

УДК 691.175

ОПИСАТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА НАКОПЛЕНИЯ МИКРОПЛАСТИКА В ОРГАНАХ КРЫС ПРИ ВНУТРИСЕРДЕЧНОМ ВВЕДЕНИИ

Гизатуллина А.А., Валова Я.В., Репина Э.Ф., Якупова Т.Г., Каримов Д.Д., Ахмадеев А.Р.

ФБУН «Уфимский НИИ медицины труда и экологии человека», Уфа, Россия

Производство и использование органических полимеров привело к загрязнению окружающей среды микро- и нанопластиком. Учитывая широкое воздействие микропластика (МП), крайне важно изучение конкретных путей, по которым частицы могут проникать и накапливаться в тканях живых организмов.

Материалы и методы. Объектом исследования послужили белые беспородные крысы женского пола. Методом случайной выборки было сформировано 2 группы по 3 животных в каждой. Животным из экспериментальной группы однократно внутрисердечно вводили 50 мкл 1% суспензии флуоресцентного полистирола (100 нм). Животным контрольной группы вводили эквивалентное количество физраствора. Исследование распределения МП в организме лабораторных животных проводилось путём микроскопического анализа различных органов.

Результаты. Органы животных из контрольной группы демонстрировали равномерное умеренное флуоресцентное свечение тканей без признаков накопления посторонних веществ. В группе животных, подвергнутых воздействию частиц МП, были зафиксированы флуоресцентные частицы. Во всех изученных органах (печени, почках, головном мозге, сердце, лёгких и яичниках) отмечены наличие отдельных флуоресцирующих объектов сферической формы, часто формирующих небольшие скопления или конгломераты. Эти структуры располагались преимущественно в функционально значимых зонах органов: вокруг сосудов печени, коркового слоя почек, коры головного мозга, близ альвеолярных структур лёгких, а также возле фолликулов яичников. Наиболее заметные скопления наблюдались именно в этих участках, отличаясь высокой интенсивностью флуоресценции и крупными размерами (до 35 мкм), свидетельствующими о значительной концентрации пластических материалов.

Заключение. Полученные результаты подтверждают способность МП размером 100 нм проникать и накапливаться в различных органах экспериментальных животных.

Ключевые слова: микропластик, внутрисердечная инъекция, аккумуляция, аутбредные крысы.

Для цитирования: Гизатуллина А.А., Валова Я.В., Репина Э.Ф., Якупова Т.Г., Каримов Д.Д., Ахмадеев А.Р. Полуколичественный анализ накопления частиц микропластика в головном мозге крыс после однократного внутрисердечного введения. Медицина труда и экология человека. 2025; 2: 154-172.

Для корреспонденции: Гизатуллина Алина Анваровна, младший научный сотрудник лаборатории генетики отдела токсикологии и генетики с экспериментальной клиникой лабораторных животных, e-mail: alinagisa@yandex.ru.

Финансирование: Отраслевая научно-исследовательская программа Роспотребнадзора на 2021-2025 годы «Научное обоснование национальной системы обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия, управления рисками здоровью и повышения качества жизни населения России», по теме: «Изучение патогенетических механизмов воздействия микропластика на клеточных и животных экспериментальных моделях» № НИОКТР 123020100015-9.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии явных или потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

DOI: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2025-10210>

SEMI-QUANTITATIVE ANALYSIS OF MICROPLASTIC PARTICLE ACCUMULATION IN RAT BRAIN AFTER A SINGLE INTRACARDIAC ADMINISTRATION

Gizatullina A.A., Valova Ya.V., Repina E.F., Yakupova T.G., Karimov D.D., Akhmadeev A.R.

Ufa Research Institute of Occupational Health and Human Ecology, Ufa, Russia

The production and use of organic polymers has led to environmental pollution with micro- and nanoplastics. Given the widespread exposure to microplastics (MPs), it is crucial to study the specific pathways by which particles can penetrate and accumulate in the tissues of living organisms.

Materials and Methods. The study subjects were female white outbred rats. Two groups of 3 animals each were formed by random sampling. Rats in the experimental group received a single intracardiac injection of 50 μ L of a 1% fluorescent polystyrene suspension (100 nm). Control group animals were administered an equivolume amount

of saline solution. The distribution of MPs (microplastics) in laboratory animals was investigated through microscopic analysis of various organs.

Results. The organs of animals from control group exhibited a uniform, moderate fluorescent tissue glow with no signs of foreign substance accumulation. In the group exposed to MP (microplastic) particles, fluorescent particles were detected. In all examined organs (liver, kidneys, brain, heart, lungs, and ovaries), the presence of individual fluorescent spherical objects was noted, often forming small clusters or conglomerates. These structures were predominantly located in functionally significant areas of the organs: around liver blood vessels, the renal cortex, cerebral cortex, near alveolar structures in the lungs, and adjacent to ovarian follicles. The most prominent clusters were observed in these regions, characterized by high fluorescence intensity and large size (up to 35 μm), indicating a significant concentration of plastic materials.

Conclusion. The obtained results confirm the ability of 100 nm-sized microplastics to penetrate and accumulate in various organs of the experimental animals.

Keywords: microplastics, intracardiac injection, blood-brain barrier, accumulation, outbred rats.

For citation: Gizatullina A.A., Valova Ya.V., Repina E.F., Yakupova T.G., Karimov D.D., Akhmadeev A.R. Semiquantitative analysis of microplastic particle accumulation in the rat brain after a single intracardiac injection. *Occupational Health and Human Ecology*. 2025; 2: 154-172.

Correspondence: Alina A. Gizatullina, Junior Researcher, Laboratory of Genetics, Department of Toxicology and Genetics with Experimental Clinic of Laboratory Animals, e-mail: alinagisa@yandex.ru.

Funding: Industry research program of Rospotrebnadzor for 2021-2025 «Scientific substantiation of the national system for ensuring sanitary and epidemiological well-being, managing health risks and improving the quality of life of the population of Russia», on the topic: «Study of the pathogenetic mechanisms of the effects of microplastics on cellular and animal experimental models» No. NIOKTR 123020100015-9.

Conflict of interest: the authors confirm that there are no known conflicts of interest associated with this publication.

DOI: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2025-10210>

Загрязнение микропластиком (МП) представляет собой глобальную экологическую проблему, признанную одной из наиболее значимых в области

охраны окружающей среды. По данным, ежегодный объем производства пластика достигает около 320 миллионов тонн, при этом до 94% отходов пластика попадает в окружающую среду [1].

МП представляет собой пластиковые частицы диаметром менее 5 мм, которые образуются из-за фотоокисления, выветривания, а также механической и биологической деградации более крупных пластиковых отходов. Он может существовать в окружающей среде длительное время из-за своих стабильных химических свойств. Вследствие низкой биоразлагаемости МП способен распространяться по пищевой цепи, представляя потенциальную угрозу для здоровья человека в связи с его возрастающей концентрацией по мере продвижения по трофическим уровням [2].

Понимание распределения и аккумуляции микропластика (МП) различных размеров в организме человека имеет решающее значение для оценки потенциального воздействия этих частиц на здоровье. Результаты показали, что количество микропластика, попадающего в организм человека через пищу, питьевую воду и дыхание, составило $(0-7,3) \times 10^4$, $(0-4,7) \times 10^3$ и $(0-3,0) \times 10^7$ на человека в год, соответственно [3].

После попадания в организм, МП могут распределяться по различным органам и тканям через систему кровообращения [4]. Уровни МП варьируются в зависимости от ткани: кровь (1,6 мкг/мл), ткани сердца (0-7,75 МП/г), грудное молоко (0-2,72 МП/г), печень (4,6 МП/г), селезенка (1,1 МП/г), легкие (0,69-14,1 МП/г), жидкость бронхоальвеолярного лаважа ($9,18 \pm 2,45$ МП/100 мл) [5]. Liu et al. (2022) обнаружили МП в образцах плаценты и мекония, что свидетельствует о его способности преодолевать плацентарный барьер [6]. Это подчеркивает повышенную уязвимость определенных групп населения к пагубному воздействию МП, подчеркивая важность дальнейших исследований основных механизмов его распределения в организме.

Учитывая широкое воздействие МП, крайне важно изучение конкретных путей, по которым МП могут проникать и накапливаться в тканях живых организмов.

Цель работы заключалась в изучении распределения частиц МП в головном мозге, легких, почках, печени, сердце и яичниках крыс после однократного внутрисердечного введения суспензии микрочастиц размером 100 нм.

Материалы и методы. Эксперимент проводили на белых аутбредных крысах женского пола массой 180-200 г. Для экспериментального исследования методом случайной выборки было сформировано 2 группы по 3 животных в каждой. Все

экспериментальные животные содержались в стандартных условиях при постоянной температуре воздуха (20-25°C), уровнем влажности и освещенности. Уход за животными осуществлялся в соответствии с ГОСТ 33215-2014 «Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила оборудования помещений и организации процедур». Все экспериментальные исследования выполнены в соответствии с Директивой Европейского парламента и Совета Европейского союза 2010/63/ЕС от 22.09.2010 о защите животных, использующихся для научных целей.

Животным экспериментальной группы путём однократной внутрисердечной инъекции вводили 50 мкл 1% суспензии микрочастиц полистирола, меченных флуоресцентным красителем (длина волны пика возбуждения – 488 нм, длина волны пика эмиссии – 518 нм), в физиологическом растворе (QiuHuan, КНР). В эксперименте использовали микрочастицы пластика с диаметром 100 нм. Животным контрольной группы вводили эквивалентное количество физраствора.

После 5 часов воздействия осуществлялось умерщвление путём декапитации. При вскрытии животных непосредственно после забоя был проведён отбор фрагментов тканей 6 органов (мозг, печень, почка, легкие, сердце, яичники) от каждого животного каждой группы в сосуды вместимостью 10 мл, по одному кусочку органа животного размером 0,5*0,5*0,5 см³ для приготовления микросрезов замороженных тканей. Хранение кусочков тканей до приготовления срезов на микротоме-криостате осуществлялось при -70°C в криогеле. Криотомия производилась на напольном микротоме-криостате Leica CM 1520 (Leica BioSystems, Германия), толщина срезов составляла 10 мкм, затем срезы помещались на предметное стекло и сразу производилось фотографирование при увеличении 200x со светофильтром EGFP в имиджере Celena X (Logos Biosystems, Южная Корея).

Результаты. На рисунках 1-2 представлены микрофотографии фрагментов печени животных контрольной группы и животных, подвергшихся воздействию микропластика, полученные во флуоресцентном режиме. В печени животных контрольной группы отмечалась равномерная, умеренная флуоресценция гепатоцитов. Не было обнаружено ярко флуоресцирующих объектов сферической формы, их конгломератов либо флуоресцирующих тканевых элементов (рис. 1).

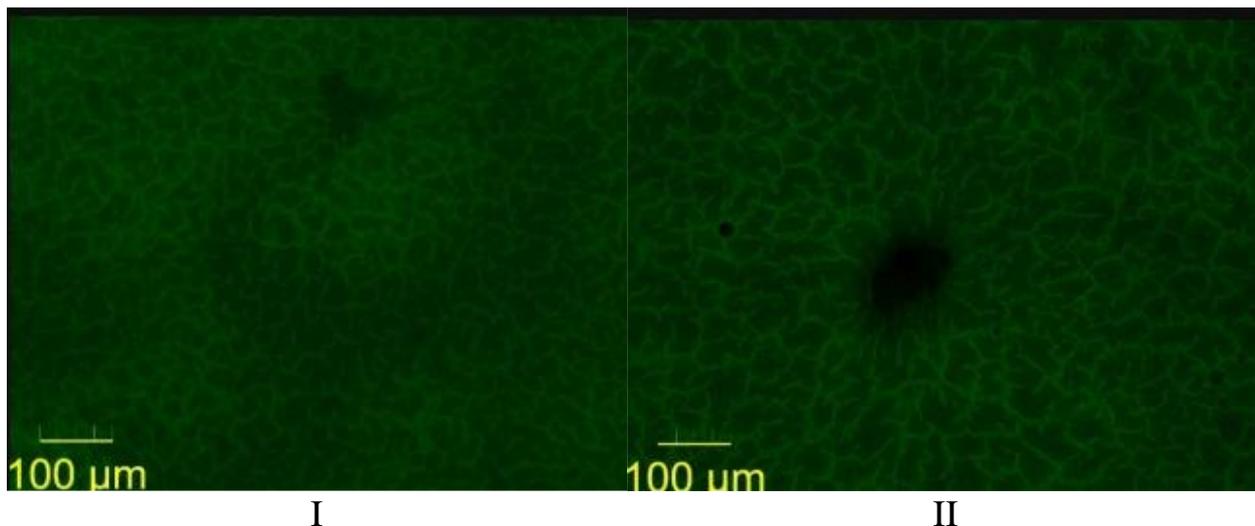


Рисунок 1. Фрагменты печени животных контрольной группы: наблюдалась равномерная, умеренная флуоресценция гепатоцитов (I, II). Увел. X100.

Figure 1. Liver fragments from animals in the control group: uniform, moderate fluorescence of hepatocytes was observed (I, II). Magnification X100.

В печени животных экспериментальной группы наблюдалась равномерная, умеренная флуоресценция гепатоцитов. Встречались флюоресцирующие объекты сферической формы преимущественно в области печеночных триад, а также единичные объекты без четкой локализации (рис. 2).

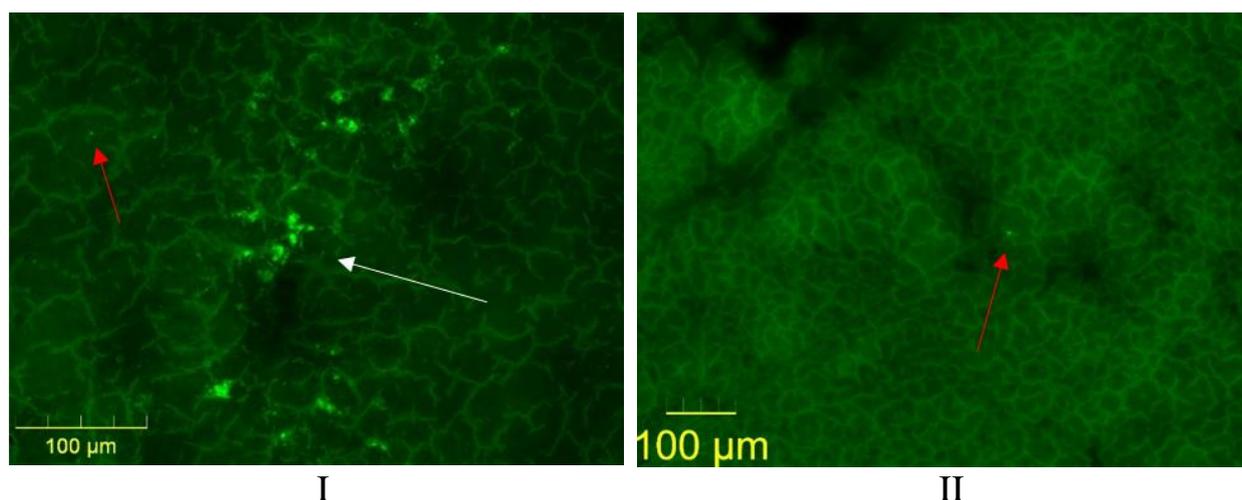


Рисунок 2. Фрагменты печени животных группы «МП 100»: наблюдалась равномерная, умеренная флуоресценция гепатоцитов. Белая стрелка указывает на ярко флуоресцирующие объекты сферической формы преимущественно в области печеночных триад (I). Увел. X200. Встречались также единичные фрагменты без четкой локализации, на которые указывает красная стрелка (I, II). Увел. X10.

Figure 2. Liver fragments from animals of the «MP 100» group: uniform, moderate fluorescence of hepatocytes was observed. The white arrow points to brightly fluorescent spherical objects mainly in the region of the liver triads (I). Magnification X200. There were also single fragments without clear localization, indicated by the red arrow (I, II). Magnification X10.

На рисунках 3 и 4 представлены микрофотографии фрагментов почек животных контрольной группы и животных, подвергшихся воздействию микропластика, полученные во флуоресцентном режиме. В группе отрицательного контроля наблюдается равномерная, умеренная флуоресценция поля зрения с незначительным числом артефактов (рис. 3). Артефакты характеризуются нечеткой формой, слабой интенсивностью свечения.

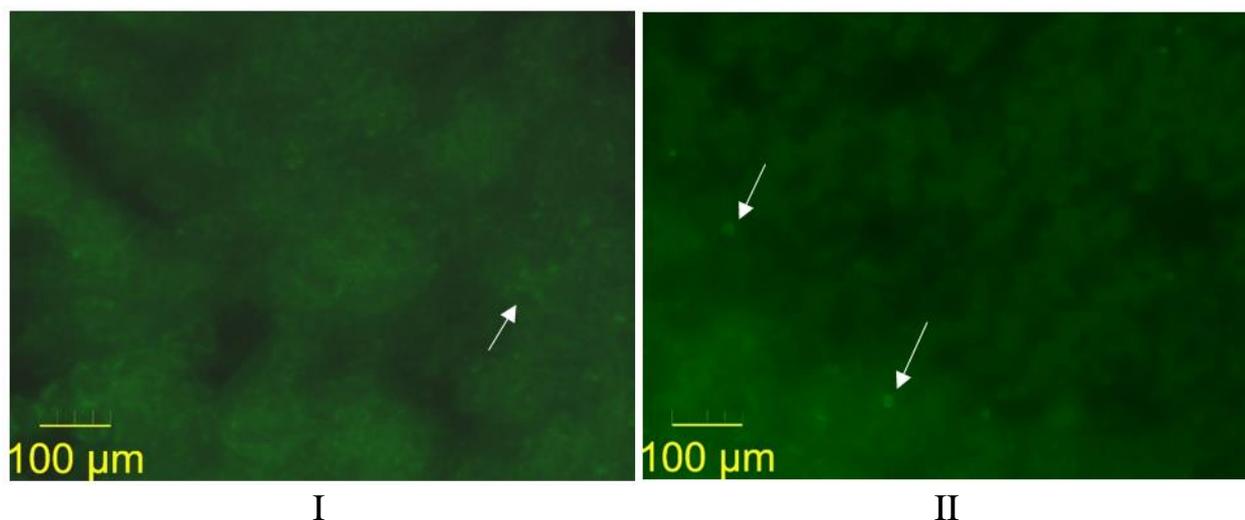


Рисунок 3. Фрагменты почек животных контрольной группы: наблюдалась равномерная, умеренная флуоресценция поля зрения (I, II). Белая стрелка указывает на примеры артефактов. Увел. X100.

Figure 3. Kidney fragments from control animals: uniform, moderate fluorescence of the visual field was observed (I, II). White arrow points to examples of artifacts. Magnification X100.

В почках животных группы «МП 100» наблюдалась равномерная, умеренная флуоресценция поля зрения, но вместе с тем встречались единичные флуоресцирующие тканевые элементы с нечеткими краями, но сферической формы – преимущественно в корковом слое (рис. 4). Объекты имели слабую интенсивность свечения.

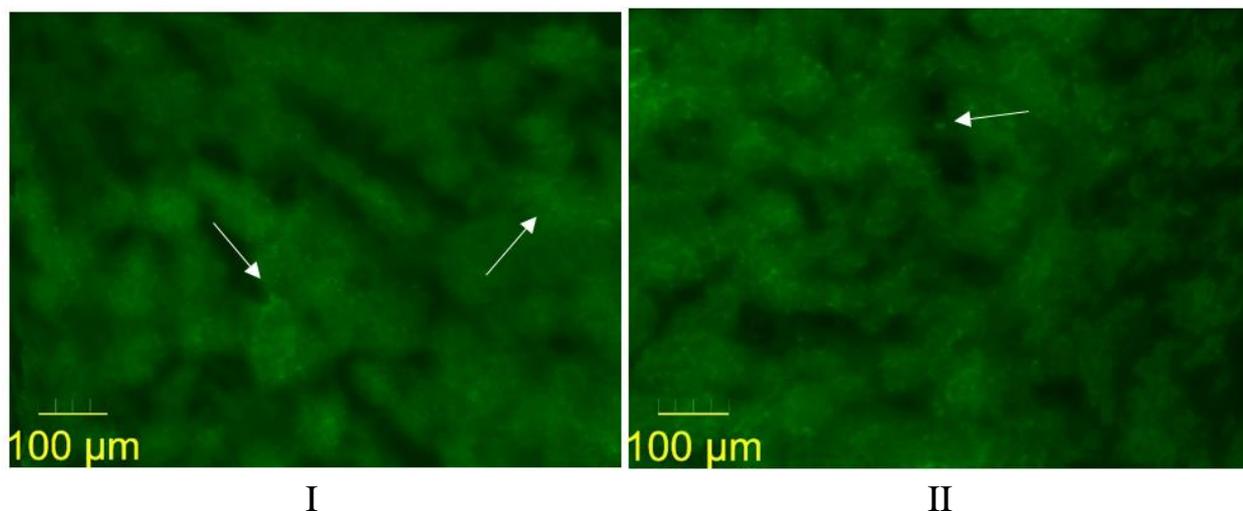


Рисунок 4. Фрагменты почек животных группы «МП 100», белая стрелка указывает на единичные флюорисцирующие тканевые элементы сферической формы (I, II).
Увел. X100.

Figure 4. Kidney fragments from animals of the «MP 100» group, the white arrow points to single fluorescent tissue elements of spherical shape (I, II). Magnification X100.

На рисунках 5, 6 представлены микрофотографии фрагментов головного мозга животных контрольной группы и животных, подвергшихся воздействию микропластика, полученные во флуоресцентном режиме. В контрольной группе на всем поле зрения различались флуоресцирующие тканевые элементы размером порядка 10-12 мкм (рис. 5).

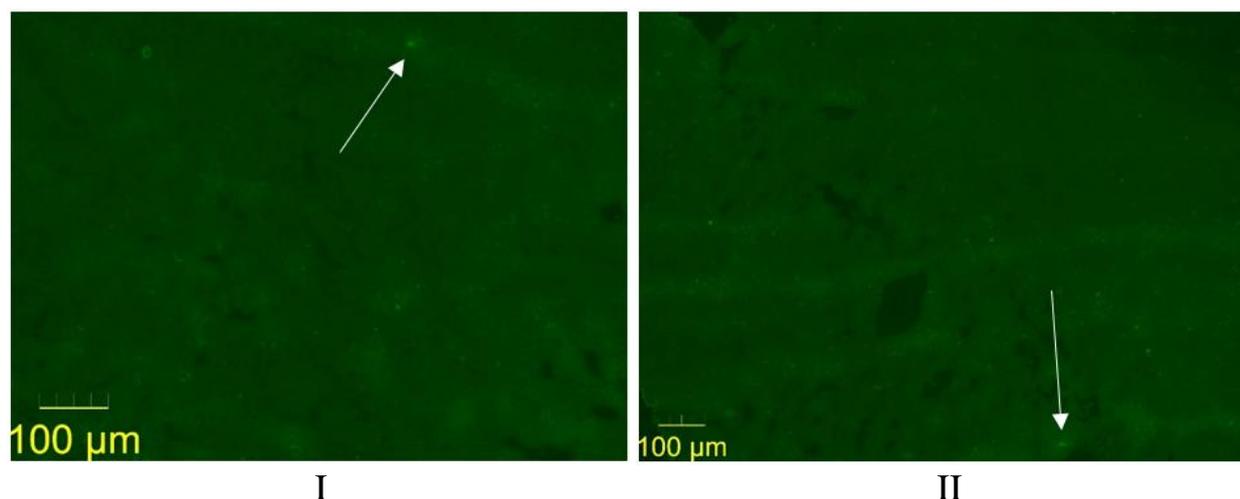


Рисунок 5. Фрагменты головного мозга животных контрольной группы: белая стрелка указывает на флуоресцирующие тканевые элементы, обнаруженные в поле зрения (I, II). Увел. X100.

Figure 5. Brain fragments from animals in the control group: the white arrow points to fluorescent tissue elements found in the field of view (I, II). Magnification X100.

В головном мозге животных группы «МП 100» наблюдались флуоресцирующие тканевые элементы размером порядка 10-12 мкм, а также конгломераты флуоресцирующих объектов с четкими контурами размером порядка 6-12 мкм. Наибольшее скопление указанных объектов и элементов было сосредоточено преимущественно в коре головного мозга (рис. 6).

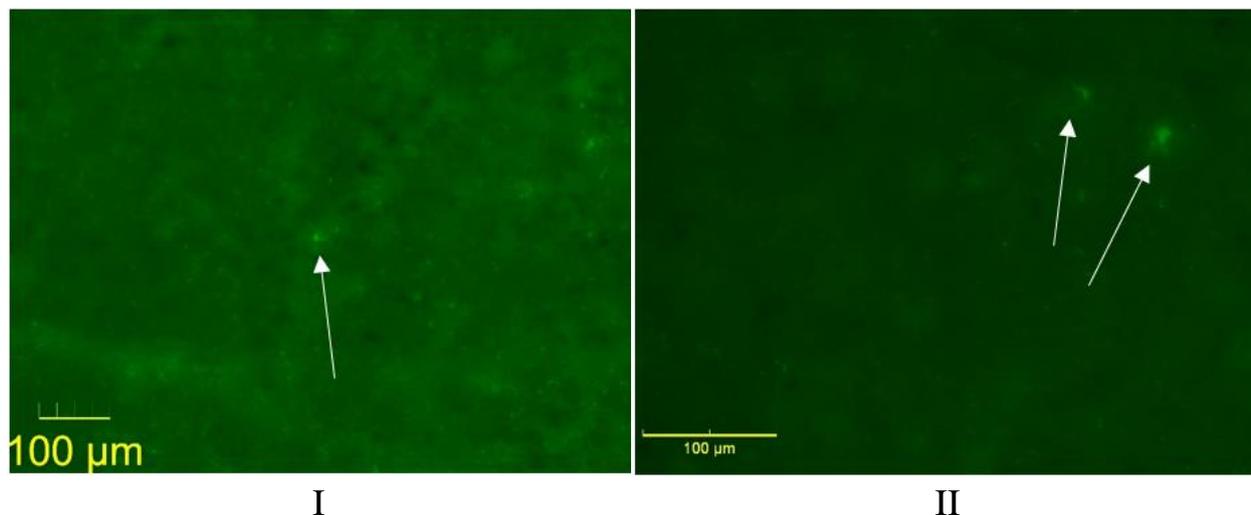


Рисунок 6. Фрагменты головного мозга животных группы «МП 100»: флуоресцирующие тканевые элементы (белая стрелка) (I, II). Увел. X100.

Figure 6. Brain fragments of animals of the «MP 100» group: fluorescent tissue elements (white arrow) (I, II). Magnification X100.

На рисунках 7, 8 представлены микрофотографии фрагментов легких животных контрольной группы и животных, подвергшихся воздействию микропластика, полученные во флуоресцентном режиме. В контрольной группе наблюдается равномерная, умеренная флуоресценция поля зрения. Не обнаружены флуоресцирующие объекты либо тканевые элементы (рис. 7).

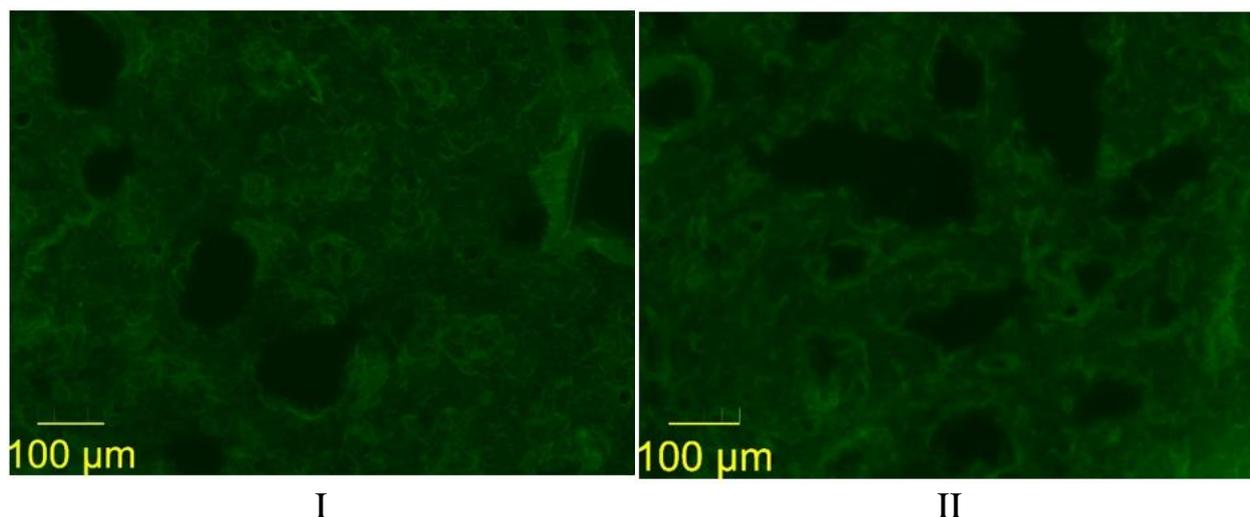


Рисунок 7. Фрагменты лёгких животных контрольной группы: равномерная, умеренная флюоресценция поля зрения (I, II). Увел. X 100.

Figure 7. Fragments of the lungs of animals of the control group: uniform, moderate fluorescence of the visual field (I, II). Magnification X 100.

При исследовании тканей животных, подвергшихся воздействию МП размером 100 нм (группа «МП 100») различались флуоресцирующие объекты размером порядка 2-6 мкм, расположенные преимущественно вблизи ацинусов и альвеолярных ходов. Объекты образовывали конгломераты размером около 6-12 мкм, которые сохраняли четкие контуры и яркую интенсивность свечения. Различались тканевые элементы, характеризующиеся ярким свечением и неясным контуром (рис. 8).

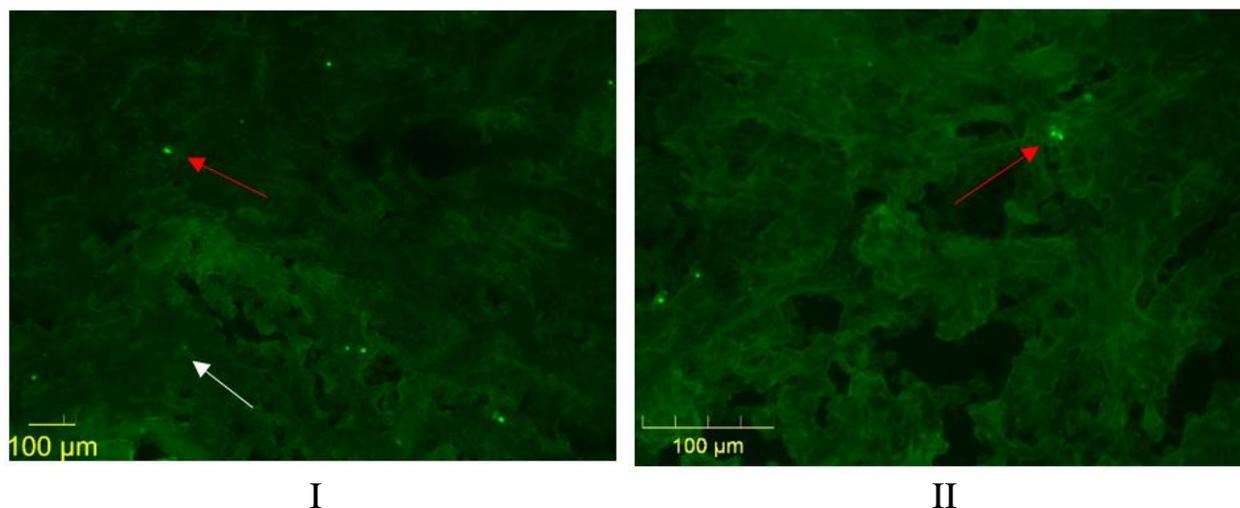


Рисунок 8. Фрагменты лёгких животных группы «МП 100»: флуоресцирующие тканевые элементы (белая стрелка) и объекты (красная стрелка) (I, II). Увел. X 100.

Figure 8. Fragments of lungs of animals of the «MP 100» group: fluorescent tissue elements (white arrow) and objects (red arrow) (I, II). Magnification X 100.

На рисунках 9, 10 представлены микрофотографии фрагментов сердца животных контрольной группы и животных, подвергшихся воздействию микропластика, полученные во флуоресцентном режиме. Наблюдается равномерная, умеренная флуоресценция поля зрения. Встречались флуоресцирующие тканевые элементы с нечеткими контурами неправильной формы (рис. 9).

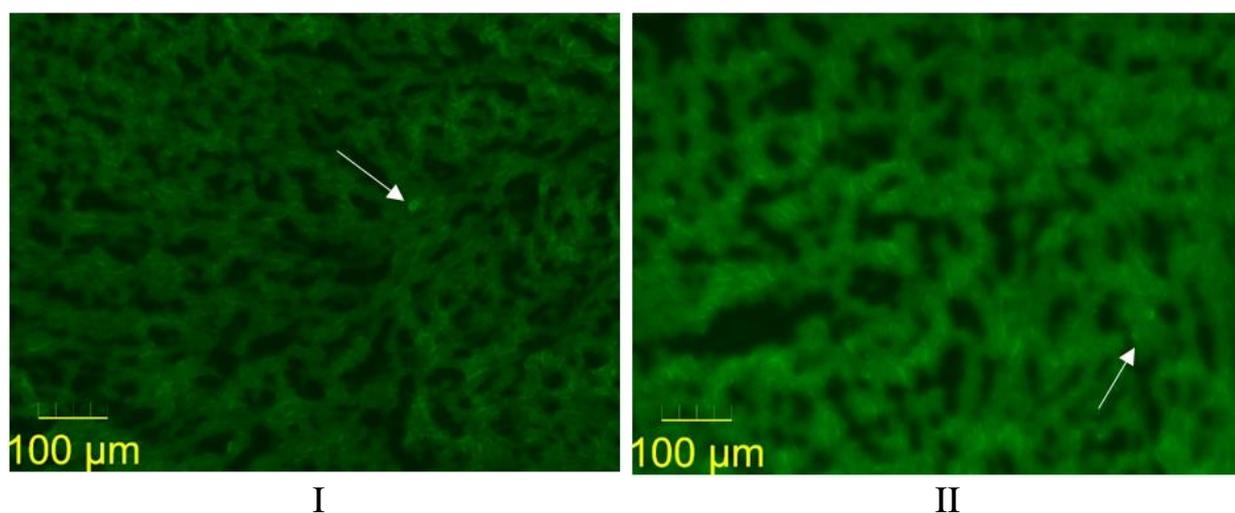


Рисунок 9. Фрагменты сердца животных контрольной группы: белая стрелка указывает флуоресцирующие тканевые элементы (I, II). Увел. X 100.

Figure 9. Heart fragments from animals in the control group: the white arrow indicates fluorescent tissue elements (I, II). Magnification X 100.

При исследовании тканей животных, подвергшихся воздействию МП размером 100 нм (группа «МП 100») различались как единичные флуоресцирующие объекты, так и крупные, порядка 15-25 мкм, конгломераты. Различались тканевые элементы, характеризующиеся ярким свечением и неясным контуром (рис. 10).

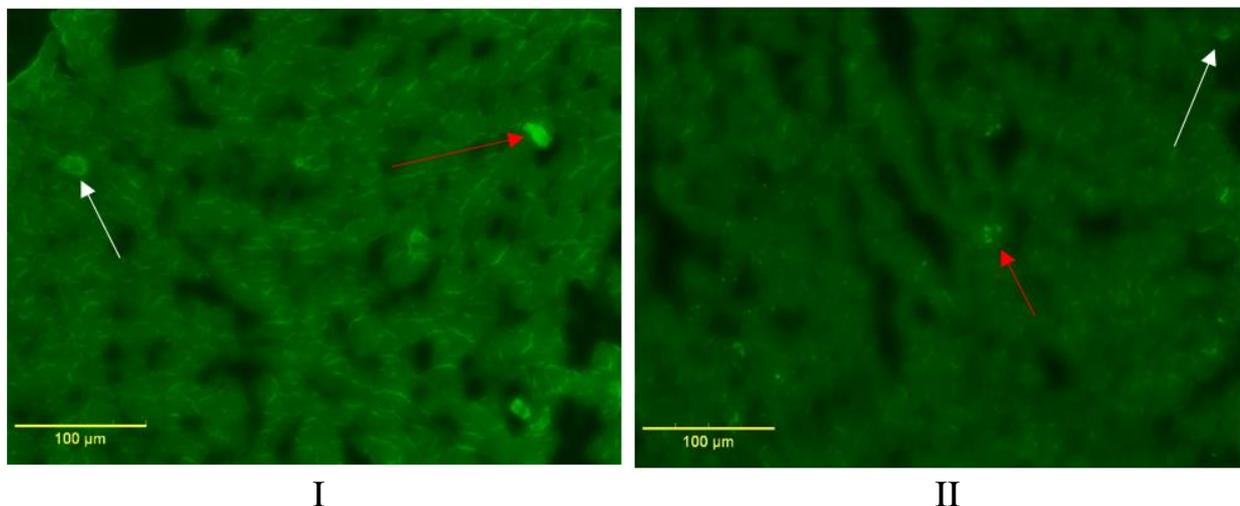


Рисунок 10. Фрагменты сердечной мышцы животных группы «МП 100»: белая стрелка указывает на флуоресцирующие тканевые элементы, красная – на флуоресцирующие объекты с четкими краями либо их конгломераты (I, II). Увел. X 100.

Figure 10. Fragments of the cardiac muscle of animals of the «MP 100» group: the white arrow points to fluorescent tissue elements, the red arrow points to fluorescent objects with clear edges or their conglomerates (I, II). Magnification X 100.

На рисунках 11, 12 представлены микрофотографии фрагментов яичников животных контрольной группы и животных, подвергшихся воздействию микропластика, полученные во флуоресцентном режиме. Наблюдается равномерная, умеренная флуоресценция поля зрения в группе «Контроль» (рис. 11).

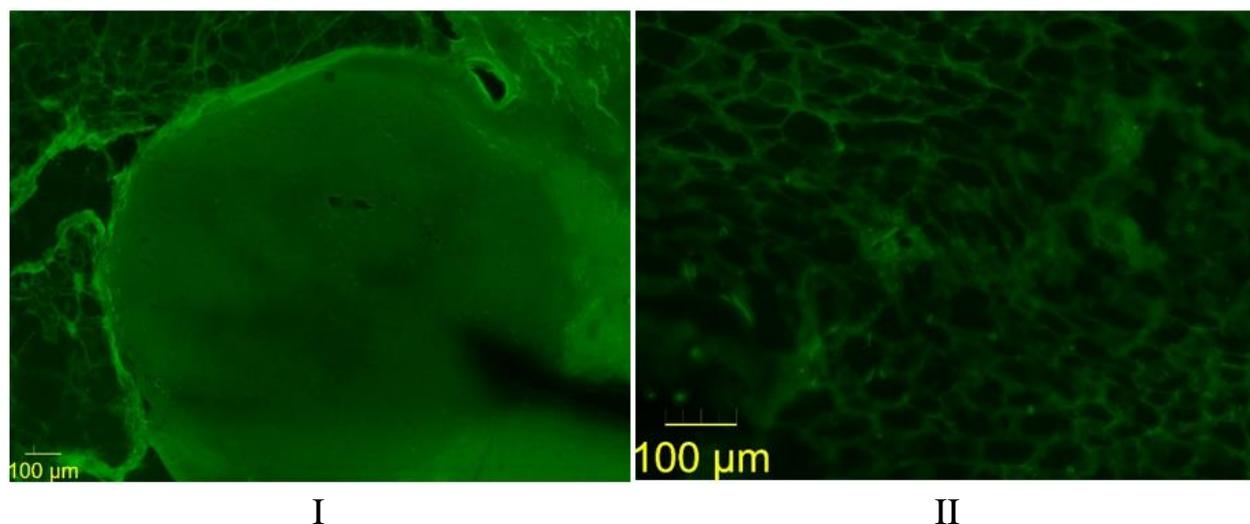


Рисунок 11. Фрагменты яичника животных контрольной группы: равномерная, умеренная флюоресценция поля зрения (I, II). Увел. X 100.

Figure 11. Fragments of the ovary of animals of the control group: uniform, moderate fluorescence of the visual field (I, II). Magnification X 100.

В группе «МП 100» на фоне равномерной и умеренной флюоресценции поля зрения наблюдаются многочисленные флуоресцирующие объекты, их конгломераты, тканевые элементы, располагающиеся преимущественно вокруг фолликулов (рис. 12). Конгломераты характеризуются четкими контурами, ярким свечением, их размер достигает порядка 20-35 мкм.

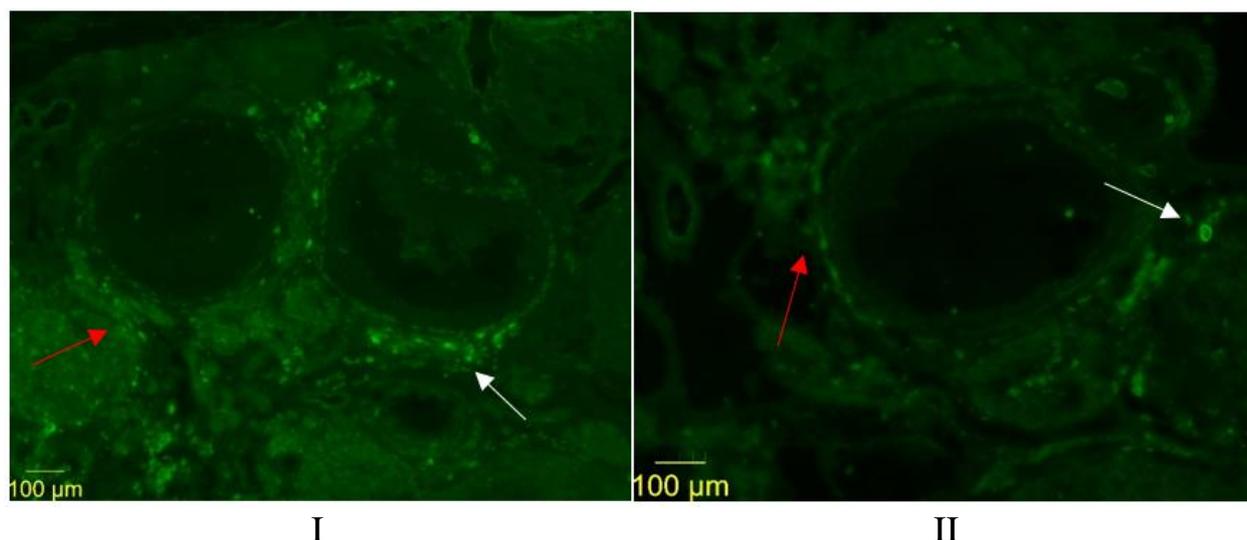


Рисунок 12. Фрагменты яичника животных группы «МП 100»: белая стрелка указывает на флуоресцирующие объекты либо их конгломераты, красная – на тканевые элементы (I, II). Увел. X 100.

Figure 12. Ovarian fragments from animals of the «MP 100» group: the white arrow points to fluorescent objects or their conglomerates, the red arrow points to tissue elements (I, II). Magnification X 100.

В результате проведенного анализа микрофотографий биологических образцов было установлено, что в органах животных контрольных групп наблюдалась равномерная, умеренная флуоресценция полей зрения. Встречались артефакты, характеризующиеся нечеткой формой, слабой интенсивностью свечения. В экспериментальной группе флуоресцирующие объекты сферической формы встречались в области печеночных триад, корковом слое почек и коре головного мозга, в области фолликул яичников, ацинусов легких и хаотично в тканях сердца.

Обсуждение. Многочисленные исследования демонстрируют, что МП не только накапливается в тканях млекопитающих, но и вызывает ряд биохимических и метаболических нарушений, включая энергетический дисбаланс, воспаление, окислительный стресс и нейротоксичность, что указывает на потенциальную опасность микропластика для здоровья [7]. Длительное воздействие частиц пластика влияет на кальцификацию сосудов, может вызывать отложение кальция на стенках сердца и восходящей аорты [8].

Известно, что распределение частиц МП зависит от их размера. Еще в 2016 году, опираясь на имеющуюся к тому моменту научную литературу, Европейское агентство по безопасности пищевых продуктов пришло к выводу, что очень

незначительная фракция частиц диаметром менее 150 мкм может пересекать барьер слизистой оболочки кишечника при пероральном поступлении вещества. Также ими было выдвинуто предположение, что только частицы диаметром менее 1,5 мкм могут транспортироваться в более глубокие ткани [9]. Ранее было установлено, что частицы размером менее 700 нм проходят через клеточную мембрану внутрь клеток через рецептор-опосредованный эндоцитоз [10], тогда как более крупные частицы поглощаются посредством фагоцитоза [11].

По аналогии с наночастицами, при изучении которых было показано, что частицы, попадающие не только в нано, но и в микрометровый диапазон (50–250 нм), обнаруживаются в печени, селезенке и крови, МП, вероятно, может быть распознан специфическими защитными системами организма и поглощен системой мононуклеарных фагоцитов [12, 13]. Это должно препятствовать его проникновению в другие ткани.

Наличие пластика в организме может усугублять уже имеющиеся и развивающиеся патологии, что также зависит от размера. Так, в работе Кага S. показано, что сферические микрочастицы пластика размером 21 нм накапливались в опухолевой ткани мышей в наибольшем количестве по сравнению с более крупными сферическими частицами (33 нм) или палочковидными (350-500 нм) или червеобразными (1-2 мкм) [14].

В систематическом обзоре, опубликованном Roslan с соавторами, сообщают о присутствии микропластика различных размеров более чем в половине систем органов человека [15]. Так частицы размером 20-100 μm были обнаружены в семенниках [16], от 1,6 до 20 μm в ткани легких [17], 5-25 μm в селезенке, 4-30 μm в печени [18], 20,34-307,24 μm в плаценте [19].

Важно отметить, что микрочастицы размером менее 100 нм способны проникать через биологические барьеры (например, плацентарный барьер) и могут представлять большую опасность по сравнению с более крупными фрагментами из-за их потенциальной способности к более активному взаимодействию с биологическими молекулами.

Выбранный способ введения – внутрисердечный – несмотря на то, что не является естественным путем поступления микропластика в организм, используется в экспериментальных работах для оценки распределения и наиболее точного контроля дозы микрочастиц [20]. Отмечается, что при пероральном введении около 10 % наночастиц размером 60 нм задерживаются в кишечнике животных [21], тогда как более крупные фрагменты (до 150 нм) вовсе не достигают

кровотока, меньше распределяются в тканях [22, 23]. В работе Carr и соавт. представлены данные, согласно которым менее 1 % изучаемых латексных частиц размером 2 мкм смогли пересечь барьер кишечного эпителия [24]. Внутрисердечный способ введения минимизирует вариативность, связанную с различиями в абсорбции через желудочно-кишечный тракт, а также позволяет избежать агрегации и задержки частиц в легких, что характерно для ингаляционного или перорального путей. Такой подход позволяет исключить влияние физиологических барьеров и максимально точно оценить способность микропластика проникать в ткани органов-мишеней в условиях контролируемой временной экспозиции.

Заключение. В нашем исследовании было продемонстрировано накопление частиц МП размером 100 нм в мозге, печени, почках, сердце, легких и яичниках крыс уже спустя 5 часов после внутрисердечной инъекции 1% суспензии МП в дистиллированной воде. Обнаружены микрочастицы пластика как отдельно друг от друга, так и объединенные в группы – конгломераты.

Список литературы:

References:

1. Shen M, Ye S, Zeng G, Zhang Y, Xing L, Tang W, Liu S. Can microplastics pose a threat to ocean carbon sequestration? *Mar Pollut Bull.* 2020;150:110712. doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110712.
2. Wright SL, Kelly FJ. Plastic and human health: a micro issue? *Environ Sci Technol.* 2017;51:6634–6647. doi: 10.1021/acs.est.7b00423.
3. Wu P, Lin S, Cao G, et al. Absorption, distribution, metabolism, excretion and toxicity of microplastics in the human body and health implications. *J Hazard Mater.* 2022;437:129361. doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.129361.
4. Prata JC. Microplastics and human health: Integrating pharmacokinetics. *Crit Rev Environ Sci Technol.* 2023;53(16):1489–1511. doi: 10.1080/10643389.2023.2195798.
5. Li Y, Chen L, Zhou N, et al. Microplastics in the human body: A comprehensive review of exposure, distribution, migration mechanisms, and toxicity. *Sci Total Environ.* 2024;174215. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.174215.
6. Liu S, Liu X, Guo J, et al. The association between microplastics and microbiota in placentas and meconium: the first evidence in humans. *Environ Sci Technol.* 2022;57(46):17774–17785. doi: 10.1021/acs.est.2c04706.
7. Deng Y, Zhang Y, Lemos B, et al. Tissue accumulation of microplastics in mice and biomarker responses suggest widespread health risks of exposure. *Sci Rep.* 2017;7:46687. doi: 10.1038/srep46687.
8. Yan J, Pan Y, He J, Pang X, Shao W, Wang C, et al. Toxic vascular effects of polystyrene microplastic exposure. *Sci Total Environ.* 2023;905:167215. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167215.
9. Wallace HM, Alexander J, Barregård L, Bignami M. Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. *EFSA J.* 2016;14:1–30. doi: 10.2903/j.efsa.2016.4501.

10. Goldstein IM, Kaplan HB, Edelson HS, Weissmann G. Ceruloplasmin: A scavenger of superoxide anion radicals. *J Biol Chem.* 1979;254:4040–4045. doi: 10.1016/S0021-9258(18)50692-X.
11. Aderem A, Underhill DM. Mechanisms of phagocytosis in macrophages. *Annu Rev Immunol.* 1999;17:593–623. doi: 10.1146/annurev.immunol.17.1.593.
12. Sukhanova A, Bozrova 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.
13. De Jong WH, Hagens WI, Krystek P, Burger MC, Sips A, Geersma RE. Particle size-dependent organ distribution of gold nanoparticles after intravenous administration. *Biomaterials.* 2008;29:1912–1919.
14. Kaga S, Truong NP, Esser L, Senyschyn D, Sanyal A, Sanyal R, et al. Influence of size and shape on the biodistribution of nanoparticles prepared by polymerization-induced self-assembly. *Biomacromolecules.* 2017;18:3963–3970. doi: 10.1021/acs.biomac.7b00995.
15. Roslan NS, et al. Detection of microplastics in human tissues and organs: A scoping review. *J Glob Health.* 2024;14:04179.
16. Zhao Q, Zhu L, Weng J, Jin Z, Cao Y, Jiang H, et al. Detection and characterization of microplastics in the human testis and semen. *Sci Total Environ.* 2023;877:162713. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162713.
17. Chen Q, Gao J, Yu H. An emerging role of microplastics in the etiology of lung ground glass nodules. *Environ Sci Eur.* 2022;34:25. doi: 10.1186/s12302-022-00605-3.
18. Horvatits T, Tamminga M, Liu B, Sebode M, Carambia A, Fischer L, et al. Microplastics detected in cirrhotic liver tissue. *EBioMedicine.* 2022;82:104147. doi: 10.1016/j.ebiom.2022.104147.
19. Zhu L, Zhu J, Zuo R, Xu Q, Qian Y, Lihui AN. Identification of microplastics in human placenta using laser direct infrared spectroscopy. *Sci Total Environ.* 2023;856:159060. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159060.
20. Kannan K., Vimalkumar K. A Review of Human Exposure to Microplastics and Insights Into Microplastics as Obesogens. *Front Endocrinol (Lausanne).* 2021; 12: 724989. <https://doi.org/10.3389/fendo.2021.724989>.
21. Hillery A.M., Jani P.U., Florence A.T. Comparative, quantitative study of lymphoid and non-lymphoid uptake of 60 nm polystyrene particles. *J Drug Target.* 1994; 2(2): 151–6. <https://doi.org/10.3109/10611869409015904>
22. Braakhuis H.M., Park M.V., Gosens I., De Jong W.H., Cassee F.R. Physicochemical characteristics of nanomaterials that affect pulmonary inflammation. *Part Fibre Toxicol.* 2014; 1: 18. <https://doi.org/10.1186/1743-8977-11-18>,
23. Powell J.J., Faria N., Thomas-McKay E., Pele L.C. Origin and fate of dietary nanoparticles and microparticles in the gastrointestinal tract. *J Autoimmun.* 2010; 34(3): J226–33. <https://doi.org/10.1016/j.jaut.2009.11.006>
24. Carr K.E., Smyth S.H., McCullough M.T., Morris J.F., Moyes S.M. Morphological aspects of interactions between microparticles and mammalian cells: intestinal uptake and onward movement. *Prog Histochem Cytochem.* 2012; 46(4): 185–252. <https://doi.org/10.1016/j.proghi.2011.11.001>.

Поступила/Received: 12.05.2025

Принята в печать/Accepted: 17.06.2025