

УДК 331.451

## Исследование смягчения вибраций и переизлученного шума в зданиях, создаваемых при движении железнодорожного транспорта

А. Б. Завьялов, О. И. Копытенкова, А. М. Евстафьев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Завьялов А. Б., Копытенкова О. И., Евстафьев А. М. Исследование смягчения вибраций и переизлученного шума в зданиях, создаваемых при движении железнодорожного транспорта // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 2. — С. 433–440. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-433-440

### Аннотация

**Цель:** Представить интегрированную методологию, которая позволит смоделировать всю среду, от источника вибрации до переизлученного шума внутри зданий. Провести краткий параметрический анализ для того, чтобы показать возможности данного подхода при оценке эффективности мер по смягчению последствий от вибрации и переизлученным шумом. **Методы:** Оценка уровня звукового давления, создаваемого в жилых отсеках в результате прохождения поезда; анализ связанной системы «поезд — путь — земля — конструкция»; решение акустической части задачи. **Результаты:** Рассмотрена численная модель, основанная на подходе субструктурирования. Изучена мера по снижению уровня вибрации и переизлученного шума внутри здания, заключаемая в непрерывной системе «плавающая плита — путь», для которой были рассмотрены различные значения жесткости упругого мата под плитой. Установлено, что эффективность данной меры происходит от положительной комбинации двух существенных факторов: частотного содержания отклика и частоты среза, назначенной для каждого принятого решения. **Практическая значимость:** Представлена комплексная методика определения вибрации грунта и переизлученного шума, вызванного железнодорожным движением. Получена зависимость, что эффективность снижения уровня вибрации и переизлученного шума внутри здания будет выше, если применяется решение с малой частотой среза и отклик имеет наиболее значительное частотное содержание на высоких частотах.

**Ключевые слова:** Вибрация, переизлученный шум, акустическая модель, защита от переизлученного шума и вибрации, жесткость упругого мата под плитой.

В связи с ростом интенсивности железнодорожных перевозок отмечается увеличение шумового загрязнения окружающей среды в городах с линейными объектами железнодорожного транспорта и железнодорожными узлами. Кроме того, транспортный шум, проникающий в жилые и общественные здания, сопровождается вибрацией [1], возникающей из различных источников, вследствие чего появляются многочисленные жалобы недовольных жителей зданий, располо-

женных рядом с железнодорожной инфраструктурой [2]. Вибрация, в свою очередь, может создавать переизлучение шума. Это приводит к тому, что население, проживающее на территории, расположенной вдоль железнодорожных путей, находится в состоянии шумового дискомфорта [3]. В попытке лучше понять и внести свой вклад в решение этой проблемы существует потребность в эффективных и комплексных численных инструментах для прогнозирования

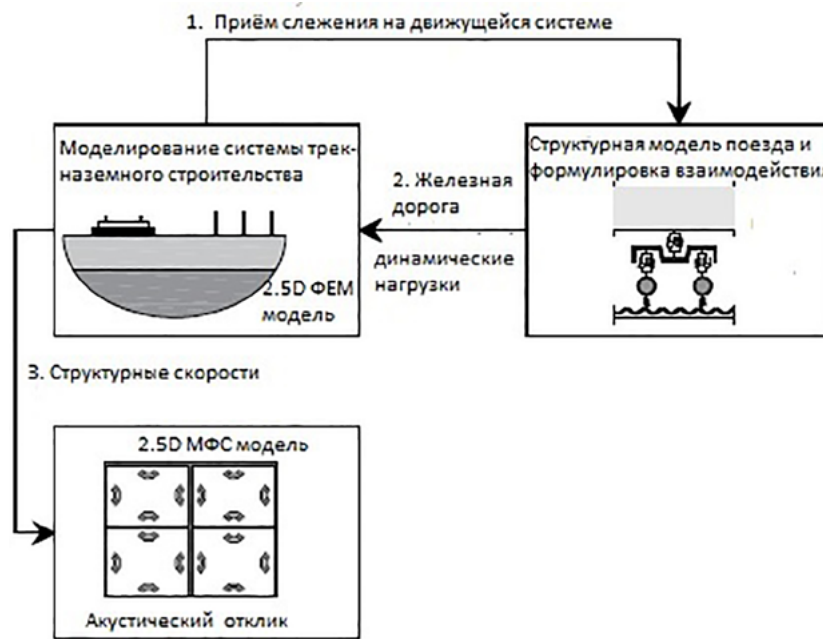


Рис. 1. Репрезентативная схема подхода численного моделирования

и смягчения негативных эффектов, вызванных железнодорожным движением, которые могут раздражать жителей вблизи железнодорожных инфраструктур. В данной статье представлена интегрированная методология, которая позволяет моделировать всю среду, от источника вибрации (взаимодействие транспортного средства с гусеницами) до переизлученного шума внутри зданий. Акустическая модель для оценки переизлученного шума внутри здания основана на методе фундаментальных решений (МФР). Кроме этого, проводится краткий параметрический анализ для того, чтобы показать возможности данного подхода при анализе эффективности мер по смягчению последствий, таких как, например, системы «плавающее перекрытие — путь» [4].

Для конкретного случая железнодорожной линии, разработанной в траншейном сечении, раздражение жителей воспринимается с точки зрения вибраций и переизлученного шума, поскольку прямой шум не достигает зданий или, по крайней мере, значительно ослабляется при установке шумозащитных барьеров [5]. Большая сложность проблемы в динамическом взаимо-

действии между различными предметами, имеющими различное поведение, а именно: взаимодействие между транспортным средством и трассой; взаимодействие между трассой и грунтом; взаимодействие между структурой и акустической системой, взаимодействие между транспортным средством и гусеницами; взаимодействие между гусеницами и грунтом; взаимодействие между гусеницами и акустической средой.

Решаемая задача состоит из смешанной эластодинамико-акустической задачи, где конечной целью является оценка уровня звукового давления, создаваемого в жилых отсеках в результате прохождения поезда [6]. Для этого случая сначала анализируется связанная система поезд — путь — земля — конструкция (эластодинамическая), а затем проводится решение акустической части задачи. На рис. 1 показаны основные части численной модели и их взаимодействие.

Как видно, численная модель, рассматриваемая для анализа, является модульной, основанной на подходе субструктурирования. Особое внимание будет уделено последней подобласти, где описывается акустическая субмодель.

Свойства различных предполагаемых матов

Вид мата	Жесткость на метр в продольном направлении $k$ (Н/м <sup>2</sup> )	Вязкое демпфирование на метр в продольном направлении $c$ (Н <sub>с</sub> /м <sup>2</sup> )	Частота отклика (Гц)	Частота среза (Гц)
Мягкий мат	$0,040 \cdot 10^9$	$5,5 \cdot 10^4$	18,7	26,4
Промежуточный мат	$0,153 \cdot 10^9$	$5,5 \cdot 10^4$	26,4	37,3
Жесткий мат	$0,283 \cdot 10^9$	$5,5 \cdot 10^4$	37,3	52,8

Что касается стратегии моделирования взаимодействия поезда с рельсами, рассматриваются два компонента нагрузки [7]:

1) статическая нагрузка, возникающая в результате перемещения мертвых грузов, соответствующих весу поезда;

2) динамическая нагрузка, обусловленная динамическим взаимодействием между поездом и рельсами.

На основе этой 2,5D МФС модели можно считать динамический отклик структуры вдоль границы раздела «структура — акустическая среда». Этот динамический отклик будет использоваться в качестве входных данных для акустической модели, т. е. принята формулировка без связи, предполагающая, что акустический отклик не влияет на упругий динамический отклик здания. Результаты, рассчитанные в терминах скоростей структурных колебаний вдоль границы раздела конструкций, которая ограничивает акустическое пространство, затем накладываются в качестве граничных условий для оценки уровней звукового давления, генерируемых внутри закрытого пространства (акустического отсека).

Выбранный пример соответствует железнодорожной линии с продольным развитием вдоль поперечного сечения траншеи, расположенной в урбанизированной среде. Вблизи железнодорожной линии предполагается наличие зданий с обеих сторон, что позволяет моделировать только половину поперечного сечения системы «путь — грунт — конструкция» из-за симметричного состояния задачи. Следует отметить, что это предположение подразумевает учет одина-

кового профиля неровностей для обоих рельсов, поскольку такое упрощение может повлиять на прогнозирование вибрации от грунта. Что касается железнодорожного пути, то предполагается непрерывная система «плавающая плита — путь» с различными значениями для матов под плитой-путем. Такие системы плавающих перекрытий обычно применяются для борьбы с явлениями чрезмерной вибрации и переизлученного шума внутри зданий. Переизлучение шума происходит тогда, когда зачастую неощутимая вибрация возбуждает колебания панелей здания, и некоторая часть колебательной энергии излучается в виде слышимого шума, обычно внутрь помещений [8]. Эффективность такого рода мер смягчения связана с введением новой резонансной частоты системы, т. е. с изменением динамического поведения железнодорожного пути, как показано ниже в таблице.

Независимо от принятого мата, предполагается непрерывная бетонная плита толщиной 0,3 м и шириной 2,5 м с продольной жесткостью на изгиб  $1,62 \times 10^8$  Н/м<sup>2</sup> и массой 2800 кг на единицу длины.

Для того чтобы оценить эффект от внедрения упругого мата под плитой пути, на рис. 2 представлено сравнение вертикальной скорости, наблюдаемой в точке  $S_1$  (расположенной на 1-м этаже здания), между неизолированным и изолированным железнодорожным путем (с различными упругими матами).

Введение упругого мата под плитой пути приводит к появлению новой резонансной частоты системы, что означает усиление отклика для

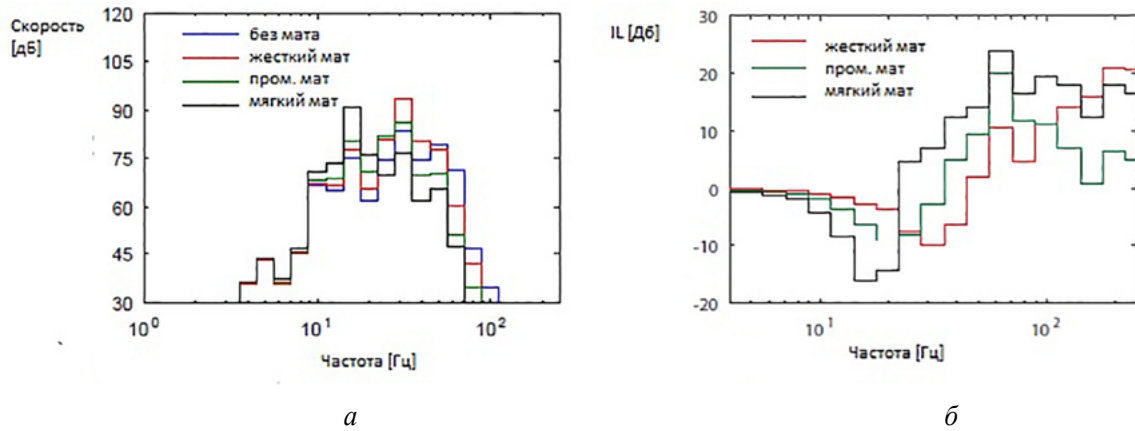


Рис. 2. Частотное содержание вертикальной скорости в точке  $S_1$ :  
 а — третьоктавные полосы; б — кривые потерь на входе (дБ)

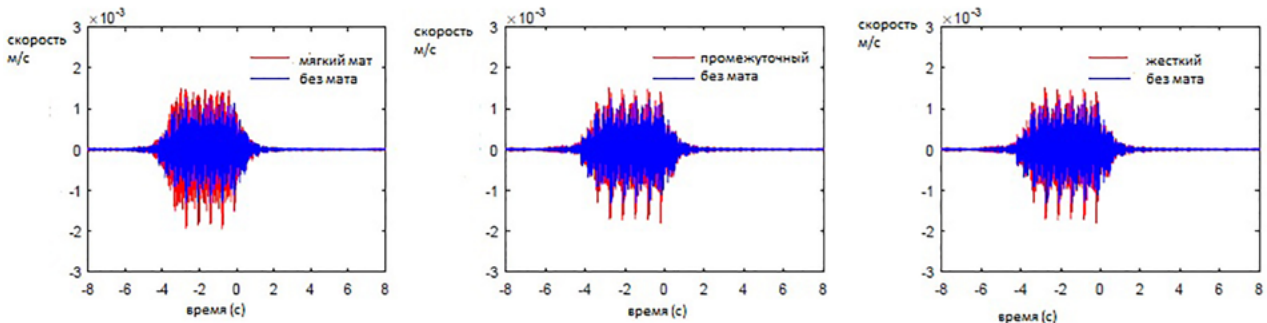


Рис. 3. Вертикальная скорость в точке  $S_1$  для различных решений железнодорожного пути.

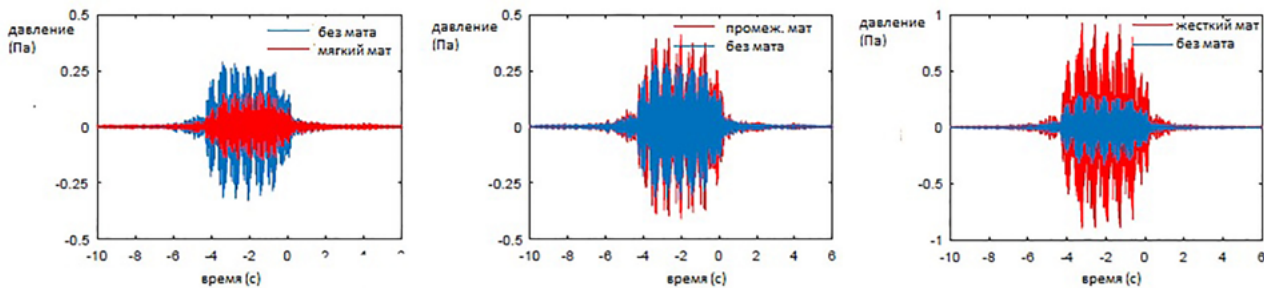


Рис. 4. Временная история акустического давления для точки  $A_1$  во внутреннем пространстве, для различных упругих матов

частот вокруг резонансной частоты плиты пути и затухание энергии, передаваемой от пути к земле в диапазоне частот выше частоты среза [9]. Как можно видеть, польза от этих мер смягчения заметна только для частот больше, чем частота среза. Этот эффект сопровождается повышением уровня вибрации в диапазоне частот около частоты среза, что в большей степени относится к мату под плитой пути. Из временной записи (рис. 3) видно, что частоты, на которых усиливается

динамический отклик, имеют соответствующий вклад в отклик, поскольку присутствие мата приводит к большим пиковым значениям вертикальной скорости плиты.

С точки зрения акустического отклика внутри здания [10] наблюдается большой контраст в зависимости от мата, принятого для железнодорожного пути. Анализируя результаты, полученные для точки  $A_1$  (рис. 4, 5), можно сказать, что только более мягкое решение мата имеет явное

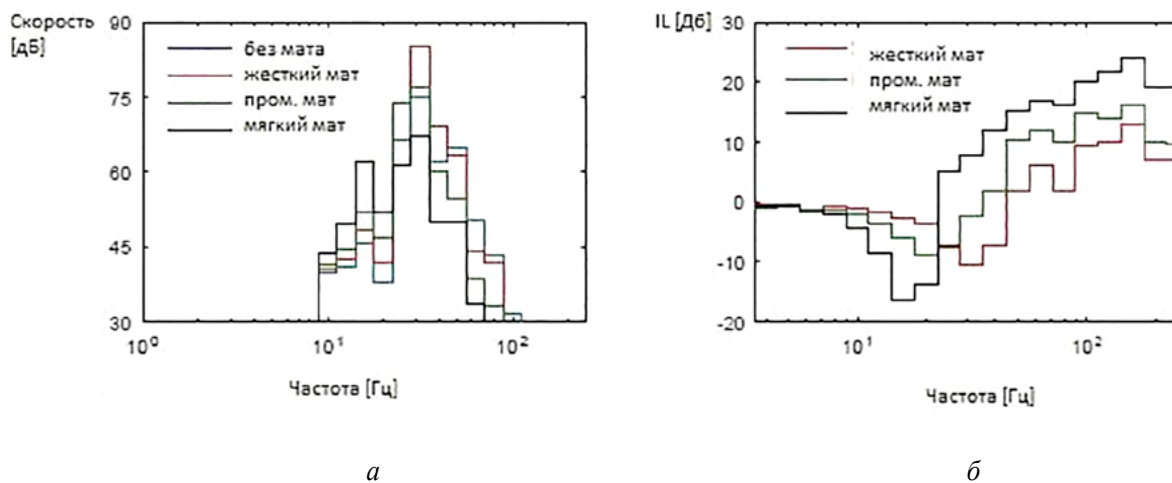


Рис. 5. Частотное содержание акустического отклика в точке  $A_1$ :  
 а — третьоктавные полосы; б — кривые вносимых потерь (дБ)

преимущество в снижении уровня переизлученного шума, что также видно из представленной временной записи. Этот результат в основном связан с частотным содержанием вычисленного акустического поля, где максимальные значения уровней звукового давления смещены вправо по сравнению с частотным содержанием структурного отклика, как видно на рис. 6. Это условие в сочетании с более мягкой частотой среза мата (более низкая собственная частота и, следовательно, более низкая частота среза) приводит к эффективному снижению отклика.

В отличие от этого, другие системы «плавающая плита — путь» имеют поведение, аналогичное тому, которое наблюдается в структурном анализе. Таким образом, в отличие от решения дорожки с упругим матом, где явное преимущество возникает благодаря положительному сопряжению между доминирующим частотным содержанием отклика и собственной частотой, введенной решением дорожки, для более жесткого решения (и промежуточного) собственная частота близка к диапазону частот с более высоким частотным содержанием, оправдывая наблюдаемое усиление. С другой стороны, когда начинается снижение уровня звукового давления за счет применения упругого мата, содержание

частот уже низкое, поэтому указанное решение не является очень эффективным.

В данной статье была представлена комплексная методика определения вибрации грунта и переизлученного шума, вызванного железнодорожным движением. Для этой задачи была рассмотрена численная модель, основанная на подходе субструктурирования. На основе рассчитанной динамической реакции конструкции была использована 2,5D модель МФС для оценки акустической реакции внутри отсеков здания. Кроме того, была изучена мера по снижению уровня вибрации и переизлученного шума внутри здания. Эта мера заключается в непрерывной системе «плавающая плита — путь», для которой были рассмотрены различные значения жесткости упругого мата под плитой. В целом эффективность данной меры происходит от положительной комбинации двух существенных факторов: частотного содержания отклика и частоты среза, назначенной для каждого принятого решения. Таким образом, эффективность будет выше, если применяется решение с малой частотой среза и отклик имеет наиболее значительное частотное содержание на высоких частотах. Этот вывод справедлив как для структурных, так и для акустических откликов.

## Библиографический список

1. Леванчук А. В. Гигиеническое обоснование методов снижения акустической нагрузки в жилых помещениях / А. В. Леванчук, О. И. Копытенкова, Т. А. Афанасьева // *Здоровье населения и среда обитания*. — 2020. — № 10(331). — С. 46–51.

2. Рябец В. В. Создание комфортной городской среды за счет обеспечения техносферной безопасности транспортных систем / В. В. Рябец // *Техносферная и экологическая безопасность на транспорте: материалы VIII Международной научно-практической конференции*. — СПб., 2022. — С. 114–117.

3. Рябец В. В. Особенности оценки комфортности среды городских поселений с учетом виброакустического воздействия в зоне влияния транспортных железнодорожных узлов / В. В. Рябец, А. В. Леванчук // *Вестник Евразийской науки*. — 2021. — Т. 13. — № 6.

4. Фиала П. Прогнозирование внутреннего шума в зданиях, создаваемого подземным железнодорожным движением / П. Фиала, Г. Дегранде // *Журнал звука и вибрации*. — № 293. — С. 680–690.

5. Канонин Ю. Н. Травматизм на объектах железнодорожного транспорта / Ю. Н. Канонин // *Охрана труда и техносферная безопасность на объектах промышленности, транспорта и социальных инфраструктур: сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции*. — Пермь, 2023. — С. 226–229.

6. Терловая Н. В. Технологические решения по минимизации шума и вибрации на железнодорожном транспорте / Н. В. Терловая, А. А. Ступак // *Проблемы и пер-*

*спективы формирования инфраструктуры экономики знаний: сборник статей*. — М., 2018. — С. 177–181.

7. Иванов Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник / Н. И. Иванов. — М., 2016.

8. Рябец В. В. Перспективный метод снижения виброакустической нагрузки вдоль линейных объектов железнодорожного транспорта / В. В. Рябец, М. С. Овчаренко // *Сборник трудов III Бетанкуровского международного форума*. — 2021. — Т. 2. — С. 125–127.

9. Панова А. А. Влияние железнодорожного транспорта на здоровье человека / А. А. Панова, А. Ю. Ермачкова, И. Г. Захарова // *Молодежная наука: вызовы и перспективы: материалы III Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых*. — Самара, 2020. — С. 341–343.

10. Акулова Е. А. Технология защиты зданий от вибрации / Е. А. Акулова // *Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых: сборник научных статей II Всероссийской конференции перспективных разработок*. — М., 2021. — Т. 5. — С. 192–194.

Дата поступления: 28.04.2023

Решение о публикации: 15.05.2023

### Контактная информация:

ЗАВЬЯЛОВ Алексей Борисович — аспирант, ассистент; zenitpiter91@inbox.ru

КОПЫТЕНКОВА Ольга Ивановна — д-р мед. наук, проф.; 5726164@mail.ru

ЕВСТАФЬЕВ Андрей Михайлович — д-р техн. наук, проф.; evstafev@pgups.ru

## Study of Mitigation of Vibrations and Re-Radiated Noise in Buildings Created by Railway Traffic

A. B. Zavyalov, O. I. Kopytenkova, A. M. Evstafiev

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Zavyalov A. B., Kopytenkova O. I., Evstafiev A. M. Study of Mitigation of Vibrations and Re-Radiated Noise in Buildings Created by Railway Traffic // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 2, pp. 433–440. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-2-433-440

## Summary

**Purpose:** To present an integrated methodology that will model the entire environment, from the source of vibration to the re-radiated noise within buildings. Conduct a brief parametric analysis to show the potential of this approach in evaluating the effectiveness of mitigation measures for vibration and re-radiated noise.

**Methods:** Estimate sound pressure levels generated in residential compartments as a result of train travel; analyze the coupled train-trail-ground-construction system; solve the acoustic part of the problem. **Results:** A numerical model based on the substructuring approach is considered. A measure to reduce the level of vibration and re-radiated noise inside the building has been studied, which consists in a continuous “floating slab-track” system, for which different values of the elastic mat stiffness under the slab have been considered. It has been found that the effectiveness of this measure comes from a positive combination of two essential factors: the frequency content of the response and the cutoff frequency assigned to each solution adopted.

**Practical significance:** A comprehensive methodology for determining ground vibration and re-radiated noise caused by railway traffic is presented. The dependence is obtained, that the efficiency of reduction of vibration level and re-radiated noise inside the building, will be higher, if the solution with low cutoff frequency is applied and the response has the most significant frequency content at high frequencies.

**Keywords:** Vibration, re-radiated noise, acoustic model, protection against re-radiated noise and vibration, stiffness of the elastic mat under the slab.

## References

1. Levanchuk A. V., Kopytenkova O. I., Afanasyeva T. A. Gигиеническое обоснование методов снижения акустической нагрузки в жилых помещениях [Hygienic justification of methods to reduce the acoustic load in residential areas]. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya* [Population health and the environment]. 2020, Iss. 10(331), pp. 46–51. (In Russian)
2. Ryabets V. V. *Sozdanie komfortnoy gorodskoy sredy za schet obespecheniya tekhnosfernoy bezopasnosti transportnykh system. Tekhnosfernaya i ekologicheskaya bezopasnost na transporte: materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Creation of a comfortable urban environment by ensuring the technospheric safety of transport systems. Technospheric and environmental safety in transport: materials of the VIII International scientific and practical conference]. St. Petersburg, 2022. pp. 114–117. (In Russian)
3. Ryabets V. V., Levanchuk A. V. Osobennosti ocenki komfortnosti sredi gorodskikh poseleniy s uchetom vibroakusticheskogo vozdeystviya v zone vliyaniya transportnykh zheleznodorozhnykh uzlov [Peculiarities of assessing the comfort of the environment of urban settlements, taking into account the vibroacoustic impact in the zone of influence of transport railway hubs]. *Vestnik Evraziyskoy nauki* [Bulletin of Eurasian Science]. 2021, vol. 13, Iss. 6. (In Russian)
4. Fiala P., Degrande G. Prognozirovanie vnutrennego shuma v zdaniyakh, sozdavaemogo podzemnym zheleznodorozhnym dvizheniem [Prediction of internal noise in buildings caused by underground railway traffic]. *Zhurnal zvuka i vibratsii* [Journal of Sound and Vibration]. Iss. 293, pp. 680–690. (In Russian)
5. Kanonin Yu. N. *Travmatizm na obektakh zheleznodorozhnogo transporta. Okhrana truda i tekhnosfernaya bezopasnost na obektakh promyshlennosti, transporta i sotsialnykh infrastruktur: sbornik statey II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Injuries at railway transport facilities. Labor protection and technospheric safety at industrial, transport and social infrastructure facilities: collection of articles of the II All-Russian Scientific and Practical Conference]. Perm, 2023. pp. 226–229. (In Russian)
6. Terlovaya N. V., Stupak A. A. *Tekhnologicheskie resheniya po minimizatsii shuma i vibratsii na zheleznodorozhnom transporte. Problemy i perspektivy formirovaniya infrastruktury ekonomiki znaniy* [Technological solutions to minimize noise and vibration in railway transport. Problems and prospects for the formation of the infrastructure of the knowledge economy]. Moscow, 2018, pp. 177–181. (In Russian)

7. Ivanov N. I. *Inzhenernaya akustika. Teoriya i praktika borby s shumom: uchebnyk* [Engineering acoustics. Theory and practice of noise control: textbook]. Moscow, 2016. (In Russian)

8. Ryabets V. V., Ovcharenko M. S. *Perspektivnyy metod snizheniya vibroakusticheskoy nagruzki vdol' ob'ektov zheleznodorozhnogo transporta. Sbornik trudov III Betankurovskogo mezhdunarodnogo foruma* [Promising method to reduce vibroacoustic load along linear objects of railway transport. Proceedings of the III Betancourt International Forum]. 2021, vol. 2, pp. 125–127. (In Russian)

9. Panova A. A., Ermachkova A. Yu., Zakharova I. G. *Vliyaniye zheleznodorozhnogo transporta na zdorov'e cheloveka. Molodezhnaya nauka: vyzovy i perspektivy: materialy III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh* [The influence of railway transport on human health. Youth science: challenges and prospects: materials of the III All-Russian scientific and practical conference of students and young people scientists]. Samara, 2020. pp. 341–343. (In Russian)

10. Akulova E. A. *Tekhnologiya zashchity zdaniy ot vibratsii. Innovatsionnyy potentsial razvitiya obshchestva: vzglyad molodykh uchenykh: sbornik nauchnykh statey II Vserossiyskoy konferentsii perspektivnykh razrabotok* [Technology for protecting buildings from vibration. Innovative potential for the development of society: the view of young scientists: a collection of scientific articles of the II All-Russian Conference of Advanced Developments]. Moscow, 2021, vol. 5, pp. 92–194. (In Russian)

Received: April 28, 2023

Accepted: May 15, 2023

**Author's information:**

Alexey B. ZAVYALOV — Postgraduate Student,  
Assistant; zenitpiter91@inbox.ru

Olga I. Kopytenkova – Dr. Sci. in Medicine, Professor;  
5726164@mail.ru

Andrey M. EVSTAFIEV — Dr. Sci. in Engineering,  
Professor; evstafev@pgups.ru