

Берсенева Е.Ю.¹, Дубинин В.И.^{2,3}, Ермаков В.М.⁴, Кирпичева А.И.⁴

Исследование психофизиологической реакции пассажиров скоростных поездов с различным уровнем комфорта

¹ФГБУН «Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем Российской академии наук», 123007, Москва, Российская Федерация;

²Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», 141070, Королёв, Московская область, Российская Федерация;

³ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250, Москва, Российская Федерация;

⁴ООО «Научно-производственное предприятие «Прикладные перспективные технологии – АпАТэк», 107078, Москва, Российская Федерация

Введение. В целях создания нормативной базы, в том числе гармонизированной с европейскими нормативными документами в части оценки комфортабельности пассажиров, выполнена разработка стандарта предприятия СТО РЖД «Услуги на железнодорожном транспорте. Правила оценки уровня комфорта пассажиров в поездах». Задача исследования – сопоставить показатели уровня комфорта пассажиров, определяемого значениями воздействующих на них ускорений, с возникающими при этом психологическими ощущениями и физиологическими изменениями в организме в зависимости от типа подвижного состава и состояния пути.

Материалы и методы. Эксперимент с использованием приборов контроля ЭКГ проводили для 4 групп испытуемых из 11 человек каждая в составе 6 мужчин и 5 женщин в возрасте 30–55 лет. Дополнительно в каждой группе проводили психологическое анкетирование ещё 11 пассажиров. Все – штатные сотрудники подразделений ОАО «РЖД».

Результаты. При поездках в скоростных поездах «Ласточка» и «Сапсан» анкетированные чаще отмечают сонливость и прогрессирование дремотного состояния, а в конце поездки чаще подчёркивают скованность, неприятные ощущения, затекание и онемение мышц ног, вероятно, связанное с длительным нахождением в вынужденной позе в отсутствие определённой свободы движений. В положении лёжа человек испытывает меньшее утомление, которое по ощущениям почти не различается с условиями поездки в положении сидя при коротких переездах. Регуляторные изменения сердечно-сосудистой системы проявляются при сочетанном влиянии непогашенных ускорений (влиянии центробежных сил) и изменении скорости движения.

Заключение. Проведение анкетирования и физиологических измерений динамики колебаний кардиоритма на исследуемых участках маршрутов в сочетании с полученными техническими данными о характере движения подвижных рельсовых средств подтверждают отсутствие критического дискомфорта пребывания пассажиров при поездках на пассажирских и высокоскоростных составах. Расчётные показатели среднего и постоянного уровня комфорта согласованы и не требуют коррекции значений соответствующих шкал.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт; показатели комфорта пассажиров; ускорение; вибрация; психофизиологическое анкетирование; вариабельность сердечного ритма

Для цитирования: Берсенева Е.Ю., Дубинин В.И., Ермаков В.М., Кирпичева А.И. Исследование психофизиологической реакции пассажиров скоростных поездов с различным уровнем комфорта. *Гигиена и санитария*. 2021; 100 (4): 318–326. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-4-318-326>

Для корреспонденции: Берсенева Евгений Юрьевич, канд. биол. наук, вед. науч. сотр., зам. зав. отд., ГНЦ РФ – ИМБП РАН, Лаб. О-072 – Лаборатория вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы ФГБУН ГНЦ РФ – ИМБП РАН, 123007, Москва. E-mail: bersenev_evgenii@mail.ru

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

Благодарность. Авторы благодарят коллектив ООО «Нейрософт» (г. Иваново), лично С. Мыслинского и А. Бандюка за оперативность, научно-техническую и информационную поддержку при проведении исследований. Ю.Н. Семенова – директора ИВНМТ «Рамена» и его сотрудников за предоставленное ПО. Всех сотрудников подразделений ОАО «РЖД», АО «ТПС», ФГБУН ГНЦ РФ – ИМБП РАН, лично участвовавших в организации и осуществлении этого уникального научно-практического проекта. Исследование проводилось в рамках темы РАН 64.1. Договор № 17-07-160 от 16.08.2019 г. между ФГБУН ГНЦ РФ – ИМБП РАН и АО «Транспуэстрой».

Участие авторов: Берсенева Е.Ю. – концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материала, статистическая обработка, написание текста, редактирование, утверждение окончательного варианта статьи и ответственность за целостность всех частей статьи; Дубинин В.И. – концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материала, статистическая обработка, написание текста, редактирование; Ермаков В.М. – концепция и дизайн исследования, написание текста, редактирование; Кирпичева А.И. – концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материала.

Поступила 17.11.2020 / Принята к печати 10.03.2021 / Опубликована 18.05.2021

Evgeniy Yu. Bersenev¹, Vladimir I. Dubinin^{2,3}, Vyacheslav M. Ermakov⁴, Anna I. Kirpicheva⁴

Investigation of the psychophysiological response of passengers of fast trains with the different comfort level

¹Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences (SSC RF IBMP RAS), Moscow, 123007, Russian Federation;

²Joint Stock Company «Central Research Institute for Machine Building» (JSC «TsNIIIMash»), Korolev, 141070, Russian Federation;

³National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU «MPEI»), 111250, Moscow, Russian Federation;

⁴Scientific and production enterprise «ApATeCh» Ltd, 107078, Moscow, Russian Federation

Introduction. To create a regulatory framework, including harmonized with European normative documents in terms of assessing passengers' comfort, the standard of the enterprise SТО RZD "Services in railway transport was developed. Rules for assessing the level of comfort of passengers on trains." The objective of the study is to compare the indices of the comfort level of passengers, determined by the values of the accelerations acting on them, with the psychological sensations and physiological changes in the body arising in this case, depending on the rolling stock and the state of the track.

Material and methods. The experiment using ECG monitoring devices was carried out in four groups of eleven people, six men and five women aged 30–55 years. Additionally, in each group, a psychological survey of 11 more passengers was carried out. All of them were staff members of the Russian Railways divisions.

Results. When traveling on high-speed trains “Lastochka” and “Sapsan,” the respondents more often note drowsiness and an exhausted state’s progression. At the end of the trip, they often emphasize stiffness, discomfort, numbness, and numbness of the leg muscles, probably associated with an extended stay in a forced position in the absence of specific freedom movements. In the “lying” position, a person experiences less fatigue, which, according to the sensations, hardly differs from the conditions of a trip in a “sitting” position during short journeys. Regulatory changes in the cardiovascular system are manifested with the combined influence of unanceled accelerations (the impact of centrifugal forces) and movement speed changes.

Conclusion. Carrying out a questionnaire survey and physiological measurements of the dynamics of heart rate fluctuations on the investigated sections of the routes in combination with the obtained technical data on the nature of mobile rail vehicles’ movement confirm the absence of critical discomfort for passengers when traveling on passenger and high-speed trains. The calculated values of the average and constant comfort levels are consistent and do not require correction of the corresponding scales’ values.

Keywords: railway transport; passenger comfort indices; acceleration; vibration; psychophysiological questionnaire; heart rate variability

For citation: Bersenev E.Yu., Dubinin V.I., Ermakov V.M., Kirpicheva A.I. Investigation of the psychophysiological response of passengers of fast trains the different comfort level. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)* 2021; 100 (4): 318–326. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-4-318-326> (In Russ.)

For correspondence: Evgeniy Yu. Bersenev, MD, Ph.D., Leading Researcher, Deputy Head of Department, State Research Center of the Russian Federation – IBMP RAS, Lab. O-072 – Laboratory of Autonomic Regulation of the Cardiovascular System of the State Scientific Center of the Russian Federation – IBMP RAS, Moscow, 123007, Russian Federation. E-mail: bersenev_evgenii@mail.ru

Information about the authors:

Bersenev E.Yu., <https://orcid.org/0000-0002-6974-5196>; Dubinin V.I., <https://orcid.org/0000-0003-0236-509X>

Ermakov V.M., <https://orcid.org/0000-0003-3101-7772>; Kirpicheva A.I., <https://orcid.org/0000-0002-0707-397X>

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

Acknowledgments. The authors are grateful to the team of Neurosoft LLC (Ivanovo), personally S. Myslinsky and A. Bandyuk, for their efficiency, scientific, technical, and informational support during the research. Yu.N. Semenov of the Director of IVNMT “Ramena” and his employees for the provided software. All employees of the subdivisions of JSC Russian Railways, JSC TPS, SSC RF – IBMP RAS personally involved in the organization and implementation of this unique scientific and practical project. The research was carried out within the framework of the RAS theme 64.1.

Contribution of the authors: Bersenev E.Yu. – the concept and design of the study, the collection and processing of the material, statistical analysis, writing the text, editing, approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article; Dubinin V.I. – the concept and design of the study, the collection and processing of the material, statistical analysis, writing the text, editing; Ermakov V.M. – the concept and design of the study, writing the text, editing; Kirpicheva A.I. – the concept and design of the study, the collection and processing of the material.

Received: November 17, 2020 Accepted: March 10, 2021 Published: May 18, 2021

Введение

В условиях возрастающей конкуренции на отечественном рынке пассажирских перевозок между авиационным, автомобильным и железнодорожным транспортом одним из ключевых критериев становится уровень качества услуги. Поэтому демонстрация клиентоориентированности, включающей обеспечение высокого уровня комфорта пассажиров в процессе движения, является залогом получения конкурентных преимуществ.

Степень комфорта пассажиров рельсовых транспортных средств в процессе поездки субъективно определяется восприятием ими факторов, обусловленных движением транспортного средства: ускорений знакопеременных, непогашенных, пиковых, общей вибрации разных видов: периодической, случайной, в форме переходных процессов, а также параметров состояния окружающей среды: температура, влажность, качество воздуха, шум, удобство позы, относительное движение законного пейзажа и др.

До последнего времени норматив комфортабельности в части ускорений, воздействующих на пассажира, на российских железных дорогах определялся величиной бокового непогашенного ускорения на буксе колеса при прохождении кривых участков пути [1]. При этом нормативная величина непогашенного ускорения $0,7 \text{ м/с}^2$ определяется расчётом, не зависит от типа вагона и фактического состояния пути.

На территории Европейского союза в отношении правил оценки уровня комфорта при пассажирских железнодорожных перевозках действует Европейский стандарт № 12299:2009 Railway applications – Ride comfort for passengers – Measurement and evaluation (Применение на железных дорогах – Комфорт для пассажиров – Измерение и оценка).

В целях создания нормативной базы, в том числе гармонизированной с европейскими нормативными документами в части оценки комфортабельности пассажиров, по договору с ОАО «Российские железные дороги» выполнена разработка стандарта предприятия СТО РЖД «Услуги на железнодорожном транспорте. Правила оценки уровня комфорта пассажиров в поездах».

Необходимо отметить, что изменение ощущения комфорта пассажира индивидуально, однако его проявление отражается в изменении физиологического состояния пасса-

жера, в частности, параметров его сердечного ритма. По мнению специалистов, основными факторами, с которыми ассоциируется развитие дискомфорта и стресса во время поездки, являются: социально-психологические (недружелюбное отношение к пассажиру, отсутствие должного внимания), личностно-психологические (экстраверты более устойчивы к укачиванию, чем интроверты, тревога и страх провоцируют развитие болезни движения) [2], физиологические (отсутствие должного отдыха перед поездкой, нерациональный режим питания и др.), физические (интенсивный шум, вибрация, резкие ускорения и торможения), повышенные уровни химических веществ и неприятные запахи. Длительное, по крайней мере многочасовое воздействие неблагоприятных факторов окружающей среды определяет значительное функциональное напряжение, увеличивает риск формирования дискомфорта для пассажира. Ряд исследователей подчёркивают наличие существенных корреляций между степенью функциональных сдвигов, прежде всего со стороны сердечно-сосудистой и центральной нервной систем, и величиной нарастающего дискомфорта.

Таким образом, одной из задач при разработке указанного стандарта являлось сопоставление уровня комфорта пассажиров, определяемого значениями воздействующих на них ускорений, с возникающими при этом физиологическими изменениями в организме в зависимости от типа подвижного состава и состояния пути. Решение задачи позволит обосновать объективность методов определения комфорта пассажиров от воздействия ускорений, используемых в российских и европейских нормативных документах, с точки зрения реакции физиологических систем пассажиров на эти воздействия.

В то же время оценить комфортность пребывания пассажира во время поездки представляется возможным, во-первых, с позиций собственного восприятия и самооценки развития утомления и неприятных ощущений, для чего, как правило, применяется метод анкетирования, во-вторых – оценки реакции сердечно-сосудистой системы, базируясь на том факте, что в начальной стадии возникновения болезни движения наблюдается учащение ритма сердечных сокращений и повышается артериальное давление, а по мере развития процесса укачивания пульс становится более редким, дыхание поверхностным, а артериальное давление падает. Одним из методов оценки нарушения регуляторных систем

является вариабельность сердечного ритма (ВСР) [3–5]. По результатам анализа ВСР, с одной стороны, судят о функциональном состоянии сердечно-сосудистой системы, с другой – об адаптивных реакциях целостного организма. Согласно современным представлениям, регуляция сердечного ритма вегетативной нервной системой отражает уровень активации и напряжения систем организма.

Материалы и методы

Эксперимент проводили для групп испытуемых из 11 человек в составе 6 мужчин и 5 женщин в возрасте 30–55 лет. В качестве испытуемых «пассажиры» были приглашены сотрудники структур комплекса предприятий РЖД без жалоб на состояние здоровья, с адекватной реакцией на слабозвучающие воздействия, чьё функциональное состояние не препятствует выполнению профессиональной деятельности (I–IIIa группы состояния здоровья в соответствии с приказом Минздрава России) [6]. Все испытуемые были проинформированы о методике электрокардиографических исследований (ЭКГ) и анкетирования и подписали согласие на участие в исследованиях. Дополнительно, без исследования ЭКГ, проводилось анкетирование ещё 11 пассажиров.

Измерения и анкетирования пассажиров были организованы и осуществлены в ходе 4 поездок:

- в купейных вагонах пассажирских поездов по маршруту Москва – Вязьма (П.М.-В.);
- в купейных вагонах пассажирских поездов по маршруту Санкт-Петербург – Москва (П.СПб.-М.);
- в вагонах скоростного поезда «Ласточка» по маршруту Москва – Вязьма (Л.М.-В.);
- в вагонах скоростного поезда «Сапсан» по маршруту Санкт-Петербург – Москва (С.СПб.-М.).

Все исследования проходили в период активного бодрствования: в утреннее и дневное время. В вагонах поездов «Сапсан» и «Ласточка» дополнительное анкетирование 11 пассажиров проводили в положении сидя, в купейных вагонах скорых поездов – 6 пассажиров в положении лёжа и 5 пассажиров – в положении сидя.

Для измерения ЭКГ и последующего анализа ВСР использовали двухканальные регистраторы «Поли-Спектр-СМ» (ООО «Нейрософт», г. Иваново, Россия). ЭКГ испытуемых регистрировались в ходе всей поездки.

Ускорения регистрировали шумомером-виброметром, анализатором спектра «Экофизика-110А», внесённым в Госреестр средств измерений.

Для обработки данных использовали электронные таблицы MS Excel 2016, статистический пакет Statistica 10.0.

Достоверность различий оценивали по *t*-критерию Уилкоксона и с учётом особенностей анализа данных в малых группах. Статистически значимыми принимали значение $p < 0,05$.

Результаты

В ходе анкетирования (содержание анкеты приведено на рис. 1) в моменты после прохождения априори определённых участков пути, характеризующих наличием кривых изменения направления движения, перепадов высот и участков ускорений-торможений, испытуемым предлагали самостоятельно оценить выраженность утомления по 7-балльной шкале в градациях от «чувствую себя очень хорошо» до «отмечаю наличие очень большого утомления» и по 5-балльной шкале – характер неприятных, дискомфортных или болезненных ощущений. Предлагали указать наличие или отсутствие таких признаков, как сонливость, вялость, заторможенность, укачивание, тошнота, головокружение и др.

Статистический анализ результатов анкетирования в части показателей уровня комфорта осуществлён при следующих предположениях:

1. В качестве испытуемых отобраны люди, предположительно не подверженные болезни движения.

2. Шкалы для показателей постоянного комфорта $C_{cx}(t)$, $C_{cy}(t)$, $C_{cz}(t)$ и утомления протоколов исследования пассажиров (анкет) (см. рис. 1) соотнесены между собой в соответствии с табл. 1.

И в следующей постановке:

3. Нулевая гипотеза (H_0) состоит в том, что выявленные отклонения ощущения комфорта внутри группы испытуемых соответствуют статистике наблюдений и не вызваны изменением параметров движения: $p \leq 0,01$; $Q \geq 0,99$.

4. Альтернативная гипотеза (H_1): $p > 0,01$; $Q < 0,99$.

5. Статистический критерий: биномиальный.

6. Уровень значимости $\alpha = 0,05$.

Для принятой формальной постановки и мощности выборки 20...24 испытуемых для отклонения гипотезы H_0 требуется проявление в выборке иного от рассматриваемого в качестве действующего уровня комфорта в 2 и более анкетах. Выраженность утомления представлена на графиках рис. 2.

Результаты обработки анкет оценивали по показателю комфорта по шкале утомления (см. рис. 1) и по измерениям ускорений – показатели среднего уровня комфорта и постоянного уровня комфорта [1]. Всего выполнено 76 согласованных анкетирований испытуемых и измерений ускорений. В поездке П.М.-В., непродолжительной по времени, единично отмечали укачивание, подташнивание, незначительное головокружение. В длительной поездке по маршруту П.СПб.-М. 38% анкетированных в качестве основного фактора дискомфорта отмечали влияние излишнего шума. На маршруте Л.М.-В. 12% исследуемых отмечали сухость во рту, проявления сонливости (вялость, заторможенность), указывали в 35% случаев, и наибольшее количество неприятных факторов поездки (41%) было связано с ощущениями скованности, затекания мышц. Треть исследуемых указывали в анкетах сочетание двух последних факторов. В поезде С.СПб.-М. дремотное состояние, сонливость и отсутствие свободы движений (затекание мышц) отмечали соответственно 56 и 44% анкетированных.

При исследовании ВСР применен подход, позволяющий сопоставить полученные данные с показателями ускорения по трём осям, базовой скорости движения транспортного средства, вибрации и другим компонентам движения, оказывающим непосредственное влияние на функциональное состояние человека и позволяющим комфортно переносить поездки в различных подвижных составах. Известно, что при определённом воздействии на человека физиологический ответ формирует комплекс реакций организма, обеспечивающих восприятие стимула и подготовку адекватного решения. Инициацию стоит ожидать именно от той системы организма, которая подвергается наибольшему влиянию [7]. Например, вибрации и ускорения в транспортном средстве или моделирование вестибулярной нагрузки (вращение, укачивание) воспринимаются сенсорными системами: органом зрения, отолитовым органом и полукружными каналами вестибулярного аппарата, механорецепторами тела, рецепторами внутренних органов. При этом вестибулосимпатические рефлексы проявляются через активацию вестибулярных рецепторов с вовлечением нейрональных связей, ядер продолговатого мозга и проводящих путей, которые опосредуют адаптивные действия симпатических сердечных, сосудистых и дыхательных нервов [8]. Однако при отсутствии у человека выраженных вестибулярных расстройств и относительно небольших перегрузках вестибуловегетативные реакции незначительны или почти не проявляются. В результате проведённых ранее исследований отмечалось, что физиологический ответ на воздействие ускорений обеспечивается за счёт быстро адаптирующихся механизмов кардиоритма. Поэтому данные расчётных показателей ВСР приняты как адекватный инструмент анализа для сопоставления «технических» и «физиологических» измерений.

Использован следующий подход. Ускорения в трёх направлениях: продольном, поперечном и вертикальном, как показатели постоянного комфорта (C_{cx} , C_{cy} , C_{cz}), рассчитываемые по средним значениям ускорений за период 5 с,

Original article

Протокол исследований пассажира (Ф.И.О.) _____ Дата _____ Подпись _____
 Участок _____, путь _____, тип подвижного состава _____, время проведения измерений от момента отправления _____,
 положение вагона в составе поезда: начало, середина, конец поезда; положение пассажира: сидя, стоя, лёжа.

1. Оцените выраженность Вашего утомления в динамике поездки, поставив соответствующий балл во временную ячейку:																						
Участки пути	До	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	После
а) чувствую себя очень хорошо																						
б) чувствую себя хорошо																						
в) чувствую себя удовлетворительно																						
г) отмечаю наличие лёгкого утомления																						
д) отмечаю наличие среднего утомления																						
е) отмечаю наличие большого утомления																						
ж) отмечаю наличие очень большого утомления																						

2. Каков характер неприятных ощущений, возникающих в динамике поездки? Оцените их выраженность в баллах:
 1 – признак отсутствует; 2 – выражен слабо; 3 – выражен значительно; 4 – выражен сильно; 5 – выражен очень сильно

Участки пути	До	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	После
а) сухость во рту																						
б) сонливость, вялость, заторможенность																						
в) укачивание, подташнивание, головокружение																						
г) повышенное возбуждение																						
д) болезненность или «затекание» мышц в различных частях тела																						
е) головные боли																						
ж) шум или закладывание в ушах																						
з) слабость, появление «холодного» пота																						
и) другое (укажите, что именно)																						

Рис. 1. Содержание анкеты.

Passenger research protocol (Full name) _____ Date _____ Signature _____
 Section _____, way _____, type of rolling stock _____, measurement time from the moment of departure _____,
 the position of the carriage in the train: beginning, middle, end of the train; passenger position: sitting, standing, lying.

1. Evaluate the severity of your fatigue in the dynamics of the trip by putting an appropriate point in the time slot:																						
Sections of track	Before	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	After
а) I feel very good																						
б) I feel good																						
в) I feel satisfactory																						
д) I note the presence of slight fatigue																						
е) I note the presence of average fatigue																						
ф) I note the presence of great fatigue																						
г) I note the presence of very great fatigue																						

2. What is the character of the unpleasant sensations arising in the dynamics of the trip? Rate their severity in points:
 1 – no sign; 2 – weakly expressed; 3 – significantly expressed; 4 – strongly expressed; 5 – very strongly expressed

Sections of track	Before	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	After
а) dry mouth																						
б) drowsiness, lethargy, lethargy																						
в) motion sickness, nausea, dizziness																						
д) increased arousal																						
е) soreness or "muscle leakage" in various parts of the body																						
ф) headaches																						
г) noise or stuffing in the ears																						
д) weakness or cold sweat																						
и) other (indicate what exactly)																						

Fig. 1 Content of the questionnaire.

Таблица 1 / Table 1

Соотнесение шкал показателей постоянного комфорта $C_{cx}(t)$, $C_{cy}(t)$, $C_{cz}(t)$ и утомления протоколов исследования пассажиров (анкет)
Correlation of the scales of indices of the continuous comfort $C_{cx}(t)$, $C_{cy}(t)$, $C_{cz}(t)$ and fatigue of passenger research protocols (questionnaires)

Шкала показателей постоянного комфорта Continuous comfort scale		Шкала утомления Fatigue scale	Балл Score
Очень комфортно (Ок) Very comfortable	$C_{cx}(t), C_{cy}(t), C_{cz}(t) < 0,20 \text{ м/с}^2$	Чувствую себя очень хорошо Feel myself very good	1
	$C_{cx}(t), C_{cy}(t), C_{cz}(t) < 0.20 \text{ м/с}^2$	Чувствую хорошо Feel good	
Комфортно (К) Comfortable (C)	$0,20 \text{ м/с}^2 \leq C_{cx}(t), C_{cy}(t), C_{cz}(t) < 0,30 \text{ м/с}^2$	Чувствую себя удовлетворительно I feel satisfactory	3
	$0.20 \text{ м/с}^2 \leq C_{cx}(t), C_{cy}(t), C_{cz}(t) < 0.30 \text{ м/с}^2$	Отмечаю наличие лёгкого утомления I notice the presence of mild fatigue	
Пограничное ощущение (ПО) Borderline sensation	$0,30 \text{ м/с}^2 \leq C_{cx}(t), C_{cy}(t), C_{cz}(t) < 0,40 \text{ м/с}^2$	Отмечаю наличие среднего утомления I note the presence of average fatigue	5
	$0.30 \text{ м/с}^2 \leq C_{cx}(t), C_{cy}(t), C_{cz}(t) < 0.40 \text{ м/с}^2$		
Менее комфортно/некомфортно (МК) Less comfortable / uncomfortable	$0,40 \text{ м/с}^2 \leq C_{cx}(t), C_{cy}(t), C_{cz}(t)$	Отмечаю наличие большого утомления I note the presence of severe fatigue	6
	$0.40 \text{ м/с}^2 \leq C_{cx}(t), C_{cy}(t), C_{cz}(t)$		
Очень некомфортно (ОН) Very uncomfortable	—	Отмечаю наличие очень большого утомления I have a lot of fatigue	7

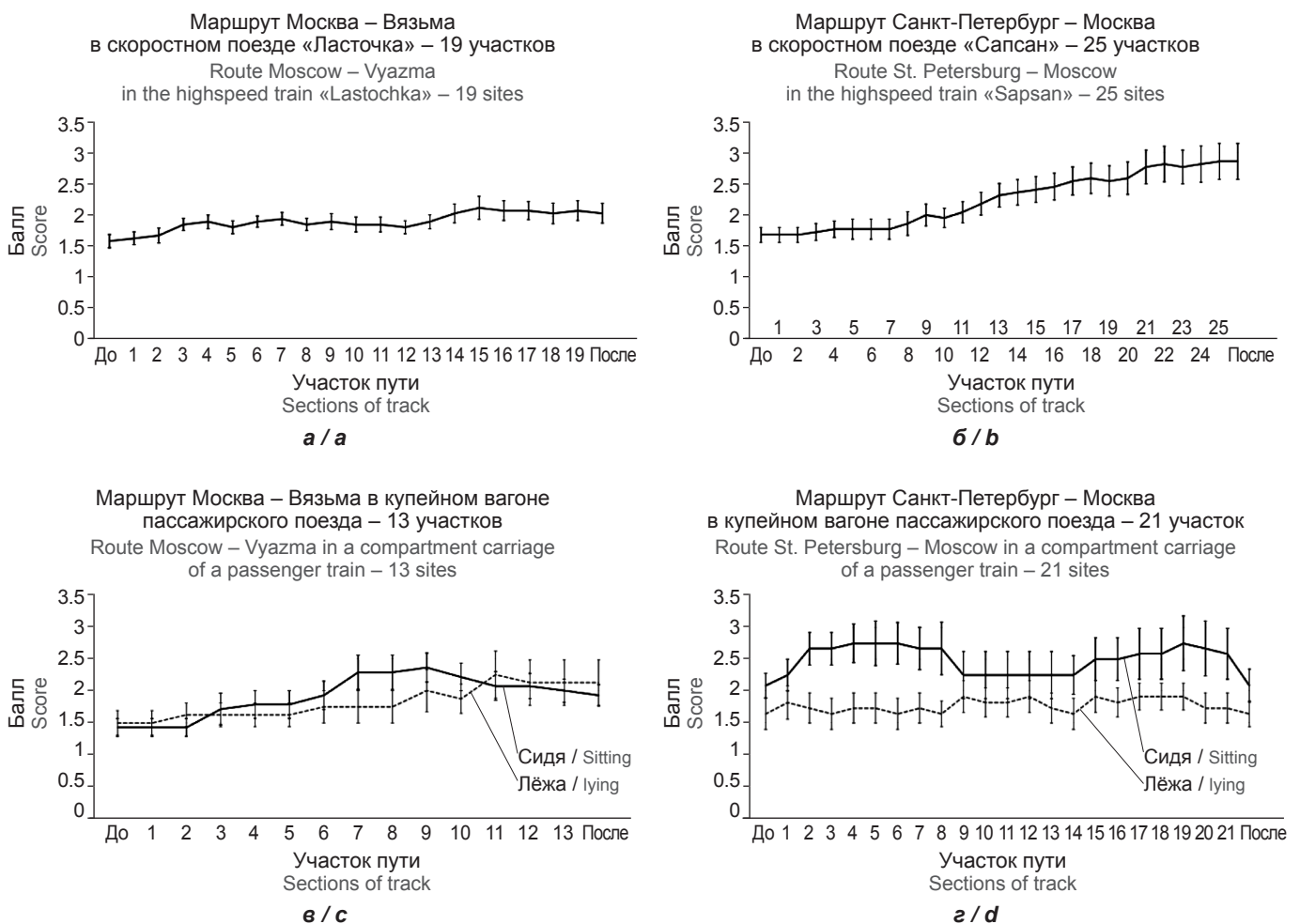


Рис. 2. Выраженность утомления на маршрутах.

Fig. 2. The severity of fatigue on the routes.

Показатели вариабельности сердечного ритма в начале и конце поездки
HRV indices at the beginning and end of the trip

Направление поезда Train direction	Код измерения Measurement code	ЧСС, уд. в 1 мин Heart rate, bpm		SDNN, мс SDNN, ms		СИ (Индекс напряжения), усл. ед. Stress index, conv. units		LF/HF, усл. ед. LF/HF, conv. units	
		в начале поездки at the beginning of the trip	в конце поездки at the end of the trip	в начале поездки at the beginning of the trip	в конце поездки at the end of the trip	в начале поездки at the beginning of the trip	в конце поездки at the end of the trip	в начале поездки at the beginning of the trip	в конце поездки at the end of the trip
П.М.-В.*	$M \pm m$	76.0 ± 4.6	77.1 ± 3.7	37.4 ± 4.5	35.6 ± 3.4	212.7 ± 56.4	202.7 ± 45.5	3.6 ± 0.9	4.2 ± 0.8
Р.М.-В.* лёжа / lying	$M \pm m$	66 ± 3.3	69.9 ± 3.6	45.9 ± 4.7	39.9 ± 3.9	95.6 ± 18.2	137.6 ± 37.8	2.7 ± 1.3	2.8 ± 0.6
	$M \pm m$ сидя / sitting	90.9 ± 2.2	87.8 ± 2.3	24.6 ± 2.2	29.15 ± 5	388.2 ± 77.1	300.3 ± 81.4	4.8 ± 0.8	6.1 ± 1.5
П.СПб.-М.*	$M \pm m$	80.4 ± 2.7	75.8 ± 3.5	38.3 ± 2.9	54.1 ± 4.8*	182.5 ± 39.3	103.7 ± 25.9	5.2 ± 1.3	4.9 ± 1.5
Р.СтП.-М.* лёжа / lying	$M \pm m$	81.4 ± 3.5	71.8 ± 2.7*	38.2 ± 3.3	52.9 ± 6.2*	197.5 ± 57	112.5 ± 33.7	5.5 ± 1.6	3.6 ± 0.4*
	$M \pm m$ сидя / sitting	82.1 ± 5.2	81.4 ± 5.4	38.3 ± 5	55.8 ± 4.7	161.5 ± 35	91.3 ± 15.2	4.95 ± 2	6.7 ± 3.1
Л.М.-В.*	$M \pm m$	79.6 ± 4.7	76.3 ± 4.2	37.9 ± 7	42.7 ± 7.6	237.1 ± 61.2	183.5 ± 50	3.4 ± 1	2.8 ± 0.7
Л.М.-В.*	$M \pm m$	79.6 ± 4.7	76.3 ± 4.2	37.9 ± 7	42.7 ± 7.6	237.1 ± 61.2	183.5 ± 50	3.4 ± 1	2.8 ± 0.7
С.СПб.-М. С.СтП.-М.*	$M \pm m$	87.1 ± 2.6	78.7 ± 2.5	37.2 ± 3.2	45.1 ± 5.3	213.0 ± 35.9	155.4 ± 39.9	3.2 ± 1.4	2.0 ± 0.4

Примечание. * П.М.-В. – пассажирские поезда по маршруту Москва – Вязьма; П.СПб.-М. – пассажирские поезда по маршруту С.-Петербург – Москва; Л.М.-В. – скоростные поезда «Ласточка» по маршруту Москва – Вязьма; С.СПб.-М. – скоростные поезда «Сапсан» по маршруту С.-Петербург – Москва.

Note. * P.M.-V. – route Moscow – Vyazma in a compartment carriage of a passenger train; P.StP.-M. – route St. Petersburg – Moscow in a compartment carriage of a passenger train; L.M.-V. – route Moscow – Vyazma in the highspeed train «Lstochka»; S.StP.-M. – route St. Petersburg – Moscow in the highspeed train «Sapsan».

сопоставляли с показателями статистического и частотно-анализа ВСР, с возможностью использования по крайней мере двух методов спектрального анализа ритмограмм: 1) периодограммный метод (быстрое преобразование Фурье – БПФ и периодограмма Уэлча) и 2) метод непрерывного вейвлет-преобразования. При этом при использовании БПФ «скользящее окно» занимало полноценное для математической обработки показателей ВСР пространство, составляющее не менее 256 с с окном сдвига 5 с. Таким образом, технические измерения ускорений и вибраций «объекта движения» – вагона подвижного состава и влияния ускорений на пассажиров – «субъектов воздействия» по временной оси и физиологическому ответу (показателям ВСР) совпадают.

В табл. 2 отражены результаты обработки ВСР. Рассчитаны 5-минутные фрагменты обработки кардиоинтервалограмм в начале поездки и перед её окончанием. Выбраны стационарные участки записи ЭКГ в отсутствие двигательных помех после 15–20-минутного спокойного пребывания в положении тела испытуемого сидя или лёжа в подвижном составе в начале движения поезда и за 15–20 мин до завершения исследования.

Для спектрального анализа ВСР стандартно использовали следующее деление шкалы частот:

- HF – «HighFrequency» абсолютная или относительная (в %) мощность спектра высокочастотных колебаний сердечного ритма в диапазоне 0,4–0,15 Гц (дыхательные волны), отражающая активность парасимпатического звена регуляции;
- LF – «LowFrequency» абсолютная или относительная (в %) мощность спектра низкочастотных колебаний сердечного ритма в диапазоне 0,15–0,04 Гц (сосудистые волны), отражающая активность симпатического вазомоторного центра.

Представленные в табл. 2 данные наглядно показывают, что влияние поездки в различных транспортных средствах зависит от физиологического статуса организма человека и возможности адаптироваться к условиям поездки, а также от «вынужденного» положения тела сидя или лёжа.

Ранее на примере водителей автобусов установлено, что длительный профессиональный стресс вызывает существенные изменения регуляции сердечной деятельности и в большей степени зависит от возраста исследуемого и функциональных резервов организма [3]. В других исследованиях [9] при использовании дискретной и непрерывной регистрации показателей вариабельности сердечного ритма в условиях естественной деятельности выявлено, что при непрерывном мониторинге существуют значительные отличия от привычных популяционных показателей, полученных при стандартных однократных измерениях в стационарных условиях. Например, при сходных начальных параметрах вариабельности сердечного ритма в течение дня результаты исследований различались у разных испытуемых в пределах от нормальных значений до критических. Таким образом, мониторинговые измерения необходимо проводить с учётом персональных индивидуальных особенностей реакции организма в ответ на предъявляемые воздействия. Определённые тенденции выявляются в реакции автономной нервной системы в ответ на кратное увеличение скорости движения транспортного средства.

Признано, что наиболее чувствительным индикатором кардиоритма является стресс-индекс (СИ) – показатель, характеризующий приспособительную реакцию сердечно-сосудистой системы в ответ на возмущающие воздействия. Динамика изменений СИ в космической медицине вычислялась с целью оценки адаптационных резервов космонавтов, степени влияния на организм перегрузок на этапах взлёта и посадки, определения степени риска нарушений сердечно-сосудистой системы в условиях невесомости.

По изменениям СИ при ускорении и торможении движущегося транспортного средства можно наблюдать, как сенсорные системы организма «пассажиров» формируют соответствующий приспособительный эффект, позволяющий оперативно отреагировать на изменившиеся условия. Наблюдается, что наиболее резкие изменения (снижение) СИ происходят при увеличении как продольных ускорений,

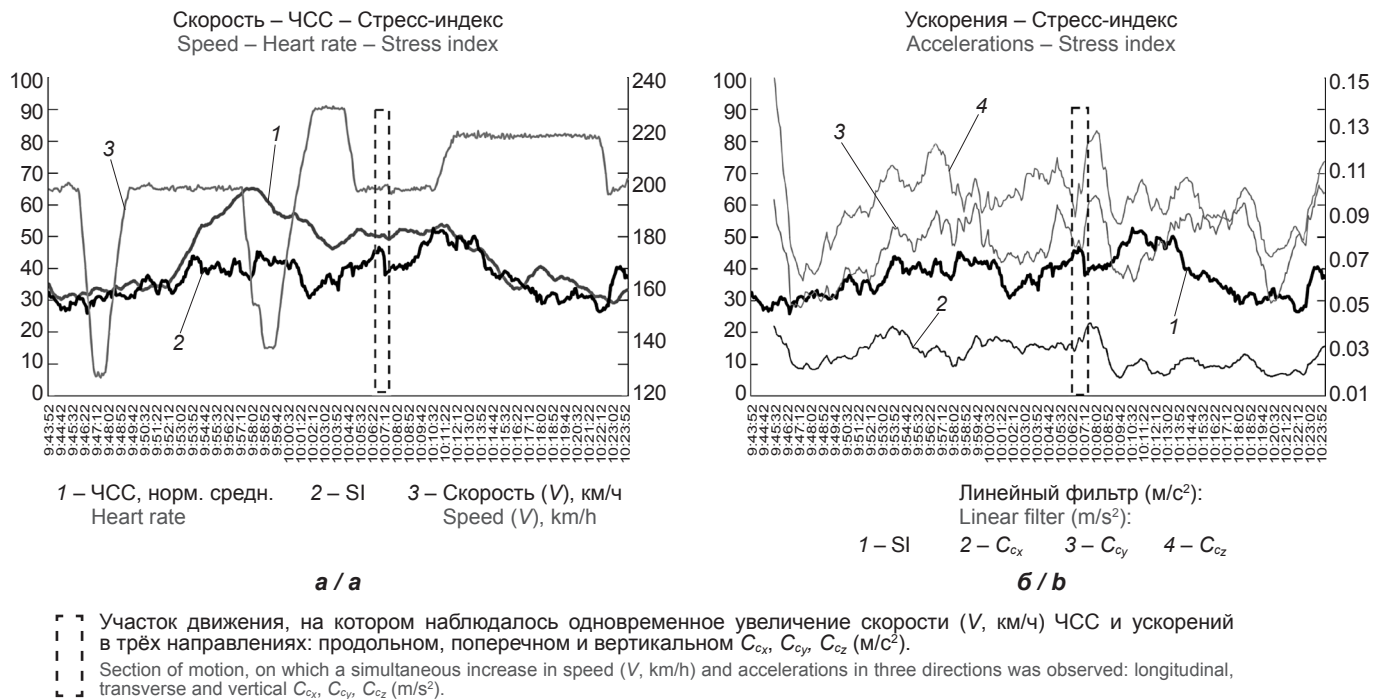


Рис. 3. Соотношение изменений скорости движения поезда (а), ускорений (вибраций) по трём осям (б) и показателя Стресс-индекс.

Fig. 3. Ratio of changes in train speed (a), accelerations (vibrations) along three axes (b) and the Stress index.

так и ускорений по трём направлениям. Важно, что физиологический ответ на эти воздействия у пассажиров, занимающих положение лёжа, менее выражен и более продолжительный в отличие от данных исследуемых в позе сидя. При регистрации длительное время устойчиво низких значений ускорений по трём направлениям и неизменной скорости движения наблюдается снижение СИ, что с позиций физиологической оценки состояния организма можно признать как наступление комфортного состояния.

Необходимо отметить, что показатель СИ выбран на основании расчёта корреляций с показателями скорости и ускорений на отдельных участках пути: 1) без резких изменений скорости и ускорений (вибраций) (коэфф. корр. $r = 0,935$ с показателем скорости (V, км/ч) и 2) на участке с резким увеличением скорости и максимальными значениями ускорений по трём направлениям (коэфф. корр. V, км/ч, $r = -0,954$, C_{cx}, $r = -0,888$, C_{cy}, $r = -0,848$, C_{cz}, $r = -0,913$ (рис. 3).

Таким образом, выбор метода анализа ВСП и показателя СИ как интегративно отображающего влияние скорости и ускорений на функциональное состояние человека, находящегося во время движения в поезде, оправдан.

Выявленные взаимосвязи увеличения или снижения скорости движения транспортного средства (торможения), а также ускорений-вибраций по трём направлениям (C_{cx}, C_{cy}, C_{cz}) с показателями анкетного опроса и вегетативной регуляции кровообращения показывают, что комфортное пребывание пассажиров в поезде в купейном вагоне или скоростном поезде зависит от ряда причин (положение тела, шум, температура воздуха), но при этом сходным образом проявляется в механизмах физиологического ответа организма человека. В качестве характеристик реактивности вегетативной нервной системы, обеспечивающей регуляцию изменчивости сердечбиений в ответ на изменение особенностей движения в поездах, выбраны ЧСС, СИ, RMSSD, SDNN и соотношение LF/HF.

Показатель СИ имеет достаточно широкий диапазон значений, которые трудно интерпретировать с позиций за-

кона нормального распределения, поэтому для анализа этого показателя рассчитан его десятичный логарифм (lg10). Далее для экспертной оценки по каждому из показателей выбирали диапазоны их изменений. Важно отметить, что анализ ВСП и существующие общепринятые возрастные и гендерные нормативы для здоровых людей допустимы для стационарных процессов при исследовании лёжа в лабораторных условиях. Поэтому полученные результаты анализа ВСП рассматривали в сравнении индивидуальных значений в начале и конце поездки, а также принимали во внимание факт, что большая часть измерений проводилась в положении тела сидя.

Выбранные показатели соотнесены с определением уровня комфорта: «очень комфортно» – ОК, «комфортно» – К и «пограничные ощущения» – ПО. Для значений ЧСС показатели комфорта ОК не должны превышать 85 уд. в 1 мин. Для значений СИ соотношение ОК < К < ПО, определено как $2 < 2,05 < 2,2$, RMSSD как $25 < 20 < 15$ мс, SDNN $50 < 40 < 30$ мс, соотношение LF/HF $3 < 5 < 8$.

Обсуждение

Адаптационные и дезадаптационные процессы человека (в том числе экспериментальный стресс) оцениваются в основном в условиях относительного покоя или строго регламентируются порядком (методикой и протоколом) проведения лабораторных тестов при обязательном жёстком контроле функционального состояния испытуемого, положения тела (сидя, лёжа) и в отсутствие прочих внешних раздражающих стимулов (шум, повышенное/пониженное атмосферное давление, внешняя температура). Поставленные в нашем исследовании задачи (провести измерения в условиях движения в различных подвижных составах с разным уровнем комфорта, на разных участках пути) как раз преследуют обратную ситуацию – поиск изменений психофизиологических функций человека в привычных (для пассажиров) условиях. Иными словами, показать, что физиологический ответ организма человека на удобную, комфортную для него

ситуацию при изменяющихся внешних условиях не вызывает неприятных или опасных состояний.

Развитие скоростных видов транспорта требует изучения влияющих факторов, в особенности если эти факторы вызывают нарушения функций организма человека. Условия поездки в различных видах транспортных средств должны обеспечивать такой уровень комфорта пассажиров, когда развитие неприятных ощущений, объединённых понятием «кинетоз» (болезнь движения), не происходит.

К основным видам ускорений и их сочетаниям, встречающимся при движении в пассажирских рельсовых транспортных средствах, можно отнести прямолинейное ускорение (положительное или отрицательное – разгон или торможение), радиальное или центростремительное ускорение, угловое ускорение, возникающее при неравномерном движении тела по окружности или её отрезку. Во время движения в поезде на организм человека преимущественно действуют линейные и угловые ускорения. Проявление болезни движения более характерно для морских путешествий и при попадании в зону турбулентности при полётах на воздушном транспорте. Поездки в высокоскоростном железнодорожном транспорте со средней скоростью движения более 200 км/ч и наличием больших непогашенных ускорений в кривых поворотов, вероятно, увеличат частоту возникновения болезни движения. В положении лёжа человек испытывает меньшее утомление, которое по ощущениям почти не различается с условиями поездки в положении сидя при коротких переездах.

При поездках в скоростных поездах «Ласточка» и «Сапсан» анкетированные чаще отмечают сонливость и прогрессирование дремотного состояния, а в конце поездки чаще подчёркивают скованность, неприятные ощущения, затекание и онемение мышц ног, вероятно, связанные с длительным нахождением в вынужденной позе в отсутствие определённой свободы движений. Данные анализа ВСР не обнаружили сколь-либо значительных сдвигов вегетативной регуляции в сторону критических нарушений у здоровых людей.

В нашем исследовании мы отметили устойчивую зависимость влияния продольных и угловых ускорений на параметры регуляции кровообращения человека. Реакция сердечно-сосудистой системы развивается разнонаправленно: в ответ на резкое увеличение скорости движения транспортного средства и рост продольных ускорений (C_x) показатель СИ прирастает. Противоположная регуляторная реакция сердечного ритма проявляется при торможении поезда. Адаптивная реакция непродолжительна по времени и легко переносится пассажирами. В большей степени реакция сердечно-сосудистой системы проявляется при сочетанном влиянии непогашенных ускорений (влиянии центробежных сил) и изменении скорости движения. При достижении равномерной скорости движения и отсутствии частых смен участков с наличием кривых (влияние непогашенных ускорений) показатели регуляторных компонент кардиоритма остаются неизменными. В длительных поездках, более 4 ч, особенно в высокоскоростных поездах с наличием исключительно мест для сидения, к концу поездки появляется усталость, что в свою очередь может провоцировать нарушения регуляции системы кровообращения. Более комфортным для функционирования системы кровообращения в длительных поездках является положение пассажира, близкое к горизонтальному.

Заключение

По итогам исследований обоснованы показатели комфорта, включённые в СТО РЖД «Услуги на железнодорожном транспорте. Правила оценки уровня комфорта пассажиров в поездах».

В дальнейшем планируется следующий порядок работы. На основе разработанных нормативов на участках с невысоким уровнем комфорта проводится анализ параметров пути, вагонов, режима ведения поезда с разработкой адресных мер по повышению комфортабельности по оптимизации положения пути, а также создания специальных решений по гашению вибраций в подвижном составе. Эффективным решением в части пути является высокоточная постановка его в проектное положение при строительстве и ремонтах по цифровым технологиям Комплексной системы пространственных данных инфраструктуры железнодорожного транспорта.

Разработка СТО РЖД «Услуги на железнодорожном транспорте. Правила оценки уровня комфорта пассажиров в поездах» позволила сопоставить существующие европейские и российские нормативные документы в части оценки комфортабельности пассажиров и внести предложения по их совершенствованию; оценить условия поездок в различных поездах, следующих с разной скоростью по определённым направлениям; адресно определять места, где пассажир испытывает дискомфорт, и принимать меры к устранению условий, приводящих к его развитию; планировать доходность от пассажирских перевозок и пр. [10, 11].

Следует отметить, что проведённые исследования и разработанный стандарт являются первым шагом в данном направлении. Требуется дальнейшее развитие и изучение данной темы с последующей переработкой стандарта предприятия в ГОСТ.

Выводы

1. Поездки в купейных вагонах на маршрутах менее 2,5–3 ч не выявляют значимого роста или снижения показателей, отражающих адаптационные реакции организма пассажиров, в отличие от маршрутов большей длительности. При этом в более длительных поездках (не менее 7–8 ч) в поездах дальнего следования положение пассажира лёжа вызывает меньшее напряжение механизмов регуляции, что можно оценить как более комфортную переносимость поездки.

2. В купейных вагонах расположение пассажира лёжа в длительной поездке сопровождается снижением активности регуляторных центров, обеспечивающих повышение тонуса сосудов (LF/HF, усл. ед.). Пассажиры, которые вынужденно длительно занимают положение сидя, к концу поездки могут спровоцировать повышение артериального давления, что в свою очередь скажется на ухудшении самочувствия и опосредованно на снижении уровня комфорта перевозок.

3. В вагонах высокоскоростных маршрутов, оборудованных только местами для сидения, развитие утомления зависит от длительности поездки. При этом достоверное снижение частоты пульса (ЧСС, уд./мин), увеличение общей вариабельности (SDNN, мс) и снижение симпатического тонуса (СИ, усл. ед.) наблюдается в длительных поездках более 3–4 ч. Такие функциональные изменения регуляции кардиогемодинамики могут сопровождаться ощущениями усталости, снижением общего тонуса, развитием утомления, но не являются критическими для ухудшения состояния здоровья.

4. Проведение анкетирования и физиологических измерений динамики колебаний кардиоритма на исследуемых участках маршрутов в сочетании с полученными техническими данными о характере движения подвижного состава подтверждают отсутствие критического дискомфорта пребывания пассажиров при поездках на пассажирских и высокоскоростных составах. Расчётные показатели среднего и постоянного уровня комфорта согласованы и не требуют коррекции значений соответствующих шкал.

Литература

(п.п. 5, 8 см. References)

1. Приказ Министерства путей сообщения № 41 «Нормы допускаемых скоростей движения подвижного состава по железнодорожным путям колеи 1520 (1524) мм федерального железнодорожного транспорта». М.: Транспорт; 2001.
2. Ничипорук И.А. Особенности психофизиологического статуса мужчин с разным уровнем вестибуловегетативной устойчивости и их взаимосвязь с этиопатогенезом болезни движения. *Физиология человека*. 2013; 39(5): 53–61. <https://doi.org/10.7868/S013116461305010X>
3. Баевский Р.М., Берсенева А.П., Берсенов Е.Ю., Ешманова А.К. Использование принципов донозологической диагностики для оценки функционального состояния организма при стрессорных воздействиях (на примере водителей автобусов). *Физиология человека*. 2009; 35(1): 41–51.
4. Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Чирейкин Л.В., Гаврилушкин А.П., Довгалецкий П.Я., Кукушкин Ю.А. и соавт. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем. *Вестник аритмологии*. 2001; (24): 65–87.
6. Приказ Минздрава России № 869н «Об утверждении порядка проведения диспансеризации определенных групп взрослого населения». М.; 2017.
7. Иваницкий А.М. *Мозговые механизмы оценки сигналов*. М.: Медицина; 1976.
9. Полевая С.А., Некрасова М.М., Рунова Е.В., Бахчина А.В., Горбунова Н.А., Брянцева Н.В. и соавт. Дискретный мониторинг и телеметрия сердечного ритма в процессе интенсивной работы на компьютере для оценки и профилактики утомления и стресса. *Медицинский альманах*. 2013; (2): 151–5.
10. Гапанович В.А., Ермаков В.М. О качестве железнодорожных пассажирских перевозок. *Стандарты и качество*. 2018; (11): 40–3.
11. Ермаков В.М., Дубинин В.И., Берсенов Е.Ю., Кирпичева А.И. О нормативах уровня комфорта пассажиров в поездах. *Путь и путевое хозяйство*. 2019; (3): 2–6.

References

1. Order of the Ministry of Railways № 41 «The norms of permissible rolling stock speeds on 1520 (1524) mm railway tracks of federal railway transport». Moscow: Transport; 2001. (in Russian)
2. Nichiporuk I.A. Features of the psychophysiological status of men with different levels of vestibular-autonomic resistance and their interrelation with etiology and pathogenesis of motion sickness. *Fiziologiya cheloveka*. 2013; 39(5): 496–503. <https://doi.org/10.7868/S013116461305010X> (in Russian)
3. Baevskiy R.M., Berseneva A.P., Bersenov E.Yu., Eshmanova A.K. Use of principles of prenosological diagnosis for assessing the functional state of the body under stress conditions as exemplified by bus drivers. *Fiziologiya cheloveka*. 2009; 35(1): 34–42. (in Russian)
4. Baevskiy R.M., Ivanov G.G., Chireykin L.V., Gavrilushkin A.P., Dovgalevskiy P.Ya., Kukushkin Yu.A., et al. Analysis of heart rate variability using different electrocardiographic systems. *Vestnik aritmologii*. 2001; (24): 65–87. (in Russian)
5. Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology the North American Society of Pacing Electrophysiology. *Circulation*. 1996; 93(5): 1043–65.
6. Order of the Ministry of Health of Russia № 869n «On approval of the procedure for conducting clinical examination of certain groups of the adult population». Moscow; 2017. (in Russian)
7. Ivanitskiy A.M. *Brain Mechanisms of Signal Evaluation [Mozgovye mekhanizmy otsenki signalov]*. Moscow: Meditsina; 1976. (in Russian)
8. Yates B.J., Miller A.D. Physiological evidence that the vestibular system participates in autonomic and respiratory control. *J. Vestib. Res.* 1998; 8(1): 17–25.
9. Polevaya S.A., Nekrasova M.M., Runova E.V., Bakhchina A.V., Gorbunova N.A., Bryantseva N.V., et al. Discrete monitoring and telemetry of heart beat during intensive work on the computer for the assessment and prophylaxis of fatigue and stress. *Meditsinskiy al'manakh*. 2013; (2): 151–5. (in Russian)
10. Gapanovich V.A., Ermakov V.M. About the quality of rail passenger traffic. *Standarty i kachestvo*. 2018; (11): 40–3. (in Russian)
11. Ermakov V.M., Dubinin V.I., Bersenov E.Yu., Kirpicheva A.I. About standards of comfort level of passengers in trains. *Put' i putevoe khozyaystvo*. 2019; (3): 2–6. (in Russian)