

Горохова Л.Г.^{1,2}, Гостяева Е.П.¹, Жукова А.Г.^{1,2}

Метаболические и морфологические нарушения гепатобилиарной системы в динамике вибрационного воздействия

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

Введение. Вибрационное воздействие на организм вызывает изменение нейрогуморальной регуляции, функциональных показателей нервной системы, приводит к развитию тканевой гипоксии и повреждению клеток. Опубликованы работы, посвященные изучению влияния вибрации на различные органы, однако исследования их биохимического статуса и морфологического состояния, особенно на ранних стадиях воздействия, немногочисленны. **Цель исследования** — изучить особенности изменения морфофункционального состояния гепатобилиарной системы у крыс в динамике интермиттирующего вибрационного воздействия.

Материалы и методы. Эксперименты выполнены на крысах-самцах линии Wistar ($n = 59$, масса тела 160–240 г). На опытную группу крыс воздействовали вибрацией на основной частоте 16 Гц, по виброускорению 120 дБ. Вибрационное воздействие проводили в интермиттирующем режиме. Изучение морфофункционального состояния гепатобилиарной системы крыс выполняли с помощью комплекса биохимических и гистологических методов исследования. Забор крови осуществляли из хвостовой вены через 3; 6 и 9 нед эксперимента. Стандартными методами с помощью диагностических наборов фирмы «Вектор-Бест» (Россия) определяли биохимические показатели сыворотки крови: активность аспартатаминотрансферазы, аланинаминотрансферазы, щелочной фосфатазы, лактатдегидрогеназы, креатинфосфокиназы, холинэстеразы и гамма-глутамилтрансферазы. Структурные изменения, развивающиеся в результате длительного вибрационного воздействия, оценивали по результатам морфологического исследования ткани печени крыс. Обработку полученных результатов проводили с использованием программы Statistica 10.0.

Результаты. В разные сроки исследования наблюдали рассогласованные достоверные изменения активности ферментов в сыворотке крови: повышенная активность АСТ на 6-й неделе выравнивается к контролю к окончанию эксперимента; активность АЛТ достоверно увеличена на 3-й неделе эксперимента, снижается до нормальных значений на 6-й неделе и вновь повышается к 9-й неделе. Установили достоверное снижение активности щелочной фосфатазы к концу 9-й недели воздействия, снижение активности лактатдегидрогеназы и креатинфосфокиназы к 3-й неделе, резкое повышение активности лактатдегидрогеназы и креатинфосфокиназы к 6-й неделе с плавным снижением к концу эксперимента. Значимые изменения активности к 6-й неделе выявлены у холинэстеразы и гамма-глутамилтрансферазы. Сравнение результатов гистологических изменений печени на 3-й, 6-й и 9-й неделях воздействия вибрации показывает прогрессирующие морфологические структурные изменения в тканях, свидетельствующие о нарастающем повреждении, нарушении микроциркуляции, воспалении и дистрофии клеток. На 3-й неделе изменения лишь начинают проявляться, а на 6-й и 9-й неделях они становятся более выраженными и достигают уровня, связанного с хроническими повреждениями тканей, что может привести к значительным и, вероятнее всего, необратимым структурным последствиям в дальнейшем.

Ограничения исследования. Опыты *in vivo* ограничивают их количество директивными документами по охране экспериментальных животных, направленными на сокращение протоколов исследований и минимизацию количества подопытных животных без снижения достоверности результатов.

Заключение. Полученные результаты позволяют выделить в динамике интермиттирующего вибрационного воздействия на гепатобилиарную систему три стадии: первая — на 1–3-й неделях эксперимента запускает в печени адаптивные механизмы в виде повышения функциональной активности клеток; вторая стадия декомпенсации — переходный период от физиологического ответа организма к патологическим нарушениям (6-я неделя эксперимента); третья стадия — истощение (9-я неделя). Воздействие вибрации приводит к раннему срыву компенсаторных механизмов печени и развитию дистрофических изменений паренхимы с формированием очагов воспаления.

Ключевые слова: интермиттирующее вибрационное воздействие; гепатобилиарная система; биохимический профиль; гистоморфологические исследования

Соблюдение этических стандартов. Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФГБНУ «Научно-исследовательский институт комплексных проблем гигиены и профессиональных заболеваний» (протокол заседания № 4 от 18.11.2021 г., § 2). Содержание, кормление и выведение животных из эксперимента проводили в соответствии с требованиями Европейской конвенции по защите позвоночных животных, используемых в экспериментальных или в иных научных целях (ETS № 123, European Convention for the Protection of Vertebrate Animals used for Experimental and other Scientific Purposes, Strasbourg, 18.03.1986).

Для цитирования: Горохова Л.Г., Гостяева Е.П., Жукова А.Г. Метаболические и морфологические нарушения гепатобилиарной системы в динамике вибрационного воздействия. *Гигиена и санитария*. 2026; 105(7): 743–749. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-7-743-749> <https://elibrary.ru/bjifrp>

Для корреспонденции: Горохова Лариса Геннадьевна, e-mail: ponomarikova@mail.ru

Вклад авторов: Горохова Л.Г. — концепция и дизайн исследования, проведение эксперимента, сбор материала и обработка данных, написание текста; Гостяева Е.П. — сбор материала и обработка данных; Жукова А.Г. — написание текста, редактирование, сбор материала и обработка данных. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

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

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 24.04.2026 / Поступила после доработки: 17.06.2026 / Принята к печати: 01.07.2026 / Опубликовано: 14.08.2026

Larisa G. Gorokhova^{1,2}, Ekaterina P. Gostyaeva¹, Anna G. Zhukova^{1,2}

Evaluation of metabolic and morphological disorders of the hepatobiliary system in the dynamics of vibration exposure

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

Introduction. Vibration exposure to the body altering both neurohumoral regulation and functional parameters of the nervous system, leads to the development of tissue hypoxia and damage to cells of various organs. Studies of the effect of this physical factor on other organs have been published, but there are few studies of their biochemical status and morphological state, especially at the early stages of exposure.

The aim of the study was to study the features of changes in the morpho-functional state of the hepatobiliary system in rats in the dynamics of intermittent vibration exposure.

Materials and methods. The experiments were performed on male Wistar rats ($n=59$) weighing 160–240 g. An experimental group of rats was exposed to vibration at a fundamental frequency of 16 Hz, with a vibration acceleration of 120 dB. Vibration exposure was carried out in an intermittent mode. The morpho-functional state of the hepatobiliary system in rats was studied using a complex of biochemical and histological research methods. Blood sampling was performed in rats from the tail vein after 3, 6 and 9 weeks of the experiment. The biochemical parameters of blood serum, including aspartate aminotransferase, alanine aminotransferase, alkaline phosphatase, lactate dehydrogenase, creatine phosphokinase, cholinesterase, and gamma-glutamyl transferase, were detected by standard methods using Vector-Best diagnostic kits. Structural changes due to prolonged vibration exposure were assessed according to the results of morphological investigation of rat liver tissue. The results were processed using the Statistica software 10.0.

Results. At different examination periods, there were discordant reliable changes in the enzyme activity in the blood serum: increased AST activity at week 6 was aligned with the control by the end of the experiment; ALT activity was reliably raised at week 3 of the experiment, decreased to normal values at week 6 and increased again by week 9. There was a reliable decrease in the activity of alkaline phosphatase by the end of the 9th week of exposure, a decrease in the activity of lactate dehydrogenase and creatine phosphokinase by week 3, a sharp increase by week 6 with a gradual decrease by the end of the experiment. Significant changes in activity by week 6 were detected in cholinesterase and gamma-glutamyl transferase. A comparison of the results of histological changes at the 3rd, 6th and 9th weeks of exposure to vibration on the liver shows progressive morphological and structural changes in tissues, indicating to increasing damage, microcirculation disorders, inflammation and cellular dystrophy. While the changes only begin to appear at week 3, at weeks 6 and 9 they become more pronounced and reach a level associated with chronic tissue damage, which can lead to significant and, most likely, irreversible structural consequences in the future.

Limitations. In vivo experiments limit their number by directive documents on the protection of experimental animals, aimed at shortening research protocols and minimizing the number of test animals without compromising the reliability of the results.

Conclusion. The obtained results allow distinguishing three stages in the dynamics of intermittent vibration exposure to the hepatobiliary system. These stages include the first, during weeks 1–3 of the experiment, triggers adaptive mechanisms in the liver, resulting in increased cellular functional activity; the second stage of decompensation, a transitional period from the body's physiological response to pathological disorders (week 6 of the experiment); and the third stage, exhaustion (week 9). Vibration exposure leads to an early breakdown of the liver's compensatory mechanisms and the development of degenerative changes in the parenchyma, with the formation of foci of inflammation.

Keywords: intermittent vibration exposure; hepatobiliary system; biochemical profile; histomorphological studies

Compliance with ethical standards. The study was approved by the local Ethics Committee of the Federal State Budgetary Scientific Institution “Research Institute for Complex Problems of Hygiene and Occupational Diseases” (Minutes of meeting No. 4, § 2, dated November 18, 2021). Animal care, feeding, and withdrawal from the experiment were carried out in accordance with the requirements of the European Convention for the Protection of Vertebrate Animals used for Experimental and other Scientific Purposes (ETS No. 123, Strasbourg, March 18, 1986).

For citation: Gorokhova L.G., Gostyaeva E.P., Zhukova A.G. Evaluation of metabolic and morphological disorders of the hepatobiliary system in the dynamics of vibration exposure. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2026; 105(7): 743–749. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2026-105-7-743-749> <https://elibrary.ru/bjifpd> (In Russ.)

For correspondence: Larisa G. Gorokhova, e-mail: ponomarikova@mail.ru

Contribution: Gorokhova L.G. — concept and design of the study, conducting the experiment, material collection and data processing, writing the text; Gostyaeva E.P. — material collection and data processing; Zhukova A.G. — writing the text, editing, material collection and data processing. 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.

Funding. The study had no sponsorship.

Received: April 24, 2026 / Revised: June 17, 2026 / Accepted: July 1, 2026 / Published: August 14, 2026

Введение

Многочисленными исследованиями установлено, что длительное вибрационное воздействие неблагоприятно влияет на здоровье человека и других теплокровных организмов [1–5]. Вибрационная нагрузка вызывает изменение нейрогуморальной регуляции, функциональных показателей нервной системы, приводит к развитию тканевой гипоксии и повреждению клеток различных органов [6, 7]. В последние годы опубликованы работы, посвященные изучению влияния вибрации на различные органы, однако исследования их биохимического статуса и морфологического состояния, особенно на ранних стадиях воздействия, немногочисленны и показывают противоречивые результаты [8–11].

Цель настоящего исследования — изучить особенности изменения морфофункционального состояния гепатобилиарной системы крыс в динамике интермиттирующего вибрационного воздействия.

Материалы и методы

Эксперименты выполнены на крысах-самцах линии Wistar ($n = 59$, масса тела 160–240 г), полученных из ЦКП «Виварий конвенциональных животных» ИЦиГ СО РАН. Исследование одобрено локальным этическим комитетом ФГБНУ «Научно-исследовательский институт комплексных проблем гигиены и профессиональных заболеваний» (протокол заседания № 4 от 18.11.2021 г., § 2). Животные

Биохимические показатели сыворотки крови крыс-самцов линии Wistar в динамике интермиттирующего вибрационного воздействия**Changes in biochemical parameters of blood serum in male Wistar rats during intermittent vibration exposure**

Исследуемый показатель Parameter under study	Группа Group	Сроки обследования Examination periods		
		3 нед weeks	6 нед weeks	9 нед weeks
Активность АСТ, ЕА/л AST activity, EA/L	Опыт Experiment	1.76 ± 0.045	2.09 ± 0.094**	1.48 ± 0.056
	Контроль Control	1.85 ± 0.061	1.62 ± 0.107	1.46 ± 0.118
Активность АЛТ, ЕА/л ALT activity, EA/L	Опыт Experiment	0.63 ± 0.03*	0.59 ± 0.043	0.94 ± 0.113*
	Контроль Control	0.53 ± 0.03	0.67 ± 0.042	0.62 ± 0.048
Активность ЛДГ, ЕА/л Lactate dehydrogenase activity, EA/L	Опыт Experiment	623.3 ± 41.23***	1005 ± 91.05***	506.3 ± 34.14**
	Контроль Control	960 ± 43.97	489 ± 54.59	866.6 ± 122.5
Активность КФК, ЕА/л Creatine phosphokinase activity, EA/L	Опыт Experiment	306.8 ± 24.68***	1108 ± 128.1**	555 ± 31.25
	Контроль Control	563.9 ± 43.28	595 ± 59.46	641 ± 69.07
Активность γ-ГТ, ЕА/л Gamma-glutamyl transferase activity, EA/L	Опыт Experiment	9.65 ± 0.77	3.9 ± 0.49*	5 ± 0.51**
	Контроль Control	9.7 ± 1.12	6 ± 0.65	7.7 ± 0.61
Активность холинэстеразы, ЕА/л Cholinesterase activity, EA/L	Опыт Experiment	201.1 ± 10.6	275.9 ± 17.32***	104.1 ± 7.82*
	Контроль Control	182.5 ± 10.97	182.5 ± 10.97	131.8 ± 5.48
Активность щелочной фосфатазы, ЕА/л Alkaline phosphatase activity, EA/L	Опыт Experiment	451.4 ± 19.3	502.8 ± 31.59	285.8 ± 21.63*
	Контроль Control	450.1 ± 28.2	554.2 ± 24.02	409.6 ± 61.15

Примечание. * — $p < 0,05$; ** — $p < 0,01$ (отличия от контроля достоверны).

Note: * — $p < 0.05$; ** — $p < 0.01$ (differences from control are reliable).

содержались и выводились из эксперимента в соответствии с требованиями Европейской конвенции по защите позвоночных животных, используемых в экспериментальных или в иных научных целях (ETS № 123, Страсбург, 18.03.1986), и Руководства по содержанию и использованию лабораторных животных (Guide for the Care and Use of Laboratory Animals, 1996).

Крысы были разделены на две группы — контрольную и опытную. Группы формировали методом случайных чисел с использованием массы тела в качестве ведущего признака. На опытную группу крыс воздействовали вибрацией на основной частоте 16 Гц, по виброускорению 120 дБ. Вибрационное воздействие проводили в интермиттирующем режиме, состоящем из чередования восьми 20-минутных периодов вибрации и восьми 10-минутных перерывов в течение четырёх часов в сутки пять раз в неделю с общей продолжительностью эксперимента девять недель [12]. Уровень вибрации измеряли с помощью анализатора шума и вибрации «Ассистент БВЕК.438150-005РЭ» (Москва). Выбранные уровни вибрации соответствовали реальному вибрационному воздействию в условиях производства. Группу контроля составили интактные животные, которые не подвергались вибрационному воздействию и содержались в стандартных условиях вивария со свободным доступом к воде и пище.

Изучение морфофункционального состояния гепатобилиарной системы у крыс осуществляли с помощью комплекса биохимических и гистологических методов исследования. Все экспериментальные исследования проводили с учётом воспроизводимости. Обязательным условием было использование крыс одного возраста и массы, содержание их в одинаковых условиях, соблюдение стандартности методики, что позволило нам сопоставить результаты, полученные у животных опытной и контрольной групп.

Биохимические исследования. Забор крови у крыс осуществляли из хвостовой вены через 3; 6 и 9 нед эксперимента. Перечень лабораторных показателей подобран с учётом этиопатогенетической связи развития негативных эффектов с воздействием вибрации. Стандартными методами с помощью диагностических наборов фирмы «Вектор-Бест» (Россия) определяли биохимические показатели сыворотки крови: активность аспаратаминотрансферазы (АСТ),

аланинаминотрансферазы (АЛТ), щелочной фосфатазы, лактатдегидрогеназы (ЛДГ), креатинфосфокиназы (КФК), холинэстеразы и гамма-глутамилтрансферазы (γ-ГТ).

Гистологические исследования. Структурные изменения, развивающиеся в результате длительного вибрационного воздействия, оценивали по результатам морфологического исследования ткани печени крыс. Кусочки печени фиксировали 12%-м нейтральным формалином. После фиксации кусочки гистологического материала тщательно промывали, подвергали химической обработке с применением аппарата для гистологической проводки. Из полученного материала на санном микротоме делали срезы толщиной 3–7 мкм, которые окрашивали гематоксилином и эозином [13, 14]. Микроскопирование и динамическую микрофотосъёмку гистологических препаратов проводили с помощью микроскопа Olympus CX31 RBSF (Германия) при увеличении окуляра 10×18 и объектива $40 \times$ с водной и масляной иммерсией с использованием цифровой камеры Levenhuk C800.

Статистический анализ результатов эксперимента выполняли с помощью программы Statistica Base for Windows v.10 Russian. Для всех экспериментальных групп проверяли гипотезу на нормальность распределения по критерию Шапиро — Уилка. Для сравнения несвязанных групп при нормальном распределении признаков применяли t -критерий Стьюдента. Различия считали статистически значимыми при вероятности ошибки $p < 0,05$.

Результаты

Печень принадлежит ведущая роль в поддержании гомеостаза организма, особенно в условиях хронического воздействия факторов разной природы. Барьерные функции она осуществляет посредством механизмов, безусловно относящихся к компенсаторно-приспособительным, изучение которых актуально не только с позиции углубления теоретических представлений, но и практического применения в профилактике и коррекции печёночных нарушений.

Аланин-трансаминаза (АЛТ) и аспартат-трансаминаза (АСТ) — ферменты, катализирующие реакции трансаминирования, в клинической практике используются в качестве индикаторов патологических изменений печени. При

интермиттирующем вибрационном воздействии на крыс в течение 9 нед в разные сроки обследования наблюдали рассогласованные достоверные изменения активности АЛТ и АСТ в сыворотке крови: на 30% повышенная активность АСТ к 6-й неделе выравнивалась с контролем к окончанию эксперимента. В то же время активность АЛТ, достоверно повышенная на 20% уже на 3-й неделе эксперимента, снижалась до нормальных значений на 6-й неделе и вновь росла на 50% к 9-й неделе (см. таблицу).

При субхроническом интермиттирующем вибрационном воздействии у крыс опытной группы было выявлено достоверное снижение активности щелочной фосфатазы в сыворотке на 30% к концу 9-й недели воздействия. Изменения в биохимическом статусе сыворотки крови показали достоверно значимые однотипные изменения активности лактатдегидрогеназы и креатинфосфокиназы: снижение активности к 3-й неделе, резкое повышение к 6-й неделе с плавным снижением к концу эксперимента. Значимые изменения активности к 6-й неделе также были отмечены у холинэстеразы и гамма-глутамилтрансферазы.

Результаты гистологических исследований показали, что при вибрационном воздействии в течение *трёх недель* печень сохраняла балочное и дольковое строение (см. рисунок на вклейке). Общая архитектура органа не имела нарушений, гепатоциты были полигональной формы, приблизительно одинакового размера, с чёткими границами, однако в некоторых участках их контуры становились менее чёткими, что свидетельствовало о начальной стадии дистрофии. Ядра клеток были расположены центрально, характеризовались как нормохромные с равномерной структурой хроматина, что указывало на сохранение функциональной активности клеток. Синусоиды были умеренно расширены, в просветах наблюдались единичные клетки Купфера, количество которых незначительно превышало физиологическую норму. Эти клетки демонстрировали морфологические признаки минимальной активации. Портальные тракты сохраняли узкую структуру, в них выявлялись мелкие сосуды, внутрипечёночные желчевыводящие пути с сохранённым эпителием. Признаки воспаления или фиброзных изменений в портальных трактах отсутствовали. Сосуды триады имели несколько утолщённые стенки, начальные признаки гипертрофии или пролиферативных изменений. Центральные вены были неравномерно полнокровными, несколько расширенными, что могло отражать влияние вибрации на микроциркуляцию. В междольковых областях сосуды и синусоиды сохраняли структурную целостность. Капсула печени — тонкая, без признаков фиброза или воспалительной инфильтрации. Наблюдалась умеренная гипертрофия гепатоцитов. Некоторые клетки печени увеличивались в размерах, что может быть реакцией на продолжительное воздействие механического стресса и необходимость улучшения синтетической функции в ответ на повреждения.

После *шести недель* воздействия вибрации гепатоциты продолжали увеличиваться в размерах, гипертрофия становилась более выраженной, что свидетельствовало о продолжающейся реакции клеток на длительный стресс. Гиперплазия (увеличение числа клеток) становилась более заметной в местах с наиболее выраженными дистрофическими процессами. В гепатоцитах наблюдались более явные признаки дистрофии. В цитоплазме можно было выявить выраженную вакуолизацию, что указывало на более глубокие нарушения в метаболизме клетки. В некоторых клетках проявлялись признаки жировой дистрофии, особенно в области периферически-центральных и портальных зон. Ядра гепатоцитов сохраняли гиперхромность, особенно в участках с наиболее выраженными дистрофическими процессами. В отдельных участках печени можно было увидеть признаки апоптоза, такие как фрагментация ядер и образование телец. Это свидетельствовало о клеточной гибели в ответ на длительное воздействие вибрации и развитие некротических процессов в тканях.

В сосудистой сети печени на 6-й неделе изменения также становились более выраженными. В некоторых участках,

особенно в портальных трактах, наблюдалось заметное расширение сосудов. Это связано с нарушением микроциркуляции и увеличением проницаемости сосудов. Повышенная проницаемость сосудов могла способствовать отёку ткани и увеличению межклеточного пространства. На 6-й неделе продолжало ухудшаться состояние межклеточного пространства в печени, отёк был более выраженным, чем на 3-й неделе, и являлся следствием повышения проницаемости сосудов и увеличения количества жидкости в тканях.

В некоторых участках печени можно было наблюдать начало фиброзных изменений, что свидетельствовало о начале процесса замещения нормальной печёночной ткани соединительной. На 6-й неделе воздействия вибрации в некоторых областях печени можно было увидеть увеличенное количество воспалительных клеток, в том числе лимфоцитов, макрофагов и плазматических клеток. Эти признаки свидетельствовали о реакции печени на длительное воздействие стресса и повреждения, приводящие к начальной фазе воспаления.

Отмечены изменения в желчевыводящих путях: в некоторых местах печени можно было наблюдать небольшие расширения внутрипечёночных желчевыводящих путей вследствие нарушения нормального оттока желчи и застойных процессов. Эти нарушения могли произойти из-за повышения внутрипечёночного давления, вызванного нарушениями в микроциркуляции.

На *девятой неделе* наблюдали более выраженную гипертрофию гепатоцитов и признаки гиперхромии в их ядрах. Гепатоциты сохраняли полигональную форму, но появлялись более выраженные признаки дегенерации — вакуолизация и потеря чёткости клеточной структуры. В некоторых участках печени присутствовали признаки жировой и белковой дистрофии гепатоцитов. В сосудистом русле печени прогрессировали изменения, характерные для гипертрофии стенок венул и артериол. Утолщение стенок сосудов становилось более выраженным. В области портальных трактов появлялась лимфоплазматическая инфильтрация, что может указывать на развитие хронического воспаления, обусловленного длительным воздействием вибрации.

Обсуждение

Известно, что воздействие вредных факторов производственной среды (вибрация, пыль, шум, тяжесть трудового процесса, охлаждающий микроклимат) является условием развития профессиональных патологий. В условиях хронического воздействия повреждающих факторов печень занимает ключевые позиции в поддержании гомеостаза организма. Барьерные функции она выполняет посредством механизмов, безусловно относящихся к компенсаторно-приспособительным, изучение которых актуально не только с позиции углубления теоретических представлений, но и практического применения в профилактике и коррекции печёночных нарушений [15, 16]. Многочисленные исследования показывают, что хроническое воздействие разнообразных производственных факторов приводит к развитию однотипных биохимических и морфологических изменений в печени и её сосудах — от преобладания начальных компенсаторно-приспособительных до выраженных дегенеративных [17, 18].

Аланин-трансаминаза и аспартат-трансаминаза, ферменты, катализирующие реакции трансаминирования, в клинической практике используются как индикаторы патологических изменений печени. Активность АЛТ и АСТ отражает преимущественно проницаемость мембран гепатоцитов, а не функциональное состояние органа [19, 20]. При интермиттирующем вибрационном воздействии на крыс в течение 9 нед в разные сроки обследования наблюдались рассогласованные достоверные изменения активности АЛТ и АСТ в сыворотке крови: повышенная активность АСТ к 6-й неделе выравнивалась с контролем к окончанию эксперимента, в то время как активность АЛТ,

достоверно увеличенная уже на 3-й неделе эксперимента, снижалась до нормальных значений на 6-й неделе и вновь повышалась к 9-й неделе. Важно, что именно уровень АЛТ достоверно увеличивался, поскольку его активность является высокоспецифичным показателем для печени в отличие от АСТ и свидетельствует о начале необратимых мембранных нарушений гепатоцитов.

Одним из распространённых тестов, позволяющих выявить холестатическое действие веществ, является определение активности щелочной фосфатазы в плазме крови [21]. Однако этот тест не является специфичным индикатором токсического поражения печени, поскольку щелочная фосфатаза имеет мембранную локализацию, является полиорганным неспецифическим ферментом с внеклеточной активностью и отражает не только реакцию поражённого органа, но и всего организма. Снижение активности щелочной фосфатазы при вибрационном воздействии, выявленное к 9-й неделе эксперимента, более свидетельствовало об истощении функционально-метаболического резерва и развитии дезадаптации организма на клеточном уровне, нежели характеризовало состояние гепатобилиарной системы.

Активность лактатдегидрогеназы в крови относится к неспецифическим биохимическим показателям, отражающим повреждение тканей организма, поскольку ЛДГ является внутриклеточным ферментом, который локализуется в цитоплазме клеток и катализирует процессы превращения лактата (молочной кислоты) в пируват [22]. В норме содержание ЛДГ в крови незначительно, но при разрушении клеток, повышении проницаемости их мембран или повреждении тканей концентрация фермента резко возрастает [23]. В нашем исследовании выявлены достоверно значимые волнообразные изменения активности лактатдегидрогеназы: пониженные значения на 3-й неделе с резким повышением к 6-й неделе и плавным снижением к концу эксперимента. О нарушении функционального состояния ретикулоэндотелия печени свидетельствовало снижение активности γ -ГТ и щелочной фосфатазы в сыворотке крови [24]. В некоторых исследованиях отмечено, что низкие уровни γ -ГТ связаны с тяжестью поражения печени и неблагоприятным исходом, например, при атрезии желчевыводящих путей [25].

Холинэстераза — фермент, который преимущественно синтезируется в печени. Обычно при патологиях печени наблюдается снижение её активности, связанное с нарушением белково-синтетической функции гепатоцитов [26]. Повышение активности холинэстеразы к 6-й неделе эксперимента свидетельствовало о сохранной или даже усиленной синтетической функции, часто наблюдаемой при ожирении печени, а снижение к 9-й неделе указывало на нарушение функциональной способности гепатоцитов.

Результаты биохимических исследований подтверждались патоморфологическими изменениями в печени, развившимися у крыс в динамике интермиттирующего вибрационного воздействия. Через три недели воздействия вибрации на печень были выявлены начальные изменения — умеренные дистрофические процессы и некоторые адаптивные реакции. Они затрагивали как клетки печени (гепатоциты), так и сосудистую систему. В отдельных гепатоцитах можно было обнаружить слабовыраженную вакуолизацию цитоплазмы, что может указывать на начальную стадию белковой и жировой дистрофии. Ядра гепатоцитов оставались в основном нормохромными, однако в некоторых клетках отмечалась гиперхромия как признак увели-

ченной активности клеток в ответ на воздействие вибрации. На 3-й неделе воздействия вибрации в печени не отмечали признаков фиброза или хронического воспаления. В ткани отсутствовали значительные инфильтраты, а пролиферация фибробластов и образование соединительной ткани оставались минимальными. В некоторых участках печени могли встречаться единичные воспалительные клетки (лимфоциты), но в целом воспаление не было выражено. Морфологические изменения не были значительными, что позволяет предположить компенсаторный характер реакций печени на воздействие вибрации. Эти данные свидетельствуют о сохранении структурной и функциональной целостности печени без выраженных патологических изменений в условиях вибрационного воздействия средней интенсивности в течение трех недель.

Через шесть недель воздействия вибрации на печень в тканях продолжались дистрофические и сосудистые изменения, более выраженные, чем на 3-й неделе. Признаки адаптации организма к вибрационному стрессу усиливались, в печени начинали развиваться сложные реакции, связанные с нарушением функции и структурной целостности ткани.

На 9-й неделе наблюдалась более выраженная гипертрофия гепатоцитов, появлялись признаки дегенерации — вакуолизация и потеря чёткости клеточной структуры. В некоторых участках печени отмечались признаки жировой и белковой дистрофии гепатоцитов. Это может указывать на нарушение обмена веществ в печени, вызванное длительным воздействием вибрации. В области портальных трактов появлялась лимфоплазмоцитарная инфильтрация как возможный признак хронического воспаления, обусловленного длительным воздействием вибрации.

Сравнение результатов гистологических изменений на 3-й, 6-й и 9-й неделях воздействия вибрации на печень показало прогрессирующие морфологические структурные изменения в тканях, свидетельствующие о нарастающем повреждении, нарушении микроциркуляции, воспалении и дистрофии клеток. На 3-й неделе изменения начинали проявляться, на 6-й и 9-й неделях они становились более выраженными и достигали уровня, соответствующего хроническому повреждению тканей, которое может привести к значительным и, вероятнее всего, необратимым структурным нарушениям в дальнейшем.

Ограничения исследования. Опыты *in vivo* ограничивают их количество директивными документами по охране экспериментальных животных, направленными на сокращение протоколов исследований и минимизацию количества подопытных животных без снижения достоверности результатов.

Заключение

Полученные результаты позволяют выделить в динамике интермиттирующего вибрационного воздействия на гепатобилиарную систему три стадии: первая — к 3-й неделе эксперимента в печени запускаются адаптивные механизмы в виде повышения функциональной активности клеток; вторая стадия — декомпенсация, переходный период от физиологического ответа организма к патологическим нарушениям (6-я неделя эксперимента); третья стадия — истощение (9-я неделя). Таким образом, воздействие вибрации приводит к раннему срыву компенсаторных механизмов печени и развитию дистрофических изменений паренхимы с формированием очагов воспаления.

Литература

(п.п. 3, 15–18, 21, 25, 26 см. References)

1. Непомнящих Д.Л., Постникова О.А., Боброва С.В., Айдагулова С.В. Вибрационная гепато- и гастропатия: клинко-морфологическое и стереологическое исследование. *Сибирский медицинский журнал*. 2011; 26(4–1): 152–5. <https://elibrary.ru/ooaoad>
2. Непомнящих Г.И., Непомнящих Д.Л. *Вибрационные органопатии: Морфогенез и патоморфология*. М.; 2014. <https://elibrary.ru/tvcnsv>
4. 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>
5. Зуева М.А., Шпагина Л.А., Герасименко О.Н., Зюбина Л.Ю., Михно И.П. Гемодинамические и микроциркуляторные механизмы формирования

- ния поражения печени при вибрационной болезни. *Медицина труда и промышленная экология*. 2010; 50(8): 14–9. <https://elibrary.ru/muhgvx>
6. Горохова Л.Г., Жукова А.Г., Измайлов А.И., Михайлова Н.Н. Перспективы использования секуринегии полукустарниковой (*Securinea 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>
 7. Жукова А.Г., Кизиченко Н.В., Горохова Л.Г., Казичская 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/ldcxri>
 8. 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): 415–21. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-4-415-421> <https://elibrary.ru/hvnspg>
 9. 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>
 10. Сааркоппель Л.М., Кирьяков В.А., Ошкодеров О.А. Роль современных биомаркеров в диагностике вибрационной болезни. *Медицина труда и промышленная экология*. 2017; 57(2): 6–10. <https://elibrary.ru/ygbnmd>
 11. 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 постконтактного 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>
 12. Жукова А.Г., Горохова Л.Г., Гостяева Е.П., Кизиченко Н.В., Бугаева М.С., Бондарев О.И. Способ моделирования вибрационной болезни на лабораторных животных. Патент РФ № 2859822; 2026.
 13. Коржевский Д.Э. *Краткое изложение основ гистологической техники для врачей и лаборантов-гистологов*. СПб.: Кроф; 2005. <https://elibrary.ru/rwxfhf>
 14. Ракитский В.Н., Николаева Н.И. *Морфофункциональные критерии действия на организм факторов окружающей среды*. М.: Медицина; 2001. <https://elibrary.ru/sndkgt>
 15. Литвинова О.С., Рослый И.М. Патогенетические механизмы и диагностическое значение биохимических показателей у больных вирусными гепатитами тяжелого течения. *Инфекционные болезни*. 2006; 4(1): 11–4. <https://elibrary.ru/iaqbbx>
 16. Галимова Р.Р., Валеева Э.Т., Тимашева Г.В., Бакиров А.Б. Оценка биохимического статуса у работников производства этилбензола, стирола. *Здоровье населения и среда обитания – ЗНУСО*. 2020; 28(6): 40–3. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2020-327-6-40-43> <https://elibrary.ru/gqycyr>
 17. Фокина Е.Г. Биохимический паспорт – лабораторный инструмент оценки здоровья человека в клинических исследованиях. *Фармация*. 2015; (5): 36–40. <https://elibrary.ru/uaxuqf>
 18. Долгополова Е.В., Соцкая Я.А. Показатель активности лактатдегидрогеназы и ее изоферментный состав у больных внегоспитальной пневмонией на фоне хронической патологии гепатобилиарной системы. *Университетская клиника*. 2023; (3): 44–8. <https://elibrary.ru/odncsg>
 19. Землянова М.А., Кольдубекова Ю.В. Оценка биохимических и гематологических показателей при воздействии шума на работников производства фторполимеров. *Медицина труда и экология человека*. 2018; (2): 16–21. <https://elibrary.ru/xqyijf>

References

1. Nepomnyashchikh D.L., Postnikova O.A., Bobrova S.V., Aidagulova S.V. Vibration hepatox and gastropathy: clinical, morphological and stereological study. *Sibirskii meditsinskii zhurnal*. 2011; 26(4–1): 152–5. <https://elibrary.ru/ooaoad> (in Russian)
2. Nepomnyashchikh G.I., Nepomnyashchikh D.L. *Vibration-Associated Organopathies: Morphogenesis and Pathomorphology [Vibratsionnye organopatii: Morfogenez i patomorfologiya]*. Moscow; 2014. <https://elibrary.ru/tvcnsv> (in Russian)
3. Dong R.G., Wu J.Z., Xu X.S., Welcome D.E., Krajnak K. A review of hand-arm vibration studies conducted by US NIOSH since 2000. *Vibration*. 2021; 4(2): 482–528. <https://doi.org/10.3390/vibration4020030> <https://elibrary.ru/jluusj>
4. 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 Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2019; 98(10): 1108–12. <https://elibrary.ru/agrnks> (in Russian)
5. Zuyeva M.A., Shpagina L.A., Cerasimenko 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)
6. Gorokhova L.G., Zhukova A.G., Izmailov A.I., Mikhailova N.N. Prospects of using securinea suffruticosa (*Securinea suffruticosa* (Pall.) Rehd.) As a dietary supplement for the prevention of occupation-caused polyneuropathy (literary review). *Gigiena i Sanitaria (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)
7. Zhukova A.G., Kizichenko N.V., Gorokhova L.G., Kazitskaya A.S. Experimental models of vibration disease (literature review). *Gigiena i Sanitaria (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)
8. 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 Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2025; 104(4): 415–21. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-4-415-421> <https://elibrary.ru/hvnspg> (in Russian)
9. Tchoudinov O.A., Borzunova Yu.M., Samokhvalova G.N., Fyodorov A.A., Venedictov 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)
10. Saarkoppel' L.M., Kir'yakov 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)
11. Yakimova N.L., Lizarev V.A., Pankov A.V., Kuleshova M.V., Katamanova E.V., Rukavishnikov V.S., 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)
12. Zhukova A.G., Gorokhova L.G., Gostyaeva E.P., Kizichenko N.V., Bugaeva M.S., Bondarev O.I. A method for modeling vibration disease in laboratory animals. Patent RF No. 2859822; 2026. (in Russian)
13. Korzhevskii D.E. *Brief Description of Basic Histology Technics for Doctors and Laboratory Histologists [Kratkoe izlozhenie osnov gistologicheskoi tekhniki dlya vrachei i laborantov-gistologov]*. St. Petersburg: Krof; 2005. <https://elibrary.ru/rwxfhf> (in Russian)
14. Rakitsky V.N., Nikolaeva N.I. *Morphofunctional Criteria of Environmental Factors Effect on an Organism [Morfofunktsional'nye kriterii deistviya na organizm faktorov okruzhayushchei sredy]*. Moscow: Meditsina; 2001. <https://elibrary.ru/sndkgt> (in Russian)
15. Iaccarino J., Mignini I., Maresca R., Giansanti G., Esposto G., Borriello R., et al. The impact of air pollution on the lung-gut-liver axis: oxidative stress and its role in liver disease. *Antioxidants (Basel)*. 2025; 14(10): 1148. <https://doi.org/10.3390/antiox14101148> <https://elibrary.ru/qiexbn>
16. Rao R. Oxidative stress-induced disruption of epithelial and endothelial tight junctions. *Front. Biosci.* 2008; 13(18): 7210–26. <https://doi.org/10.2741/3223> <https://elibrary.ru/pljith>
17. Khosravipour M., Ghanbari Kakavandi M., Gharagozlou F., Nadri F., Barzegar A., Emami K., et al. Independent, modified, and interacting effects of long-term noise, extremely low-frequency electromagnetic fields, and shift work exposures on liver enzymes. *Environ. Pollut.* 2023; 333: 122036. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122036> <https://elibrary.ru/kjkkxx>
18. Li N., Cui Y., She X., Cui B., Yu S. Effect of noise on morphological structure and functions of rat liver. *J. Occup. Environ. Med.* 2022; 39(4): 439–45. <https://doi.org/10.1183/JEOM21389> (in Chinese)
19. Litvinova O.S., Rosly L.M. Pathogenetic mechanisms and a diagnostic value of biochemical indices in patients with severe viral hepatitis. *Infektsionnye bolezni*. 2006; 4(1): 11–4. <https://elibrary.ru/iaqbbx> (in Russian)
20. Galimova R.R., Valeeva E.T., Timasheva G.V., Bakirov A.B. Assessment of the biochemical status of workers manufacturing ethylbenzene and styrene. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya - ZNISO*. 2020; 28(6): 40–3. <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2020-327-6-40-43> <https://elibrary.ru/gqycyr> (in Russian)
21. Ghenu M.I., Dragoș D., Manea M.M., Balcaniu-Stroescu A.E., Ionescu D., Negreanu L., et al. The pivotal role of presepsin in assessing sepsis-induced cholestasis. *Diagnostics (Basel)*. 2024; 14(16): 1706. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14161706> <https://elibrary.ru/enypmg>
22. Fokina E.G. Human biochemical passport as a tool for assessment of human health wellbeing during clinical trials. *Farmatsiya*. 2015; (5): 36–40. <https://elibrary.ru/uaxuqf> (in Russian)
23. Dolgopolova E.V., Sotskaya Ya.A. Indicator of lactate dehydrogenase activity and its isozyme composition in patients with cap pneumonia on the background of chronic pathology of the hepatobiliary system. *Universitetskaya klinika*. 2023; (3): 44–8. <https://elibrary.ru/odncsg> (in Russian)
24. Zemlyanova M.A., Koldibekova J.V. Evaluation of biochemical and hematological indicators among fluoropolymer workers exposed to noise. *Meditsina truda i ekologiya cheloveka*. 2018; (2): 16–21. <https://elibrary.ru/xqyijf> (in Russian)

Original article

25. Sun S., Zheng S., Shen C., Dong R., Dong K., Jiang J., et al. Low gamma-glutamyl transpeptidase levels at presentation are associated with severity of liver illness and poor outcome in biliary atresia. *Front. Pediatr.* 2022; 10: 956732. <https://doi.org/10.3389/fped.2022.956732> <https://elibrary.ru/ffoews>
26. Sato-Espinoza K., Chrysostome M.L., Vierkant R.A., Miller H.B., Choti Prasadhi P., Ilyas S.I., et al. Low serum pseudocholinesterase levels are associated with mortality in patients with hepatocellular carcinoma. *Hepatol. Commun.* 2026; 10(1): e0879. <https://doi.org/10.1097/HC9.0000000000000879> <https://elibrary.ru/depdpi>

Сведения об авторах

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

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

Жукова Анна Геннадьевна, доктор биол. наук, доцент, зав. лаб. молекулярно-генетических и экспериментальных исследований ФГБНУ «НИИ КППГЗ», 654041, Новокузнецк, Россия. E-mail: nyura_g@mail.ru

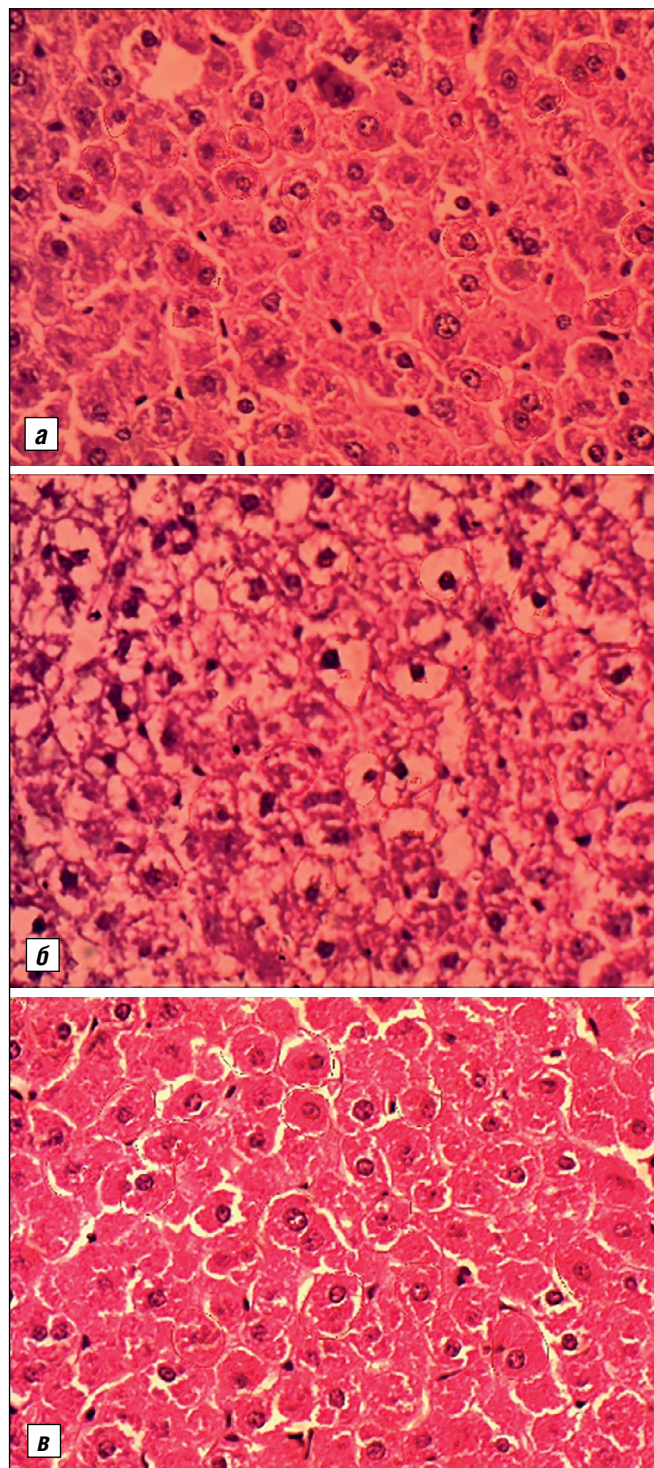
About the authors

Larisa G. Gorokhova, PhD (Biology), associate professor, leading researcher, 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

Ekaterina P. Gostyaeva, graduate assistant, 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

Anna G. Zhukova, DSc (Biology), associate professor, head, Molecular-genetic and experimental study laboratory, Research Institute for Complex Problems of Hygiene and Occupational Diseases, Novokuznetsk, 654041, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-4797-7842> E-mail: nyura_g@mail.ru

К статье Л.Г. Гороховой и соавт.
To the article by Larisa G. Gorokhova et al.



Морфологические изменения в печени крыс при вибрационном воздействии: *а* – контроль; *б* – 3 нед воздействия; *в* – 9 нед воздействия. Окраска гематоксилин-эозином. Световая микроскопия, «Olympus CX31 RBSF» (Германия) при увеличении окуляра 10 × 18 и объектива 40 с водной и масляной иммерсией с использованием цифровой камеры Levenhuk C800.

Morphological changes in the liver in rats exposed to vibration: *a* – control; *б* – 3 weeks of exposure; *в* – 9 weeks of exposure. Hematoxylin-eosin staining. Light microscopy, «Olympus CX31 RBSF» (Germany) with a 10 × 18 eyepiece magnification and a 40 lens with water and oil immersion using a Levenhuk C800 digital camera.