» обнаружены статистически значимые различия ($p=0,026$), как и между группами «М500» и «М1000» ($p=0,041$). Однако различия между группами «М100» и «М1000» оказались незначимыми ($p=1,000$). В контрольной группе площадь МП составила $12,25 \pm 5,30$ пикс., тогда как в группах «М100», «М500» и «М1000» она была значительно выше: $47231,96 \pm 5748,63$ пикс. ($p=0,001$), $38415,62 \pm 11145,59$ пикс. ($p=0,003$) и $78687,96 \pm 15156,67$ пикс. ($p=0,001$) соответственно. В группе «К-» относительная плотность МП на единицу площади составила $0,08 \pm 0,02$ ед., а в группе «М100» она была существенно выше и составила $56,82 \pm 6,60$ ($p=0,001$), как и в группах «М500» ($26,01 \pm 6,20$, $p=0,001$) и «М1000» ($57,39 \pm 10,51$, $p=0,001$). Обнаружены различия между группами «М100» и «М500» ($p=0,002$), «М500» и «М1000» ($p=0,021$), но не «М100» и «М1000» ($p=0,974$).

Среднее количество конгломератов в контрольной группе составило $117,75 \pm 34,15$ ед. В группе «М100» это

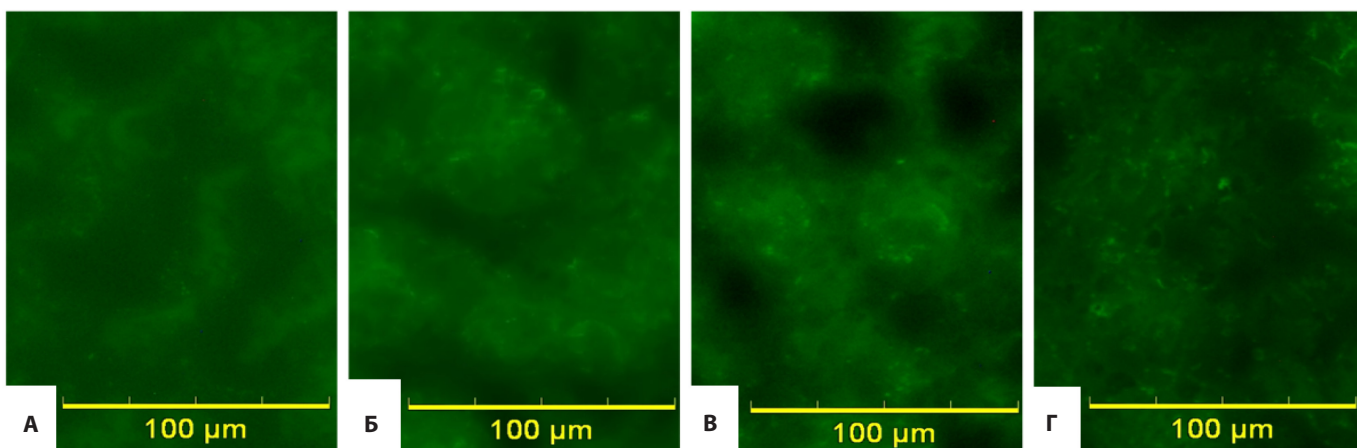


Рисунок 2. Микрофотографии фрагментов ткани почек животных контрольной группы (А) и экспериментальных животных, подвергшихся воздействию МП размером 100 (Б), 500 (В) и 1000 (Г), увеличение $\times 200$

Figure 2. Microphotographs of kidney tissue fragments from control animals (A) and experimental animals exposed to microplastics measuring 100 nm (B), 500 nm (B) and 1000 nm (Г), magnification $\times 200$

значение было сопоставимо ($550,25 \pm 219,28$ ед., $p=1,000$), тогда как в группах «M500» и «M1000» оно значительно превышало контрольные показатели: $4776,58 \pm 1461,97$ ед. ($p=0,006$) и $477,00 \pm 98,74$ ед. ($p=0,004$) соответственно. Для конгломератов МП в контрольной группе площадь составила $1290,04 \pm 357,77$ пикс., а в группах «M100», «M500» и «M1000» – $9942,04 \pm 3330,32$ пикс. ($p=0,009$), $88245,79 \pm 27878,82$ пикс. ($p=0,001$) и $23015,00 \pm 4773,19$ пикс. ($p=0,001$) соответственно. В группе «К-» относительная плотность конгломератов МП на единицу площади составила $1,42 \pm 0,42$ ед., в группе «M100» она была сопоставима и составила $6,68 \pm 2,59$ ед. ($p=0,095$). В группе «M500» относительная плотность конгломератов МП на единицу площади оказалась существенно выше контроля ($60,33 \pm 16,74$ ед., $p=0,002$), в группе «M1000» также отличалась от группы «К-» ($6,34 \pm 1,35$ ед., $p=0,003$). Обнаружены различия между группами «M100» и «M500» ($p=0,005$), «M500» и «M1000» ($p=0,005$), но не «M100» и «M1000» ($p=0,913$).

Полуколичественная оценка показала общую согласованность с количественной. В ткани почек количество флуоресцирующих объектов и их конгломератов статистически значимо отличалось от контроля у животных групп МП 100, МП 500 и МП 1000 ($p=0,001$, $p=0,029$ и $p=0,0001$ соответственно). Аналогично результатам количественной оценки, зафиксированы различия между группами МП 100 и МП 500 ($p=0,001$), МП 500 и МП 1000 ($p=0,009$). Вместе с тем, были и различия интерпретации: при количественной оценке не было обнаружено различий между группами МП 100 и МП 1000, в то время как при полуколичественной оценке группы отличались ($p=0,001$) [21].

Обсуждение

Описательная оценка микрофотографий может рассматриваться лишь как предварительная, поскольку не обеспечивает объективной количественной характеристики накопления МП. Количественные данные подтвердили, что после однократного системного введения полистирольные частицы размером 100, 500 и 1000 нм накапливаются в паренхиме почек, причём характер их депонирования зависит от размера: максимальное число отдельных частиц зафиксировано в группах 100 и 1000 нм, наибольшая плотность конгломератов обнаружена у фракции 500 нм.

Полуколичественная оценка, выполненная двумя «ослепленными» операторами, показала сопоставимую картину: все экспериментальные группы статистически достоверно отличались от контроля, а также друг от друга по накоплению частиц. Основное расхождение между методами выявлено при сравнении групп 100 и 1000 нм: количественный метод не зафиксировал различий, тогда как полуколичественный зафиксировал [21]. Это связано с рядом факторов:

субъективностью визуальной оценки, ограничением числа анализируемых полей зрения (30 против 250–300 в количественном анализе), а также меньшей точностью четырёхбалльной шкалы по сравнению с компьютерной обработкой изображений. Несмотря на это, оба подхода измеряют один и тот же параметр, тканевую нагрузку МП, и демонстрируют высокую согласованность при сравнении опытных и контрольной групп.

Сходная зависимость размера от распределения описана для наночастиц металлов и оксидов [22] и, вероятно, обусловлена несколькими механизмами. В первую очередь, это физическое «застывание» крупных частиц в микроциркуляторном русле коркового вещества. Во-вторую, эндоцитоз средних частиц ретикулоэндотелиальными элементами интерстиция с последующей агрегацией. В третью, более быстрая системная элиминация мелких частиц за счёт их частичного выхода через эндотелий и дренажа с мочой.

Накопление конгломератов в тканях вызывает опасения с точки зрения долгосрочных последствий для почечной ткани. Вероятно, такие скопления потенциально способны нарушать реологию капилляров и провоцировать локальные очаги гипоксии, что согласуется с публикациями о тубулоинтерстициальном воспалении и окислительном стрессе при хроническом воздействии МП [23]. Установленные количественные различия дополняют представления о «размерном окне» токсичности. Если частицы около 100 нм преимущественно вовлекаются в клеточные процессы на уровне субклеточных компартментов, то частицы размером порядка 1000 нм склонны к механическому накоплению в васкулярных нишах; фракция 500 нм сочетает обе стратегии. Для почек, уже описанных как орган-мишень для микропластика [23], такое комбинированное депо особенно опасно: агрегаты могут экранировать поверхность частицы, препятствуя её выведению, и одновременно служить субстратом для вторичной сорбции липофильных ксенобиотиков [15, 16], усиливая токсический эффект.

Разработанное программное обеспечение показало высокую эффективность при флуоресцентной микроскопии криосрезов. Переход от визуальной морфологии к числовым метрикам упростил статистический анализ и обеспечил сопоставимость данных между образцами. Гибкие настройки и экспорт в Excel обеспечивают адаптацию алгоритма к другим типам окрашивания и микрочастиц. В отличие от универсальных решений для морфометрии, разработанное программное обеспечение обеспечивает автоматизированную оценку, не требуя от исследователя ручного выполнения многоэтапного макроса или полуавтоматической сегментации, что устраняет межоператорскую вариабельность и минимизирует влияние человеческого фактора. Алгоритм, поскольку изначально

специализирован на детекции микропластика и конгломератов, включает встроенные фильтры по округлости, яркости и площади, а также автоматически различает индивидуальные частицы и скопления.

При всех достоинствах предложенного подхода следует указать ряд ограничений. Использование двумерных криосрезов не позволяет оценить трёхмерную тканевую нагрузку. Внутрисердечное введение, обеспечивая максимальную биодоступность, не отражает естественных путей поступления МП, что требует осторожности при интерпретации полученных данных. Использование коммерческих флуоресцентных микрочастиц полистирола, содержащих краситель уже на этапе производства, позволило валидировать метод детекции на стандартизированных объектах, однако накладывает определённые ограничения на его практическое применение. Важно подчеркнуть, что разработанное программное обеспечение не предлагает нового протокола пробоподготовки, а является инструментом для последующего анализа.

Заключение

Размер микрочастиц пластика является ключевым фактором их распределения в тканях почек, определяя соотношение между одиночными частицами и агрегатами и, следовательно, потенциальные механизмы повреждения.

Новое программное обеспечение доказало свою эффективность для стандартизированной морфометрии, открывая возможность высокопроизводительного скрининга биологических образцов без дорогостоящих аналитических установок.

Вклад авторов

Разработка концепции и дизайна: Д.О. Каримов, Ю.В. Рябова, Э.Ф. Репина
Сбор, анализ и интерпретация данных: А.Р. Ахмадеев, Н.Ю. Хуснутдинова, Э.Р. Кудояров
Разработка и апробация программного обеспечения: Д.О. Каримов, Ю.В. Рябова
Проведение статистического анализа: Д.О. Каримов
Подготовка и редактирование текста: Д.О. Каримов, Ю.В. Рябова, Э.Ф. Репина
Утверждение окончательной версии: все авторы

Author contributions

Concept and design: Karimov, Ryabova, Repina
Acquisition, analysis, or interpretation of data: Akhmadeev, Khusnutdinova, Kudoyarov
Software development and validation: Karimov, Ryabova
Statistical analysis: Karimov
Manuscript drafting and revising: Karimov, Ryabova, Repina
Final approval of the version to be published: all authors

Литература/References

- Zhao S, Kvale KF, Zhu L, et al. The distribution of subsurface microplastics in the ocean. *Nature*. 2025;641(8061):51-61. PMID: 40307520. PMCID: PMC12043517. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08818-1>
- Kwon JH, Kim JW, Pham TD, et al. Microplastics in Food: A Review on Analytical Methods and Challenges. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17(18):6710. PMID: 32942613. PMCID: PMC7559051. <https://doi.org/10.3390/ijerph17186710>
- Guševac Stojanović I, Drakulić D, Todorović A, Martinović J, Filipović N, Stojanović Z. Acute Toxicity Assessment of Orally Administered Microplastic Particles in Adult Male Wistar Rats. *Toxics*. 2024;12(3):167. PMID: 38535900. PMCID: PMC10974097. <https://doi.org/10.3390/toxics12030167>
- Deng Y, Zhang Y, Lemos B, Ren H. Tissue accumulation of microplastics in mice and biomarker responses suggest widespread health risks of exposure. *Sci Rep*. 2017;7:46687. PMID: 28436478. PMCID: PMC5402289. <https://doi.org/10.1038/srep46687>
- Abbasi S, Turner A. Human exposure to microplastics: A study in Iran. *J Hazard Mater*. 2021;403:123799. PMID: 33264903. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123799>
- Leslie HA, van Velzen MJM, Brandsma SH, Vethaak AD, Garcia-Vallejo JJ, Lamoree MH. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environ Int*. 2022;163:107199. PMID: 35367073. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199>
- Золотова Н.А., Джалилова Д.Ш., Цветков И.С. и др. Морфологическая характеристика внутренних органов мышей при длительном потреблении микропластика. *Клиническая и экспериментальная морфология*. 2023;12 (3): 82-92. <https://doi.org/10.31088/cem2023.12.3.82-92>
- Zolotova NA, Dzhaliilova DSh, Tsvetkov IS, et al. Morphological features of the internal organs in mice after prolonged microplastics consumption. *Clinical and experimental morphology*. 2023;12(3):82-92. (In Russ.) <https://doi.org/10.31088/cem2023.12.3.82-92>
- Farag AA, Youssef HS, Sliem RE, et al. Hematological consequences of polyethylene microplastics toxicity in male rats: Oxidative stress, genetic, and epigenetic links. *Toxicology*. 2023;492:153545. PMID: 37169321. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2023.153545>
- Deng Y, Zhang Y, Lemos B, Ren H. Tissue accumulation of microplastics in mice and biomarker responses suggest widespread health risks of exposure. *Sci Rep*. 2017;7:46687. PMID: 28436478. PMCID: PMC5402289. <https://doi.org/10.1038/srep46687>
- Hillery AM, Jani PU, Florence AT. Comparative, quantitative study of lymphoid and non-lymphoid uptake of 60 nm polystyrene particles. *J Drug Target*. 1994;2(2):151-156. PMID: 8069593. <https://doi.org/10.3109/10611869409015904>
- Braakhuis HM, Park MV, Gosens I, De Jong WH, Cassee FR. Physicochemical characteristics of nanomaterials that affect pulmonary inflammation. *Part Fibre Toxicol*. 2014;11:18. PMID: 24725891. PMCID: PMC3996135. <https://doi.org/10.1186/1743-8977-11-18>
- Powell JJ, Faria N, Thomas-McKay E, Pele LC. Origin and fate of dietary nanoparticles and microparticles in the gastrointestinal tract. *J Autoimmun*. 2010;34(3):J226-J233. PMID: 20096538. <https://doi.org/10.1016/j.jaut.2009.11.006>
- Carr KE, Smyth SH, McCullough MT, Morris JF, Moyes SM. Morphological aspects of interactions between microparticles and mammalian cells: intestinal uptake and onward movement. *Prog Histochem Cytochem*. 2012;46(4):185-252. PMID: 22240063. <https://doi.org/10.1016/j.proghi.2011.11.001>
- Li S, Qiao Z, Huang M, et al. Combined exposure of polystyrene microplastics and benzo[a]pyrene in rat: Study of the oxidative stress effects in the liver. *Ecotoxicol Environ Saf*. 2024;278:116390. PMID: 38705037. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116390>
- Deng Y, Yan Z, Shen R, Huang Y, Ren H, Zhang Y. Enhanced reproductive toxicities induced by phthalates contaminated microplastics in male mice (*Mus musculus*). *J Hazard*

Mater. 2021;406:124644. PMID: 33321324. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124644>

17. Ho YW, Lim JY, Yeoh YK, et al. Preliminary Findings of the High Quantity of Microplastics in Faeces of Hong Kong Residents. *Toxics*. 2022;10(8):414. PMID: 35893847. PMID: PMC9394468. <https://doi.org/10.3390/toxics10080414>

18. Zafiu C, Binner E, Beigl P, Vay B, Ebmer J, Huber-Humer M. The dynamics of macro- and microplastic quantity and size changes during the composting process. *Waste Manag*. 2023;162:18–26. PMID: 36921437. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.03.002>

19. Esteva A, Chou K, Yeung S, et al. Deep learning-enabled medical computer vision. *NPJ Digit Med*. 2021;4(1):5. PMID: 33420381. PMID: PMC7794558. <https://doi.org/10.1038/s41746-020-00376-2>

20. Kannan K, Vimalkumar K. A Review of Human Exposure to Microplastics and Insights Into Microplastics as Obesogens. *Front Endocrinol (Lausanne)*. 2021;12:724989. PMID: 34484127. PMID: PMC8416353. <https://doi.org/10.3389/fendo.2021.724989>

21. Ахмадеев А.Р., Рябова Ю.В., Каримов Д.О., Хуснутдинова Н.Ю., Кудояров Э.Р., Валова Я.В. Полуколичественная оценка распределения микропластици пластика в организме при остром воздействии. *Гигиена и санитария*. 2025;104(5):643–647. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-5-643-647>

Ahmadeev A.R., Ryabova Yu.V., Karimov D.O., Khusnutdinova N.Yu., Kudoyarov E.R., Valova Ya.V. Semiquantitative assessment of the distribution of microplastic particles in the body during acute exposure. *Hygiene and Sanitation*. 2025;104(5):643–647. (In Russ.) <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-5-643-647>

22. Sukhanova A, Vozrova S, Sokolov P, Berestovoy M, Karaulov A, Nabiev I. Dependence of Nanoparticle Toxicity on Their Physical and Chemical Properties. *Nanoscale Res Lett*. 2018;13(1):44. PMID: 29417375. PMID: PMC5803171. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2457-x>

23. La Porta E, Exacoustos O, Lugani F, et al. Microplastics and Kidneys: An Update on the Evidence for Deposition of Plastic Microparticles in Human Organs, Tissues and Fluids and Renal Toxicity Concern. *Int J Mol Sci*. 2023;24(18):14391. PMID: 37762695. PMID: PMC10531672. <https://doi.org/10.3390/ijms241814391>

Сведения об авторах

Каримов Денис Олегович, к. м. н., заведующий отделом токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных, Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека (Уфа, Россия); старший научный сотрудник, Национальный НИИ общественного здоровья им. Н.А. Семашко (Москва, Россия). <https://orcid.org/0000-0003-0039-6757>

Рябова Юлия Владимировна, к. м. н., заведующий лабораторией токсикологии отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных, Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека (Уфа, Россия). <https://orcid.org/0000-0003-2677-0479>

Ахмадеев Айдар Ринатович, младший научный сотрудник лаборатории токсикологии отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных,

Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека (Уфа, Россия). <https://orcid.org/0000-0001-7309-4990>.

Репина Эльвира Фаридовна, к. м. н., старший научный сотрудник лаборатории токсикологии отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных, Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека (Уфа, Россия). <https://orcid.org/0000-0001-8798-0846>

Хуснутдинова Надежда Юрьевна, научный сотрудник лаборатории токсикологии отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных, Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека (Уфа, Россия). <https://orcid.org/0000-0001-5596-8180>

Кудояров Эльдар Ренатович, младший научный сотрудник лаборатории генетики отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных, Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека (Уфа, Россия). <https://orcid.org/0000-0002-2092-1021>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author credentials

Denis O. Karimov, Cand. Sci. (Med.), Head of the Department of Toxicology and Genetics with an Experimental Clinic of Laboratory Animals, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology (Ufa, Russian Federation); Senior Researcher, N.A. Semashko National Research Institute of Public Health (Moscow, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0003-0039-6757>

Yuliya V. Ryabova, Cand. Sci. (Med.), Head of the Toxicology Laboratory, Department of Toxicology and Genetics with an Experimental Clinic of Laboratory Animals, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology (Ufa, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0003-2677-0479>

Aidar R. Akhmadeev, Junior Researcher, Toxicology Laboratory, Department of Toxicology and Genetics with an Experimental Clinic of Laboratory Animals, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology (Ufa, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0001-7309-4990>

Elvira F. Repina, Cand. Sci. (Med.), Senior Researcher, Toxicology Laboratory, Department of Toxicology and Genetics with an Experimental Clinic of Laboratory Animals, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology (Ufa, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0001-8798-0846>

Nadezhda Yu. Khusnutdinova, Researcher, Toxicology Laboratory, Department of Toxicology and Genetics with an Experimental Clinic of Laboratory Animals, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology (Ufa, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0001-5596-8180>

Eldar R. Kudoyarov, Junior Researcher, Genetics Laboratory, Department of Toxicology and Genetics with an Experimental Clinic of Laboratory Animals, Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology (Ufa, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0002-2092-1021>

Conflict of interest: none declared.