

Читать
онлайнRead
onlineБугаева М.С.¹, Горохова Л.Г.^{1,2}, Ямщикова А.В.¹, Гостяева Е.П.¹

Современные представления о морфологических изменениях внутренних органов при вибрационном воздействии (обзор литературы)

¹ФГБНУ «Научно-исследовательский институт комплексных проблем гигиены и профессиональных заболеваний», 654041, Новокузнецк, Россия;

²Кузбасский гуманитарно-педагогический институт ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 654041, Новокузнецк, Россия

РЕЗЮМЕ

В структуре профессиональной заболеваемости ведущую позицию занимают патологии, связанные с влиянием физических факторов, особое место среди которых отводится вибрационным воздействиям. Социально-гигиеническое значение вибрационной болезни определяется её широким распространением во многих промышленных регионах России и тяжёлым последствиям, в числе которых потеря трудоспособности, развитие осложнений и инвалидности. Известно, что в основе функциональных нарушений на разных уровнях организма лежат морфологические изменения, поэтому важным представляется изучение материального субстрата вибрационной болезни. Основным проявлением хронического воздействия вибрации считается поражение нервной и мышечной систем, однако в последние годы опубликованы работы, посвящённые изучению влияния данного физического фактора на другие органы, однако исследования их морфологического состояния немногочисленны и показывают противоречивые результаты. Цель исследования — провести анализ современных исследований морфологических аспектов воздействия вибрации на внутренние органы, что позволит углубить понимание патогенеза вибрационной болезни в целях её эффективного лечения и профилактики. Поиск и отбор источников осуществлён с использованием баз данных: Scopus, MedLine, Web of Science, PubMed, Google Scholar, CyberLeninka и РИНЦ.

Заключение. В обзоре представлен анализ современных исследований морфологических аспектов влияния вибрации на внутренние органы для более детального понимания патогенеза вибрационной болезни, определения принципов её лечения и профилактики. Многие исследователи отмечают деструктивное воздействие вибрации на нервную систему экспериментальных животных в контактный и постконтактный периоды. Картина морфологических изменений в других органах и системах подтверждает концепцию вибрационной болезни как системного процесса, раскрывает основные механизмы поражения, которые характеризуются последовательным нарастанием отрицательных эффектов, начинающихся с сосудистых нарушений микроциркуляторного русла и завершающихся полиорганной патологией с необратимыми изменениями.

Ключевые слова: вибрационное воздействие; органоспецифичность; морфологические исследования; обзор

Для цитирования: Бугаева М.С., Горохова Л.Г., Ямщикова А.В., Гостяева Е.П. Современные представления о морфологических изменениях внутренних органов при вибрационном воздействии (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2025; 104(4): 415–421. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-4-415-421> <https://elibrary.ru/hvnspg>

Для корреспонденции: Бугаева Мария Сергеевна, e-mail: bugms14@mail.ru

Участие авторов: Бугаева М.С. — концепция исследования, сбор материала, написание текста; Горохова Л.Г. — сбор материала, написание текста; Ямщикова А.В. — редактирование текста; Гостяева Е.П. — сбор материала. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 06.03.2025 / Поступила после доработки: 30.03.2025 / Принята к печати: 08.04.2025 / Опубликовано: 30.04.2025

Maria S. Bugaeva¹, Larisa G. Gorokhova^{1,2}, Anastasia V. Yamshchikova¹, Ekaterina P. Gostyaeva¹ Contemporary views on morphological changes in internal organs under vibration exposure (literature review)

¹Research Institute for Complex Problems of Hygiene and Occupational Diseases, Novokuznetsk, 654041, Russian Federation;

²Kuzbass Humanitarian and Pedagogical Institute of the Kemerovo State University, Novokuznetsk, 654041, Russian Federation

ABSTRACT

In the structure of occupational morbidity, the leading position is occupied by diseases caused by the influence of physical factors, a special place is given to vibration effects. In Russia, vibration disease is highly prevalent, leads to loss of ability to work, development of complications, and disability. The pathophysiology and clinical manifestations of the disease are widely described. All functional disorders are based on morphological ones, in connection with which it is important to study the material substrate of vibration disease. Its main manifestation is considered to be damage to the nervous and muscular systems.

The purpose of the investigation is to analyze modern studies of the morphological aspects of the impact of vibration on internal organs, which will allow deepening our understanding of the pathogenesis of vibration disease for the purpose of its effective treatment and prevention.

The search and selection of sources was carried out using the following databases: Scopus, MedLine, Web of Science, PubMed, Google Scholar, CyberLeninka, and Russian Science Citation Index (RSCI).

Conclusion. The review presents an analysis of modern studies of the morphological aspects of the effects of vibration on internal organs, which allows a deeper understanding of the pathogenesis of the disease. Many researchers are shown to note the presence of a destructive effect of vibration on the nervous system in experimental animals during the contact and post-contact periods. The picture of morphological changes in other organs and systems allows confirming the concept of vibration disease as a systemic process, reveals the main mechanisms of damage, which are characterized by a consistent increase in adverse effects, starting with vascular disorders of the microvascular bed and ending with multiple organ pathology with irreversible changes.

Keywords: vibration exposure; organ specificity; morphological studies; review

For citation: Bugaeva M.S., Gorokhova L.G., Yamshchikova A.V., Gostyaeva E.P. Contemporary views on morphological changes in internal organs under vibration exposure (literature review). *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian Journal*. 2025; 104(4): 415–421. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-4-415-421> <https://elibrary.ru/hvnspg> (In Russ.)

For correspondence: Maria S. Bugaeva, e-mail: bugms14@mail.ru

Contribution: Bugaeva M.S. — study concept, collection of material, writing the text; Gorokhova L.G. — collection of material, writing the text; Yamshchikova A.V. — editing the text; Gostyaeva E.P. — collection of material. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement. The study had no sponsorship.

Received: March 3, 2025 / Revised: March 30, 2025 / Accepted: April 8, 2025 / Published: April 30, 2025

Изучение влияния различных физических факторов на организм человека является актуальным направлением, поскольку позволяет определять их роль в развитии специфических патологий. Для всех живых организмов, в том числе и человека, не существует физических факторов, априори полезных или вредных. Будучи жизненно необходимыми в определённых количествах и при определённых условиях, в иных обстоятельствах они могут быть опасными для здоровья. Известно, что в структуре профессиональной заболеваемости ведущую позицию (38,6%) стабильно занимают патологии, связанные с воздействием физических факторов [1], особое место среди которых отводится вибрационным воздействиям (локальные, общие), оказывающим негативное влияние на здоровье работающих в этих условиях. Во многих промышленных регионах России вибрационная болезнь (ВБ) занимает одно из ведущих мест по частоте и распространённости, имеет большой удельный вес в структуре потерь трудоспособности, развития осложнений, инвалидизации в молодом возрасте (90% — не старше 45 лет), что определяет её высокое социально-гигиеническое значение [2–4].

Опубликовано много работ, описывающих патофизиологию и клинические проявления ВБ [5–9]. Как показывают исследования, длительное вибрационное воздействие на организм человека является одним из ведущих факторов риска развития патологий нервной, сердечно-сосудистой систем, почек, органов желудочно-кишечного тракта и опорно-двигательного аппарата [10–13]. Известно, что в основе функциональных нарушений на разных уровнях организации (организменном, органном, тканевом, клеточном, субклеточном) лежат морфологические изменения. В связи с этим важным представляется изучение материального субстрата ВБ. Традиционно основным проявлением хронического воздействия вибрации на организм считается поражение нервной и мышечной систем, однако в последние годы опубликованы работы, посвящённые изучению механизма воздействия вибрации на другие органы и системы. На настоящий момент исследования их морфологического состояния немногочисленны и демонстрируют противоречивые результаты. Одна из причин различий в результатах и интерпретации экспериментальных данных — разные методические подходы к моделированию вибрационного воздействия (частота, длительность вибрации, видовые особенности лабораторных животных).

Цель настоящей работы — провести анализ современных исследований морфологических аспектов воздействия вибрации на внутренние органы для более глубокого понимания патогенеза вибрационной болезни, определения методов её эффективного лечения и профилактики. Поиск и отбор источников осуществлён с использованием баз данных: Scopus, MedLine, Web of Science, PubMed, Google Scholar, CyberLeninka и РИНЦ.

Установлено, что длительное воздействие вибрации на организм человека приводит к значительным патологическим изменениям, прежде всего в нервной системе и нервно-мышечном аппарате: нарушению проведения нервных импульсов вследствие повреждения миелиновых оболочек нервных волокон, дисфункции нервно-мышечных синапсов, изменению работы механорецепторов, развитию нейродегенеративных процессов. Изменяется также функциональное состояние различных отделов головного мозга за счёт сложнорефлекторного влияния вибрации на центральную нервную систему с нарушением её регулирующих влияний на сосудистый тонус не только на периферии, но и мозгового кровотока в виде неадекватности кровоснабжения центрально-теменной области и уменьшения интенсивности реакций кровотока на фоне снижения общего уровня мозгового кровотока*.

Так, в исследованиях Панкова В.А. показана динамика развивающихся под влиянием вибрации (уровень виброускорения 138 дБ на основной частоте 40 Гц, четыре часа в сутки на протяжении пяти дней в неделю) патоморфологических изменений в коре головного мозга белых крыс [14]. Экспериментально подтверждено, что краткосрочное (в течение 15 дней) воздействие приводит к увеличению числа гиперхромных нейронов и клеток астроглии, снижению общего числа нервных клеток, что трактуется авторами как развитие компенсаторно-приспособительных реакций. Через 30–60 дней эксперимента отмечается прогрессирующее увеличение числа гиперхромных нейронов и сохранение астроглиоза, образование вакуолей в нейропиле и дальнейшее снижение числа нормальных нейронов на фоне сохранения компенсаторных механизмов. Долгосрочное вибрационное воздействие (четыре месяца) приводит к развитию периваскулярного отёка и значительной потере нормальных нейронов из-за истощения клеток и их гибели [14].

В экспериментах на кроликах было изучено воздействие общей вибрации (частота 44 Гц, амплитуда 0,5 мм, 60 мин в сутки в течение 56 дней), которое вызывало разнонаправленные изменения в нейронах сенсомоторной коры головного мозга. На 7-й день эксперимента были отмечены следующие изменения послойного строения коры: повышение активности нейронов во II и III слоях, набухание нервных клеток в IV слое, сморщивание в V и VI. Авторы отмечали, что трёхнедельное воздействие приводило к рабочей гипертрофии нейронов во II и III слоях (увеличение площади и РНК), продолжение набухания клеток в IV с подключением к этому процессу клеток V слоя на фоне снижения РНК, в VI слое при этом отмечалось восстановление функциональной активности клеток. На 56-й день эксперимента наблюдалось «восстановление нейронов в IV и V слоях (рост РНК, уменьшение площади) и рабочая гипертрофия клеток остальных слоёв сенсомоторной коры» [15]. Согласно исследованиям Бухарина О.М. и Рудницкого С.В., «длительное воздействие вибрации сопровождалось перестройкой микроциркуляторного русла коры мозжечка в виде увеличения длины, уменьшения количества и диаметра капилляров». Это в свою очередь приводило к ухудшению кровоснабжения исследуемого органа, прямо пропорциональному срокам эксперимента. Более выраженные изменения морфометрических показателей капиллярного русла характерны для зернистого слоя коры, что связано «с уменьшением калибра интраорганных радиальных артерий при погружении в глубь коры мозжечка» [16].

Yan J.G. и соавт. [17] изучено влияние общей вибрации на головной мозг лабораторных крыс (частота 30 Гц, ускорение 0,5 G, четыре часа в день, пять дней в неделю, общая продолжительность эксперимента — две недели). Показано, что повреждение данного органа при воздействии вибрации является кумулятивным процессом, начинающимся с церебральной вазоконстрикции, сдавливания и лёгкого отделения эндотелиальных клеток, недостаточного кровоснабжения мозга и повторного реперфузионного повреждения его нейронов. У животных, подвергавшихся воздействию физического фактора в течение восьми недель, наблюдался хронический отёк мозга, увеличивалось количество сморщенных нейронов и атрофировались целые клетки, что значимо коррелировало с нарушением их функций. Вся стенка средней мозговой артерии была неравномерной толщины, и клетки её располагались нерегулярно; эндотелий и адвентития характеризовались выраженными дегенеративными изменениями. В капиллярах головного мозга отсутствовала базальная мембрана, стенка их теряла нормальное натяжение, развивался склероз сосудов [17].

Отдельные исследования посвящены изучению прогредиентного течения нарушений в нервной системе в постконтактном периоде. В экспериментах Н.Л. Якимовой и Е.А. Титова и соавт. лабораторных крыс подвергали вибрационному воздействию на вибростенде с частотой 40 Гц в течение 60 сут. Исследования морфологических структур мозга

* Воздействие вибрации (вибрационная болезнь). Клинические рекомендации (одобрены Минздравом России). М.; 2024. Доступно: https://cr.minzdrav.gov.ru/preview-cr/876_1

проводили после окончания воздействия физического фактора и в постконтактный период — на 30-е, 60-е и 120-е сутки. В коре головного мозга особой первой группы выявлено уменьшение количества нормальных нейронов на единицу площади и увеличение количества клеток астроглии. В постконтактном периоде авторы наблюдали снижение общего числа нервных клеток и астроцитов, что может указывать на необратимые изменения в исследуемой ткани [18, 19].

Синдром вибрации кисти и руки (HAVS) возникает в результате чрезмерного воздействия вибрации, локально передаваемой через руки. Является ли повреждение миелина и аксонов периферических нервов, характерное для HAVS, прямым результатом вибрации или вторичным по отношению к сосудистой недостаточности, остаётся неясным. Yap J.G. исследован клеточный ответ нервной ткани на воздействие локальной вибрации для определения механизма неврологических изменений. В частности, изучено влияние вибрации (частота 60 Гц с горизонтальным ускорением 4,74 g; горизонтальная скорость 6 см/с, скорость ускорения 49 м/с², горизонтальное смещение 3 мм) на двигательные нейроны и аксоплазматический транспорт в периферических нервах и мотонейронах камбаловидной мышцы экспериментальных крыс. Продemonстрировано нарушение ретроградного транспорта в седалищных нервах и мотонейронах животных после двух пятичасовых периодов воздействия вибрации, что приводило к ухудшению метаболизма нейронов и снижению их выживания. Через 10 дней эксперимента восстановления в течение 24–48 ч у большинства экспериментальных животных не наблюдалось [20].

На модели крысиного хвоста (линейные вертикальные колебания частотой 60 Гц; ускорение 5 g; 49 м/с²; среднеквадратичное значение) изучали восстановление скорости нервной проводимости и структурного повреждения миелинизированных аксонов. На 7-й и 14-й дни воздействия вибрации (4 ч/день) было отмечено снижение скорости проводимости, что коррелировало с увеличением процента разрушенных миелинизированных аксонов. В течение двух месяцев восстановления показатели возвращались к контрольному уровню после семидневной вибрации, но оставались сниженными после 14 дней воздействия. Результаты демонстрируют прямую ассоциацию между дегенеративными изменениями миелинизированных нервов и снижением скорости нервной проводимости [21].

Экспериментальные данные, свидетельствующие о морфологических нарушениях, подтверждены анализом состояния периферических нервов с помощью электронейромиографического обследования пациентов с вибрационной болезнью. По результатам обследования установлено, что воздействие производственной вибрации приводит к развитию патологических изменений, выражающихся в демиелинизации моторного и сенсорного компонентов большеберцового нерва, а также к нарушению скоростных характеристик проведения импульсов по нервам верхних конечностей [22].

При помощи световой и электронной микроскопии исследованы нервные стволы и кожные покровы лабораторных крыс на модели ударной вибрации хвоста. Показано, что сразу после вибрации хвосты были гипералгизированы и имели разрушенные миелинизированные аксоны, фрагментированные нервные окончания и дегрануляцию тучных клеток. Через четыре дня они становились гипоалгизированными, нервные окончания в коже терялись [23].

Другим важным органом-мишенью при вибрационном воздействии является сосудистая сеть. Для изучения характера повреждения сосудов многие авторы также применяли модель непрерывной вибрации хвоста крысы (в течение четырёх часов при 60 Гц, 49 м/с²), наблюдая в эксперименте постоянное уменьшение размера просвета сосудов и преходящую вакуолизацию их гладкомышечных клеток [24]. Длительная вибрация в течение девяти дней приводила к потере и истончению эндотелиальных клеток. Активированные на этом фоне тромбоциты начинали покрывать открытую субэндотелиальную ткань. Для клеток интимы и артериальных

гладкомышечных становятся характерны двойные ограниченные мембраной отёчные отростки, что указывает на повреждение, вызванное вазоконстрикцией [25]. В других экспериментах было показано, что вибрация на частотах 125 и 250 Гц в течение четырёх часов в день (49 м/с²) приводила к значительному окислительному повреждению эндотелиальных клеток уже через 24 ч, которое усиливалось к пятому дню воздействия и было особенно выражено при использовании частоты 250 Гц. В исследовании использовались иммуногистохимические методы для обнаружения нитротирозина — мощного биомаркера воспаления клеток и окислительного стресса [26]. У крыс, подвергавшихся воздействию вибрации продолжительностью 7 и 14 дней (модель локальной вибрации хвоста крысы), также были обнаружены вакуолизация и набухание сосудистых гладких мышц и эндотелиальных клеток [27].

Известно, что сердце является одним из наиболее чувствительных к вибрации органов. В условиях длительного её воздействия создаются патофизиологические условия для морфологических и метаболических изменений миокарда и, как следствие, его ремоделирования. Параллельно идущие процессы структурной, электрофизиологической и функциональной трансформации кардиомиоцитов и внеклеточного матрикса составляют основу патологического процесса при многих болезнях, поражающих сердечную мышцу [28].

Исследования группы авторов показали, что у кроликов, ежедневно подвергавшихся двухчасовому воздействию общей вибрации в течение 56 дней (частота 44 Гц), в сердечной мышце одновременно с гипертрофическими изменениями формировались дистрофические, которые распространялись от субэндокардиальных в интрамуральные отделы. С увеличением сроков воздействия прогрессировала атрофия кардиомиоцитов, накапливались очаги некроза и признаки разрушения стромальных элементов, усиливалась выраженность межклеточного отёка, полнокровия сосудов и очаговых кровоизлияний. К концу второго месяца эксперимента отмечали при воздействии общей вибрации наибольшую степень отёчности артериальных стенок, в них было обнаружено значительное количество клеток с гиперхромными ядрами. Выявлены признаки уменьшения числа функционирующих микрососудов: система пустотелых венул и капилляров, разрежение артериолярной и капиллярной сети, спазм артериол, что подтверждает формирование вибрационных ангиопатий [29–31]. Вибрационное воздействие на меньшей частоте (8 Гц) приводило к развитию в кардиомиоцитах субэндокардиального отдела стойкой гипертрофии и полнокровия, степень которого нарастала пропорционально числу сеансов. После окончания воздействия отмечалась стабилизация кровообращения и даже незначительное его снижение [29]. Целенаправленный анализ морфометрических показателей кардиомиоцитов зафиксировал увеличение диаметра и длины ядер, толщины клеток. Отмечено, что увеличение диаметра кардиомиоцитов сопровождалось синхронным увеличением размеров ядер, при этом процесс развивался быстрее по сравнению с удлинением клеток. Увеличение длины клеток происходит позднее, достигая значений, которые соответствуют уже увеличенным параметрам ядра и диаметра, что, по мнению авторов, указывает на компенсаторно-приспособительный характер изменений [28, 32].

Различными исследованиями показано влияние вибрации на формирование патологии желудочно-кишечного тракта, в частности печени как основного метаболического, барьерного и детоксицирующего органа. В исследованиях показано, что длительное воздействие низкочастотной вибрации (8 Гц) не вызывало значительных морфогистологических перестроек в печени кроликов, в то время как высокочастотная вибрация (44 Гц) приводила к формированию выраженных патологических изменений. В частности, по мере длительности эксперимента развивались разнонаправленные повреждения гепатоцитов: уплощение формы, набухание, вакуолизация отдельных клеток с усилением процесса по направлению к перипортальной зоне. Трёхнедельное

воздействие вибрации вызывало полное разрушение синусоидальной структуры, печёночных балок и образование участков некротического поражения. В цитоплазме большей части клеток отмечали зернистость и признаки вакуолизации; усиливалась форменная и размерная гетерогенность гепатоцитов. К концу второго месяца воздействия на фоне прогрессирования повреждений отмечаются признаки компенсаторных изменений в виде формирования большого количества двоядерных гепатоцитов, повышения зернистости цитоплазмы и базофильности окраски ядер. На отдельных участках восстанавливается балочное строение, появляются просветы синусоидов. Характерно полнокровие портальной вены и набухание артерий [33, 34].

В экспериментах Титова Е.А., Панкова В.А. белых крыс-самцов подвергали воздействию вибрации частотой 40 Гц в течение 60 дней (пять раз в неделю по четыре часа в день). Установлено, что в постконтактный период через 30; 60 и 120 дней после завершения воздействия в тканях печени развивалось полнокровие портальных трактов и центральных вен, в синусоидах возрастало количество клеток Купфера, что свидетельствовало об усилении макрофагальной активности в данном органе [19].

Вибрационная нагрузка в течение 28 дней (по 30 мин с интервалом 120 мин в дневное время при среднем уровне вибрации $61,6 \pm 16,6$ дБ В) вызывала у мягкотелых черепашек *P. sinensis* дегенерацию гепатоцитов, дезинтеграцию печёночных тяжей, вакуолизацию вокруг центральной вены. В некоторых областях также наблюдалась центрилобулярная конгестия [35].

Клещевой Е.П. и соавт. методом электронной микроскопии исследованы морфологические характеристики эндотелиоцитов синусоидных капилляров печени крыс, подвергавшихся ежедневной часовой вибрации частотой 32 Гц при ускорении 50 м/с^2 [36]. Показано, что вибрационные воздействия вызывают ультраструктурные изменения данных клеток. Через 30 дней после завершения эксперимента наблюдалось восстановление до исходных значений только отдельных морфометрических показателей. Например, «суммарная численная плотность рибосом в эндотелиоцитах в контрольной группе составила $34,3 \pm 2,38$, тогда как к концу восстановительного периода этот показатель снизился до $16,02 \pm 1,9$. При этом численная плотность свободных полисомальных рибосом уменьшилась на 70% по сравнению с контрольной группой, а плотность прикреплённых рибосом сократилась на 40,9%» [36].

Изучение морфологических изменений печени, вызванных воздействием общей вибрации в течение 10 и 30 сут (с частотой вибрации 44 Гц, продолжительностью 60 мин, один раз в день), показало увеличение у экспериментальных животных количества дегенерирующих гепатоцитов, появление лейкоцитарной инфильтрации и некроза в обеих опытных группах в постконтактном периоде (на 1-е, 7-е и 14-е сутки после прекращения вибрации). При этом выявлено, что в целом указанные патологические изменения были статистически значимо более выражены у животных, подвергавшихся воздействию вредного фактора в течение 30 дней [37].

Исследование гепатобиоптата у больных ВБ I степени, подвергавшихся воздействию производственной вибрации, показало формирование гепатоза. Данное состояние характеризуется гидропической и крупнокапельной жировой дистрофией гепатоцитов, нарушением структуры печёночных балок и слабовыраженной лимфоидной инфильтрацией. В случаях, когда наблюдались расширенные и полнокровные центральные отделы долек, стеатонекроз, внутридольковое воспаление (с присутствием нейтрофилов, лимфоцитов и гистиоцитов), а также фиброзная соединительная ткань вокруг клеток и венул, пациентам был поставлен диагноз «стеатогепатит» [38].

Патоморфологическое изучение биоптатов печени большой группы пациентов с вибрационной болезнью, возникшей в результате воздействия локальной и общей вибрации, показало полный или частичный коллапс синусоидов, а так-

же уменьшение объёма гепатоцитов и содержания в них гликогена. В клетках встречались гранулы желчного пигмента и липидные включения. Портальные тракты были умеренно расширены, имелись признаки фибропластических изменений и гиперплазии звёздчатых клеток [39]. Электронно-микроскопический анализ выявил парциальную или тотальную опустошённость цитоплазмы большинства гепатоцитов. В синусоидных капиллярах отмечена повышенная осmioфильность цитоплазмы эндотелия; в перисинусоидальных пространствах — участки повреждённых мембранных структур и коллагеновые фибриллы. В целом «паренхиматозная ткань печени при вибрационной гепатопатии характеризовалась атрофическими изменениями, выражающимися в уменьшении белоксинтезирующих структур» [39]. При клиническом исследовании у пациентов данной группы в 24% случаев выявлены нарушения белоксинтезирующей функции печени, у 51,7% отмечены изменения углеводного, белкового и минерального обмена [39].

Микроскопические исследования гастробиоптатов пациентов с вибрационной болезнью выявили многочисленные диффузные изменения в фундальном и пилорическом отделах желудка. Отмечены истончение слизистой оболочки, дистрофия и атрофия покровного эпителия, атрофия желёз, а также диффузный фиброз стромы, более выраженный в глубоких слоях. В большинстве случаев отмечалось нарушение дифференцировки эпителия по типу кишечной метаплазии [39]. Электронно-микроскопический анализ выявил значительные нарушения ультраструктурной организации, особенно при выраженном фиброзе, которое выражалось в значительном снижении секреторной активности клеток эпителия и уменьшении количества органелл мембранной природы в клетках. Существенные изменения отмечены в ультраструктурах капилляров: в большинстве сосудов присутствовали признаки истончения эндотелия и снижения функциональной активности клеток (осmioфильная цитоплазма, наличие пиноцитозных везикул). При воздействии общей и локальной вибрации «показатели структурной плотности эпителия, стромы и капилляров в глубоком слое слизистой оболочки имели меньшие значения по сравнению с поверхностным слоем» [39]. По мнению авторов, это свидетельствует о развитии атрофических изменений вследствие сосудистой дисфункции. Клинические исследования показали преобладание инертного типа желудочной секреции у 71% больных. Кислотопродукция и кислотная продуктивность были угнетены у 84% пациентов в фазе базальной секреции и у 87% — в фазе стимулированной секреции. Фиброгастродуоденоскопия позволила также выявить нарушения моторной функции желудка: недостаточность кардиального сфинктера (67% обследуемых), гипотонию желудка (77%) и атонию (11%) [39].

Длительное воздействие вибрации является одним из факторов риска возникновения патологии почек. Показано, что низкочастотная (8 Гц) пролонгированная вибрация приводит к формированию минимальных морфологических изменений в почках кроликов. Высокочастотная общая вибрация (44 Гц) продолжительностью от 7 до 56 сеансов обуславливает развитие гломерулопатии экссудативного интра- и экстракапиллярного типов. Эпителий извитых канальцев набухает с дистрофическими изменениями и явлениями распада апикального конца. Просвет канальцев уменьшен, содержит хлопья и нити белка. С увеличением продолжительности воздействия нарастают явления интерстициального отёка коркового слоя, формируются кровоизлияния, все признаки дегенеративных изменений приобретают генерализованный характер [33, 40]. Исследования также показали, что почечные клубочки в условиях вибрации частотой 44 Гц увеличиваются в размерах и деформируются, их клетки приобретают округлую форму с плотным хроматином, нефротелий утолщается. Уменьшается количество клеток эндотелиального типа и подоцитов, усиливается кровенаполнение клубочков, в некоторых из них наблюдается диapedез эритроцитов в просвет капсулы Шумлянського — Боумана.

По мере нарастания числа сеансов вибрационного воздействия клубочки становятся различными по форме и размерам [33].

К концу второго месяца воздействия общей вибрации выявлены значительные изменения почечных структур: большинство клубочков имело лапчатый вид. Просвет капсулы остаётся широким, нефротелий утолщённым, отчётливо проявляются подоциты и мезангиальные клетки [34].

Исследование, проведённое на белых крысах-самцах, подвергавшихся воздействию вибрации частотой 40 Гц (в течение 60 дней, пять раз в неделю, по четыре часа в день), показало статистически значимое снижение площади почечных телец на 30-й день постконтактного периода. Спустя 60 и 120 дней после окончания экспозиции вибрацией различий в количестве почечных телец в ткани белых крыс опытных и контрольных групп выявлено не было [19].

В других работах установлено, что вибрационная нагрузка в течение 28 дней (по 30 мин с интервалом в 2 ч в дневное время при среднем уровне вибрации $61,6 \pm 16,6$ дБ В) приводило к изменению у мягкотелых черепашек *P. sinensis* формы клубочков Шумлянско-го — Боумана и повреждению эпителии подоцитов. Внутренний и внешний слой клубочка были неразличимы, нефроэпителий имел выраженные дегенеративные изменения, почечные канальцы приобретали неправильную форму и рисунок [34].

Распутин П.Г. и соавт. показали влияние вибрационной нагрузки (частота вибрации 44 Гц, продолжительность 60 мин, один раз в день, в течение 10 и 30 сут) на развитие морфологических изменений почек крыс. Отмечено формирование белковой гидропической дистрофии в эпителии канальцев, полнокровие, существенное уменьшение размеров и количества почечных телец. Наиболее выраженные изменения наблюдали после 30-дневной вибрации с появлением клубочков лапчатой формы в постконтактном периоде [41].

Реакция пучковой зоны коры надпочечников на вибрационное воздействие характеризовалась очаговой гидропической дистрофией и разрывением клеток, пикнозом ядер. Более значительные изменения также зафиксированы в постконтактном периоде после 30-дневного воздействия,

при этом улучшения морфологической картины не наблюдалось до конца эксперимента [42]. Также в рамках данных исследований изучена реакция тимуса на вибрационное воздействие. Изменения характеризовались нарушением пропорций между корковой и мозговой зонами органа, исчезновением чётких границ между ними. Также у животных экспериментальных групп по сравнению с контрольной наблюдали значительное снижение количества Т-лимфоцитов, расширение сосудов, эритростаз и плазмостаз в мозговом веществе, увеличение числа телец Гассалья. Согласно данным Распутина П.Г., в поздние сроки наблюдения такие выраженные нарушения могли свидетельствовать о развитии иммунодефицитных состояний после стрессового вибрационного воздействия [43].

Заключение

Анализ результатов исследований показал, что длительное вибрационное воздействие на организм обуславливает формирование комплекса морфологических нарушений и функциональную несостоятельность систем организма, прежде всего нервной. Морфогистологический анализ изменений нервной ткани подтверждает деструктивный характер воздействия вибрации на нервную систему экспериментальных животных [5]. Картина морфологических изменений в других органах и системах позволяет подтвердить концепцию вибрационной болезни как системного процесса, раскрывает основные механизмы поражения, которые характеризуются последовательным нарастанием отрицательных эффектов, начинающихся с сосудистых нарушений микроциркуляторного русла и завершающихся полиорганной патологией с необратимыми изменениями. Это определяет необходимость более подробного изучения органоспецифических патологических изменений в динамике вибрационного воздействия на экспериментальных животных. В некоторых пределах станет возможным экстраполировать полученные результаты на организм человека, определить комплексный подход к лечению вибрационной патологии и методы её профилактики.

Литература

(п.п. 12, 13, 17, 20, 21, 23–27, 35 см. References)

- Мирютова Н.Ф., Зайцев А.А., Паначева Л.А., Заикина Е.А. Эффективность лечебного применения физических факторов при вибрационной болезни от воздействия локальной вибрации (обзор литературы). *Медицина труда и промышленная экология*. 2017; (3): 59–64. <https://elibrary.ru/ygbnxh>
- Чудинова О.А., Борзунова Ю.М., Самохвалова Г.Н., Федоров А.А., Венедиктов Д.Л., Будлянская С.В. Системный подход к организации профилактики и лечения вибрационной болезни. *Медицина труда и промышленная экология*. 2010; 50(2): 23–5. <https://elibrary.ru/lbfmgj>
- Измеров Н.Ф. Сохранение и укрепление здоровья работающих как основа социальной политики и модернизации экономики России. В кн.: *Связь заболевания с профессией с позиций доказательной медицины: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Казань; 2011: 21–4.
- Бабанов С.А., Бараева Р.А. Актуальность и перспективы оценки биомаркеров эндотелиальной дисфункции при вибрационной болезни и ее сочетании с артериальной гипертензией. *Управление качеством медицинской помощи*. 2017; (1–2): 48–52. <https://elibrary.ru/yjnzpj>
- Воробьева В.В., Левченкова О.С., Шабанов П.Д. Патфизиологические механизмы неврологических нарушений у экспериментальных животных, подвергнутых вибрационному воздействию. *Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии*. 2020; 18(3): 213–24. <https://elibrary.ru/anncco>
- Сааркоппель Л.М., Кирьяков В.А., Ошкродер О.А. Роль современных биомаркеров в диагностике вибрационной болезни. *Медицина труда и промышленная экология*. 2017; 57(2): 6–10. <https://elibrary.ru/ygbnmd>
- Смирнова Е.Л., Потеряева Е.Л., Никифорова Н.Г. Роль процессов перикисного окисления липидов и антиоксидантной защиты в формировании особенностей течения вибрационной болезни в различные сроки послеконтактного периода. *Справочник врача общей практики*. 2015; (1): 25–30. <https://elibrary.ru/tjdrpw>
- Горохова Л.Г., Жукова А.Г., Измайлов А.И., Михайлова Н.Н. Перспективы использования секуринети полкустарниковой (*Securinega suffruticosa* (Pall.) Rehd.) в профилактике производственно обусловленной полинейропатии (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2023; 102(4): 339–44. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-4-339-344> <https://elibrary.ru/ugafue>
- Жукова А.Г., Кизиченко Н.В., Горохова Л.Г., Казизка А.С. Экспериментальные модели вибрационной болезни (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2022; 101(7): 776–82. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-7-776-782> <https://elibrary.ru/ldecxi>
- Антошина Л.И., Сааркоппель Л.М., Павловская Н.А. Действие вибрации на биохимические показатели, характеризующие окислительный метаболизм, иммунитет, обмен мышечной и соединительной тканей (обзор литературы). *Медицина труда и промышленная экология*. 2009; 49(2): 32–7. <https://elibrary.ru/kmkuhp>
- Потеряева Е.Л., Смирнова Е.Л., Никифорова Н.Г. Прогнозирование формирования и течения вибрационной болезни на основе изучения геномнометаболических маркеров. *Медицина труда и промышленная экология*. 2015; 55(6): 19–22. <https://elibrary.ru/ubemit>
- Панков В.А., Катаманова Е.В., Кулешова М.В., Титов Е.А., Картапольцева Н.В., Якимова Н.Л. и др. Динамика морфофункционального состояния центральной нервной системы у белых крыс при вибрационном воздействии. *Медицина труда и промышленная экология*. 2014; 54(4): 37–43. <https://elibrary.ru/scevlv>
- Бухарин О.М., Шилов А.В., Рудницкий С.В. Динамика изменений под влиянием вибрации морфометрических показателей нейронов различных слоев сенсомоторной коры большого мозга. *Астраханский медицинский журнал*. 2013; 8(1): 46–8. <https://elibrary.ru/qcysnq>
- Бухарин О.М., Рудницкий С.В., Шилов А.В. Динамика изменений морфометрических показателей капиллярного русла различных слоев коры мозжечка при вибрационном воздействии. *Астраханский медицинский журнал*. 2013; 8(1): 43–6. <https://elibrary.ru/qcysnh>
- Якимова Н.Л., Панков В.А., Лизарев А.В., Рукавишников В.С., Кулешова М.В., Катаманова Е.В. и др. Нейрофизиологические и морфологические эффекты воздействия вибрации в динамике пост-

- контактного периода при экспериментальном моделировании. *Медицина труда и промышленная экология*. 2019; 59(5): 284–90. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-5-284-290> <https://elibrary.ru/wlxbbf>
19. Титов Е.А., Панков В.А., Лизарев А.В., Кулешова М.В. Альтерация ткани головного мозга, печени и почек белых крыс при воздействии вибрации в постконтактном периоде. *Гигиена и санитария*. 2019; 98(10): 1108–12. <https://elibrary.ru/agrnks>
 22. Русанова Д.В., Лахман О.Л. Состояние центральных и периферических проводящих структур у пациентов с вибрационной болезнью. *Гигиена и санитария*. 2019; 98(10): 1085–90. <https://elibrary.ru/unpqxo>
 28. Воробьева В.В., Левченкова О.С., Ленская К.В., Шабанов П.Д. Механизмы структурного ремоделирования миокарда на фоне воздействия вибрации. *Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии*. 2024; 22(1): 17–32. <https://doi.org/10.17816/RCF624185> <https://elibrary.ru/rozvqa>
 29. Воробьева В.В., Шабанов П.Д. Морфофункциональные изменения миокарда кролика при воздействии общей вибрации и после фармакологической защиты янтарной кислотой. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Медицина*. 2010; (3): 196–202. <https://elibrary.ru/mvzotx>
 30. Воробьева В.В., Шабанов П.Д. Вибрационная модель гипоксического типа клеточного метаболизма, оцененная на кардиомиоцитах кролика. *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины*. 2009; 147(6): 712–5. <https://elibrary.ru/muegxi>
 31. Воробьева В.В., Левченкова О.С., Шабанов П.Д. Блокада кальциевых каналов кардиомиоцитов кролика восстанавливает активность фермент-субстратных комплексов дыхательной цепи в модели вибрационно-опосредованной гипоксии. *Биомедицина*. 2022; 18(4): 63–73. <https://doi.org/10.33647/2074-5982-18-4-63-73> <https://elibrary.ru/tnvzak>
 32. Воробьева В.В., Левченкова О.С., Ленская К.В. Роль биоэнергетической гипоксии в морфологической трансформации миокарда при вибрационной болезни. *Психофармакология и биологическая наркология*. 2024; 15(1): 69–78. <https://doi.org/10.17816/phbn625963> <https://elibrary.ru/ahstsm>
 33. Воробьева В.В., Шабанов П.Д. Тканеспецифические особенности вибрационно-опосредованной гипоксии сердца, печени и почки кролика. *Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии*. 2016; 14(1): 46–62. <https://doi.org/10.17816/RCF14146-62> <https://elibrary.ru/vveogn>
 34. Воробьева В.В., Хоробрых В.Г., Шабанов П.Д. Влияние общей вибрации на функцию дыхательной цепи паренхиматозных органов кроликов в эксперименте. *Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии*. 2012; 10(4): 16–29. <https://doi.org/10.17816/RCF10416-29> <https://elibrary.ru/qzkkxr>
 36. Клещева Е.П. Морфология клетки при воздействии вибрации промышленной частоты. *Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения*. 2011; 6(1): 116–7. <https://elibrary.ru/sgqwnt>
 37. Кривонкин К.Ю., Распутин П.Г., Ширинзаде Ф.Н. Морфологические изменения печени при воздействии общей вибрации. В кн.: *Материалы 17-го Российского Национального Конгресса с международным участием «Профессия и здоровье»*. М.; 2023: 252–5. <https://doi.org/10.31089/978-5-6042929-1-4-2023-1-252-255> <https://elibrary.ru/lkxmbn>
 38. Зуева М.А., Шпагина Л.А., Герасименко О.Н., Зюбина Л.Ю., Михно И.П. Гемодинамические и микроциркуляторные механизмы формирования поражения печени при вибрационной болезни. *Медицина труда и промышленная экология*. 2010; 50(8): 14–9. <https://elibrary.ru/muhgvx>
 39. Непомнящих Д.Л., Постникова О.А., Боброва С.В., Айдагулова С.В. Вибрационная гепато- и гастропатия: клинко-морфологическое и стереологическое исследование. *Сибирский медицинский журнал (г. Томск)*. 2011; 26(4–1): 152–5. <https://elibrary.ru/ooaoad>
 40. Воробьева В.В., Шабанов П.Д. Влияние общей вибрации на функции дыхательной цепи митохондрий почки кроликов в эксперименте. *Медицина труда и промышленная экология*. 2020; 60(5): 344–8. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-5-344-348> <https://elibrary.ru/qjzcrf>
 41. Распутин П.Г., Железнов Л.М., Мамедова С.М., Мурзабек кызы А. Влияние общей вибрации на состояние почек в эксперименте. *Морфология*. 2020; 157(2–3): 177. <https://elibrary.ru/bgnukh>
 42. Распутин П.Г., Железнов Л.М., Окулова И.И., Мамедова С.М., Колосов А.Е. Экспериментальная оценка воздействия общей вибрации на кору надпочечников. *Морфология*. 2020; 157(2–3): 177. <https://elibrary.ru/zlkzbu>
 43. Распутин П.Г., Железнов Л.М., Федоровская Н.С., Сунцова Н.А., Колотов К.А. Оценка влияния общей вибрации на состояние тимуса в эксперименте. *Морфология*. 2019; 155(2): 239–40. <https://elibrary.ru/nhzrqq>
 1. Miryutova N.F., Zaitsev A.A., Panacheva L.A., Zaikina E.A. Efficiency of therapeutically applied physical factors for vibration disease caused by exposure to local vibration (review of literature). *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2017; (3): 59–64. <https://elibrary.ru/ygbnxh> (in Russian)
 2. Tchoudinova O.A., Borzunova Yu.M., Samokhvalova G.N., Fyodorov A.A., Venediktov D.L., Boudlianskaya S.V. Systemic approach to organization of prevention and treatment of vibration disease. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2010; 50(2): 23–5. <https://elibrary.ru/lbfmgj> (in Russian)
 3. Izmerov N.F. Preservation and strengthening of workers' health as the basis of social policy and modernization of the Russian economy. In: *The Association Between the Disease and the Profession, from the Standpoint of Evidence-Based Medicine. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation [Syaz' zabolevaniya s professiei s pozitsii dokazatel'noi meditsiny: Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem]*. Kazan'; 2011: 21–4. (in Russian)
 4. Babanov S.A., Baraeva R.A. Actuality and prospects of assessment of endothelial dysfunction biomarkers in vibration disease and its combination with arterial hypertension. *Upravlenie kachestvom meditsinskoi pomoshchi*. 2017; (1–2): 48–52. <https://elibrary.ru/ynjzpj> (in Russian)
 5. Vorobieva V.V., Levchenkova O.S., Shabanov P.D. Pathophysiological mechanisms of neurological disorders in experimental animals exposed to vibration. *Obzory po klinicheskoi farmakologii i lekarstvennoi terapii*. 2020; 18(3): 213–24. <https://elibrary.ru/annvco> (in Russian)
 6. Saarkoppel L.M., Kiryakov V.A., Oshkoderov O.A. Role of contemporary biomarkers in vibration disease diagnosis. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2017; 57(2): 6–10. <https://elibrary.ru/ygbnmd> (in Russian)
 7. Smirnova E.L., Poteryaeva E.L., Nikiforova N.G. Role of processes lipid peroxidation and antioxidant protection forming features of the current vibration disease in different date period post-exposure. *Spravochnik vracha obshchei praktiki*. 2015; (1): 25–30. <https://elibrary.ru/tjdpwb> (in Russian)
 8. Gorokhova L.G., Zhukova A.G., Izmailov A.I., Mikhailova N.N. Prospects of using *Securinega suffruticosa* (*Securinega suffruticosa* (Pall.) Rehd.) as a dietary supplement for the prevention of occupation-caused polyneuropathy (literary review). *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(4): 339–44. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-4-339-344> <https://elibrary.ru/ugafue> (in Russian)
 9. Zhukova A.G., Kizichenko N.V., Gorokhova L.G., Kazitskaya A.S. Experimental models of vibration disease (literature review). *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2022; 101(7): 776–82. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-7-776-782> <https://elibrary.ru/ldcxri> (in Russian)
 10. Antoshina L.I., Saarkoppel L.M., Pavlovskaya N.A. Influence of vibration on biochemical values characterizing oxidative metabolism, immunity, metabolism in muscular and connective tissues (review of literature). *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2009; 49(2): 32–7. <https://elibrary.ru/kmkuhp> (in Russian)
 11. Poteriaeva E.L., Smirnova E.L., Nikiforova N.G. Forecasting formation and course of vibration disease on basis of genetic-metabolic markers study. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2015; 55(6): 19–22. <https://elibrary.ru/ubemit> (in Russian)
 12. Li Y., Rabey K.N., Schmitt D., Norton J.N., Reynolds R.P. Characteristics of vibration that alter cardiovascular parameters in mice. *J. Am. Assoc. Lab. Anim. Sci.* 2015; 54(4): 372–7.
 13. Rieder F., Wiesinger H.P., Kösters A., Müller E., Seynnes O.R. Whole-body vibration training induces hypertrophy of the human patellar tendon. *Scand. J. Med. Sci. Sports*. 2016; 26(8): 902–10. <https://doi.org/10.1111/sms.12522>
 14. Pankov V.A., Katamanova E.V., Kuleshova M.V., Titov E.A., Kartapoltseva N.V., Yakimova N.L., et al. Dynamics of morphofunctional state of central nervous system in white rats exposed to vibration. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2014; 54(4): 37–43. <https://elibrary.ru/scevlm> (in Russian)
 15. Bukharin O.M., Shilov A.V., Rudnitsky S.V. The dynamics of changes under influence of vibration of morphometric parameters of neurons in various layers of sense-motor of the cerebrum cortex. *Astrakhanskii meditsinskii zhurnal*. 2013; 8(1): 46–8. <https://elibrary.ru/qcyenr> (in Russian)
 16. Bukharin O.M., Rudnitsky S.V., Shilov A.V. The dynamics of changes of morphometric parameters of capillary channel of various layers of cerebellum cortex in vibrating influence. *Astrakhanskii meditsinskii zhurnal*. 2013; 8(1): 43–6. <https://elibrary.ru/qcyenr> (in Russian)
 17. Yan J.G., Zhang L.L., Agresti M., Yan Y., LoGiudice J., Sanger J.R., et al. Cumulative brain injury from motor vehicle-induced whole-body vibration and prevention by human apolipoprotein A-I molecule mimetic (4F) peptide (an Apo A-I mimetic). *J. Stroke Cerebrovasc. Dis.* 2015; 24(12): 2759–73. <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2015.08.007>
 18. Yakimova N.L., Pankov V.A., Lizarev A.V., Rukavishnikov V.S., Kuleshova M.V., Katamanova E.V., et al. Neurophysiological and morphological effects in the post-exposure vibration period during experimental modeling. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2019; 59(5): 284–90. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-5-284-290> <https://elibrary.ru/wlxbbf> (in Russian)
 19. Titov E.A., Pankov V.A., Lizarev A.V., Kuleshova M.V. Alteration of brain tissue, liver, and kidney in the post-contact period in white rats exposed to vibration. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2019; 98(10): 1108–12. <https://elibrary.ru/agrnks> (in Russian)
 20. Yan J.G., Matloub H.S., Sanger J.R., Zhang L.L., Riley D.A. Vibration-induced disruption of retrograde axoplasmic transport in peripheral nerve. *Muscle Nerve*. 2005; 32(4): 521–6. <https://doi.org/10.1002/mus.20379>
 21. Loffredo M.A., Yan J.G., Kao D., Zhang L.L., Matloub H.S., Riley D.A. Persistent reduction of conduction velocity and myelinated axon damage in vibrated rat tail nerves. *Muscle Nerve*. 2009; 39(6): 770–5. <https://doi.org/10.1002/mus.21235>
 22. Rusanova D.V., Lakhman O.L. The state of the central and peripheral conductive structures in patients with vibration disease. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2019; 98(10): 1085–90. <https://elibrary.ru/unpqxo> (in Russian)
 23. Raju S.G., Rogness O., Persson M., Bain J., Riley D. Vibration from a riveting hammer causes severe nerve damage in the rat tail model. *Muscle Nerve*. 2011; 44(5): 795–804. <https://doi.org/10.1002/mus.22206>

References

Original article

24. Govindaraju S.R., Curry B.D., Bain J.L., Riley D.A. Comparison of continuous and intermittent vibration effects on rat-tail artery and nerve. *Muscle Nerve*. 2006; 34(2): 197–204. <https://doi.org/10.1002/mus.20578>
25. Curry B.D., Bain J.L., Yan J.G., Zhang L.L., Yamaguchi M., Matloub H.S., et al. Vibration injury damages arterial endothelial cells. *Muscle Nerve*. 2002; 25(4): 527–34. <https://doi.org/10.1002/mus.10058>
26. Goenka S., Peelukhana S.V., Kim J., Stringer K.F., Banerjee R.K. Endothelial cell injury under high frequency vibration in the rat-tail model. In: *Proceedings of the ASME 2011 Summer Bioengineering Conference. ASME 2011 Summer Bioengineering Conference. Parts A and B*. Farmington, Pennsylvania; 2011: 951–2. <https://doi.org/10.1115/SBC2011-53571>
27. Wei N., Yan R., Lang L., Wei Y., Li J., Yang H., et al. Local vibration induced vascular pathological structural changes and abnormal levels of vascular damage indicators. *Microvasc. Res*. 2021; 136: 104163. <https://doi.org/10.1016/j.mvr.2021.104163>
28. Vorobieva V.V., Levchenkova O.S., Lenskaya K.V., Shabanov P.D. Mechanisms of vibration-induced structural myocardial remodeling. *Obzory po klinicheskoi farmakologii i lekarstvennoi terapii*. 2024; 22(1): 17–32. <https://doi.org/10.17816/RCF624185> <https://elibrary.ru/rozvaq> (in Russian)
29. Vorobieva V.V., Shabanov P.D. Morphological and functional changes of rabbits myocardium under general vibration and after a pharmacological defense with succinate. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Meditsina*. 2010; (3): 196–202. <https://elibrary.ru/mvzotx> (in Russian)
30. Vorobieva V.V., Shabanov P.D. Vibration model for hypoxic type of cell metabolism evaluated on rabbit cardiomyocytes. *Byulleten' eksperimental'noi biologii i meditsiny*. 2009; 147(6): 768–71. <https://doi.org/10.1007/s10517-009-0610-3> <https://elibrary.ru/mwuahd>
31. Vorobieva V.V., Levchenkova O.S., Shabanov P.D. Blockade of rabbit cardiomyocyte calcium channels restores the activity of enzyme-substrate complexes of the respiratory chain in a model of vibration-mediated hypoxia. *Biomeditsina*. 2022; 18(4): 63–73. <https://doi.org/10.33647/2074-5982-18-4-63-73> <https://elibrary.ru/tnvzak> (in Russian)
32. Vorobieva V.V., Levchenkova O.S., Lenskaya K.V. Role of bioenergetic hypoxia in the morphological transformation of the myocardium during vibration disease. *Psikhofarmakologiya i biologicheskaya narkologiya*. 2024; 15(1): 69–78. <https://doi.org/10.17816/phbn625963> <https://elibrary.ru/ahtssm> (in Russian)
33. Vorobieva V.V., Shabanov P.D. Tissue specific peculiarities of vibration-induced hypoxia of the rabbit heart, liver and kidney. *Obzory po klinicheskoi farmakologii i lekarstvennoi terapii*. 2016; 14(1): 46–62. <https://doi.org/10.17816/RCF14146-62> <https://elibrary.ru/vveogn> (in Russian)
34. Vorobieva V.V., Khorobrykh V.G., Shabanov P.D. Effect of general vibration on functions of breath chain in the rabbit parenchymatic organs. *Obzory po klinicheskoi farmakologii i lekarstvennoi terapii*. 2012; 10(4): 16–29. <https://doi.org/10.17816/RCF10416-29> <https://elibrary.ru/qzksxr> (in Russian)
35. Hur J.W., Lee J.Y. Effects of chronic vibration stress on liver, kidney and testes of the soft-shelled turtle *Pelodiscus sinensis*. *J. Appl. Anim. Res*. 2010; 37(2): 241–5. <https://doi.org/10.1080/09712119.2010.9707133>
36. Kleshcheva E.P. Morphology of cells under the influence of industrial frequency vibration. *Zdorov'e – osnova chelovecheskogo potentsiala: problemy i puti ikh resheniya*. 2011; 6(1): 116–8. <https://elibrary.ru/sgqwnr> (in Russian)
37. Krivonkin K.Y., Rasputin P.G., Shirinzade F.N. Liver morphology changes under whole body vibration exposure. In: *The 17th «Occupation and Health» Russian National Congress with International Participation (OHRNC-2023) [Materialy 17-go Rossiyskogo Natsional'nogo Kongressa s mezhdunarodnym uchastiyem «Professiya i zdorov'ye»]*. Moscow; 2023: 252–5. <https://doi.org/10.31089/978-5-6042929-1-4-2023-1-252-255> <https://elibrary.ru/lkxmbn> (in Russian)
38. Zuyeva M.A., Shpagina L.A., Gerasimenko O.N., Ziubina L.Yu., Mikhno I.P. Hemodynamic and microcirculatory mechanisms underlying liver disorders in vibration diseases. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2010; 50(8): 14–9. <https://elibrary.ru/muhgvx> (in Russian)
39. Nepomnyashchikh D.L., Postnikova O.A., Bobrova S.V., Aidagulova S.V. Vibration hepatox and gastropathy: Clinical, morphological and stereological study. *Sibirskii meditsinskii zhurnal (g. Tomsk)*. 2011; 26(4–1): 152–5. <https://elibrary.ru/ooooad> (in Russian)
40. Vorob'yova V.V., Shabanov P.D. Influence of general vibration on the functions of the kidney mitochondrial respiratory chain of rabbits in the experiment. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2020; 60(5): 344–8. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-5-344-348> <https://elibrary.ru/jqzcrf> (in Russian)
41. Rasputin P.G., Zheleznov L.M., Mamedova S.M., Murzabek kizi A. The influence of whole body vibration on the condition of kidneys in experiment. *Morfologiya*. 2020; 157(2–3): 177. <https://elibrary.ru/bgnukh> (in Russian)
42. Rasputin P.G., Zheleznov L.M., Okulova I.I., Mamedova S.M., Kolosov A.E. Experimental evaluation of the influence of whole body vibration on the adrenal cortex. *Morfologiya*. 2020; 157(2–3): 177. <https://elibrary.ru/zlkzbu> (in Russian)
43. Rasputin P.G., Zheleznov L.M., Fedorovskaya N.S., Suntsova N.A., Kolotov K.A. Evaluation of the influence of whole body vibration on the state of thymus in the experiment. *Morfologiya*. 2019; 155(2): 239–40. <https://elibrary.ru/nhzrqg> (in Russian)

Сведения об авторах

Бугаева Мария Сергеевна, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаб. молекулярно-генетических и экспериментальных исследований, ФГБНУ «НИИ КПППЗ», 654041, Новокузнецк, Россия. E-mail: bugms14@mail.ru

Горохова Лариса Геннадьевна, канд. биол. наук, вед. науч. сотр. лаб. молекулярно-генетических и экспериментальных исследований, ФГБНУ «НИИ КПППЗ», 654041, Новокузнецк, Россия. E-mail: ponomarikova@mail.ru

Ямщикова Анастасия Валерьевна, канд. мед. наук, ст. науч. сотр. лаб. прикладной нейрофизиологии, ФГБНУ «НИИ КПППЗ», 654041, Новокузнецк, Россия. E-mail: anastyam@bk.ru

Гостяева Екатерина Павловна, аспирант, ФГБНУ «НИИ КПППЗ», 654041, Новокузнецк, Россия. E-mail: epkolova@gmail.com

Information about the authors

Maria S. Bugaeva, PhD (Biology), senior researcher of the molecular genetic and experimental study laboratory, Research Institute for Complex Problems of Hygiene and Occupational Diseases, Novokuznetsk, 654041, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3692-2616> E-mail: bugms14@mail.ru

Larisa G. Gorokhova, PhD (Biology), leading researcher of the molecular genetic and experimental study laboratory, Research Institute for Complex Problems of Hygiene and Occupational Diseases, Novokuznetsk, 654041, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0545-631X> E-mail: ponomarikova@mail.ru

Anastasia V. Yamshchikova, PhD (Medicine), senior researcher of the Laboratory of applied neurophysiology, Research Institute for Complex Problems of Hygiene and Occupational Diseases, Novokuznetsk, 654041, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-6609-8923> E-mail: anastyam@bk.ru

Ekaterina P. Gostyaeva, postgraduate student, Research Institute for Complex Problems of Hygiene and Occupational Diseases, Novokuznetsk, 654041, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0002-1809-0924> E-mail: epkolova@gmail.com