

УДК 331.451

Прогнозирование переизлученного шума и вибрации, создаваемых вблизи железнодорожных линий

А. Б. Завьялов

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

Для цитирования: Завьялов А. Б. Прогнозирование переизлученного шума и вибрации, создаваемых вблизи железнодорожных линий // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 820–827. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-820-827

Аннотация

Цель: Проанализировать модель ScopeRail, способную прогнозировать переизлученный шум и вибрации в конструкциях, расположенных в непосредственной близости от железнодорожных линий. Полученные результаты сравнить с альтернативной, широко используемой моделью для определения точности и потенциального снижения стоимости оценки воздействия вибраций на территорию жилой застройки для новых железнодорожных линий. **Методы:** Произвести статистический разбор полученных данных для моделирования вибрации разных типов грунта. Рассчитать полученные с помощью моделирования результаты для создания базы данных вибрационных характеристик при различных состояниях грунта, скорости движения поездов и расстояния от пути. **Результаты:** Проанализированы полученные результаты, сравнены с альтернативной, широко используемой моделью определения точности. Установлено, что модель ScopeRail дает более высокую точность прогнозирования, что может потенциально снизить стоимость оценки воздействия вибраций на территорию жилой застройки для новых железнодорожных линий. Получена модель, которая может мгновенно предсказать уровни вибрации и переизлученного шума для разных типов грунта при отличной скорости проходящих поездов. **Практическая значимость:** Разработано моделирование переизлученной вибрации и шума для помещений зданий, располагающихся непосредственно вблизи железнодорожного полотна, с помощью набора некоторых факторов, полученных опытным путем. Также смоделировано воздействие вибрации и шума при использовании дополнительных мер по снижению виброакустических факторов (плит и балластных матов), а также параметров возбуждения вибрации (стрелки, переезды и колесоотбойники).

Ключевые слова: Вибрация, переизлученный шум, глубина почвы, скорость волны, точность, грунт.

Быстрое развитие инфраструктуры высокоскоростных железных дорог за последние десятилетия привело к увеличению количества объектов и сооружений, расположенных в непосредственной близости от скоростных железнодорожных линий [1, 2]. Скоростные магистрали могут потенциально генерировать повышенные уровни переизлученного шума и вибрации как в путевом хозяйстве, так и на территории жилой застройки, где негативно влияют на техносферную среду,

вызывая сотрясение стен и полов в домах из-за возбуждения шума внутри здания [2]. Данное явление вызывает, во-первых, дискомфорт находящихся в помещении людей, а также становится причиной снижения порога чувствительности к вибрации социально-значимых объектов, например школ, больниц, промышленных зданий [3].

В следствие этого перед закладкой нового железнодорожного пути необходимо провести исследования по оценке вибрации и выявлению

тех субъектов и объектов, на которые будут влиять виброакустические факторы, вызванные постоянным движением поездов. В настоящее время уровни вибрации, которые будут негативно влиять на селитебную территорию, рассчитываются уже на стадии проектирования [4, 5], ускоряя процесс определения потенциальных «жертв». За последнее время в разных странах было проведено множество исследований по определению переизлученной вибрации от проходящих поездов. В качестве альтернативы была предложена модель, учитывающая вклад каждой шпалы в поле вибрации и использующая функции Грина для моделирования распространения грунтовой волны.

Проблема численных моделей в частотной и временной областях заключается в том, что время их вычислений для первоначальной оценки масштаба велико. В следствие того, что участки железнодорожного пути требуют подробного анализа, необходимо, чтобы прогнозы получались с небольшими вычислительными затратами. Для этого был предложен простой математический инструмент быстрого прогнозирования абсолютных уровней виброскорости грунта в децибелах и среднеквадратичных значениях [6]. Смоделированные результаты сравнили с полевыми и обнаружили, что точность моделирования сравнима с более требовательными численными подходами.

В данной статье описана модель ScopeRail, основанная на эмпирических данных, для облегчения прогнозирования вибрации и переизлученного шума при переменных формах пути и в разных типах зданий. Также ScopeRail сравнивается с производительностью оригинального подхода прогнозирования.

Целью моделирования является прогнозирование уровней вибрации на больших участках пути для определения ключевых участков, которые могут быть подвержены данному фактору, с

последующим более глубоким анализом. В случае моделирования вибрации на значительной по площади территории обычно жертвуют точностью прогнозирования для понижения требований по вычислению [7], иными словами, полученные при моделировании результаты уровней вибрации могут оказаться выше фактических, и тогда подробный анализ будет проводиться в том месте, где не будет актуальной данная проблема. Подробный анализ вибрации и переизлученного шума на железной дороге требует больших затрат, что приводит к удорожанию проекта.

Подход к моделированию, используемый в работе ScopeRail, состоит из двух отдельных частей. Во-первых, была разработана модель, способная предсказывать скоростные железнодорожные наземные временные вибрации. Затем эта модель многократно рассчитывалась для создания базы данных временных историй скоростей при различных состояниях грунта, скорости движения поездов и расстояния от пути. Во-вторых, был осуществлен статистический разбор полученных с помощью программы данных для моделирования вибрации разных типов грунта [8].

В следствие того, что модель симметричная, все ее компоненты были смоделированы наполовину — почва была смоделирована с помощью линейно-упругих, трехмерных кирпичных элементов с размерами 0,3 м в каждом направлении; верхняя граница почвы была местом расположения свободной поверхности, а горизонтальное смещение было ограничено в направлении перпендикулярно дорожке, учитывая симметрию почвы. Также были проанализированы типы поездов, технические характеристики путей и виды почв, которые влияли на результирующие уровни вибрации грунта, определены наиболее влияющие факторы, создающие переизлученную вибрацию от проходящих составов. Те параметры, которые меньше всего влияют на этот фактор и имеют большие стандартные погрешно-

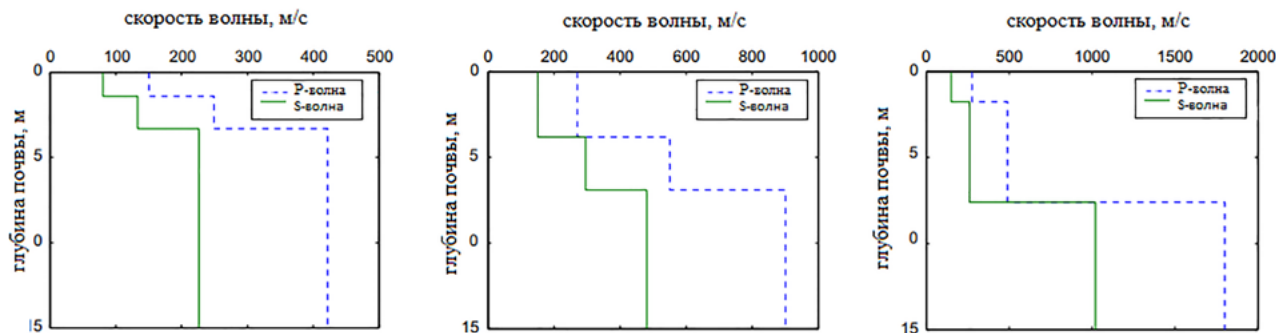


Рис. 1. Профили поверхностных волн сжатия и сдвига (ИВ2021, МоС 2022, НМ1 2022)

сти (дефекты рельсов и колесных пар), не учитывались при разработке модели [9].

Одним из наиболее важных параметров, влияющих на распространение вибрации грунта, являются характеристики грунта. Для включения свойств грунта в модель оценки были использованы два альтернативных подхода. Первый подход заключался в рассмотрении грунта как однородного полупространства (т. е. один слой), а второй — в рассмотрении почвы как двухслойной среды. Следует отметить, что для целей обзорной модели желательно ограниченное число входных параметров, потому что трудно получить подробную информацию о почве для труднодоступных географических районов [10].

Для проверки способности модели предсказывать уровни вибрации и переизлученного шума для различных испытательных площадок были проведены исследования с использованием трех наборов экспериментальных результатов. Первый набор результатов был зарегистрирован в 2021 году (ИВ 2021). Во время испытаний уровни вибрации отбирались с помощью акселерометров, а затем преобразовывались в скоростные временные истории.

В 2022 году также были проведены эксперименты для сбора результатов для дополнительных сравнений. Во-первых, вибрации были зарегистрированы на линии Санкт-Петербург — Москва (МоС 2022), во-вторых, на высокоскоростной линии Москва — Нижний Новгород

(НМ1 2022). Для каждого испытания использовалось идентичное оборудование, однако для МоС 2022 вибрации измерялись на расстоянии до 100 метров от пути, а для НМ1 2022 — до 35 метров. Во всех экспериментах проводился многоканальный анализ профилей волн, чтобы определить свойства грунта (рис. 1).

Обработывая полученные результаты, скорость проходящих поездов определяли с помощью комбинации спектрального и регрессионного анализа при обработке полученных результатов для того, чтобы сравнить эмпирический частотный спектр с теоретическим. Сначала модель была протестирована с использованием однородной почвы на каждом испытательном участке, а потом сравнили производительность модели с моделью, не учитывающей свойства почвы.

Однородная модель показала хорошие результаты и смогла предсказать значения с высокой точностью для каждого тестового участка (рис. 2).

Для испытаний МоС 2022 моделирование ScoreRail близко соответствовало экспериментальным результатам. Схожие результаты наблюдаются и в ИВ 2021, однако имеется превышение прогнозируемых уровней вибрации в приемниках при расстоянии от пути более 10 метров. В испытаниях НМ1 ScoreRail прогнозирует завышенный уровень вибрации при расстоянии меньше 25 метров от пути, а если расстояние больше — то прогноз становится пониженным. Сравнивая полученные модели, можно заметить примерно

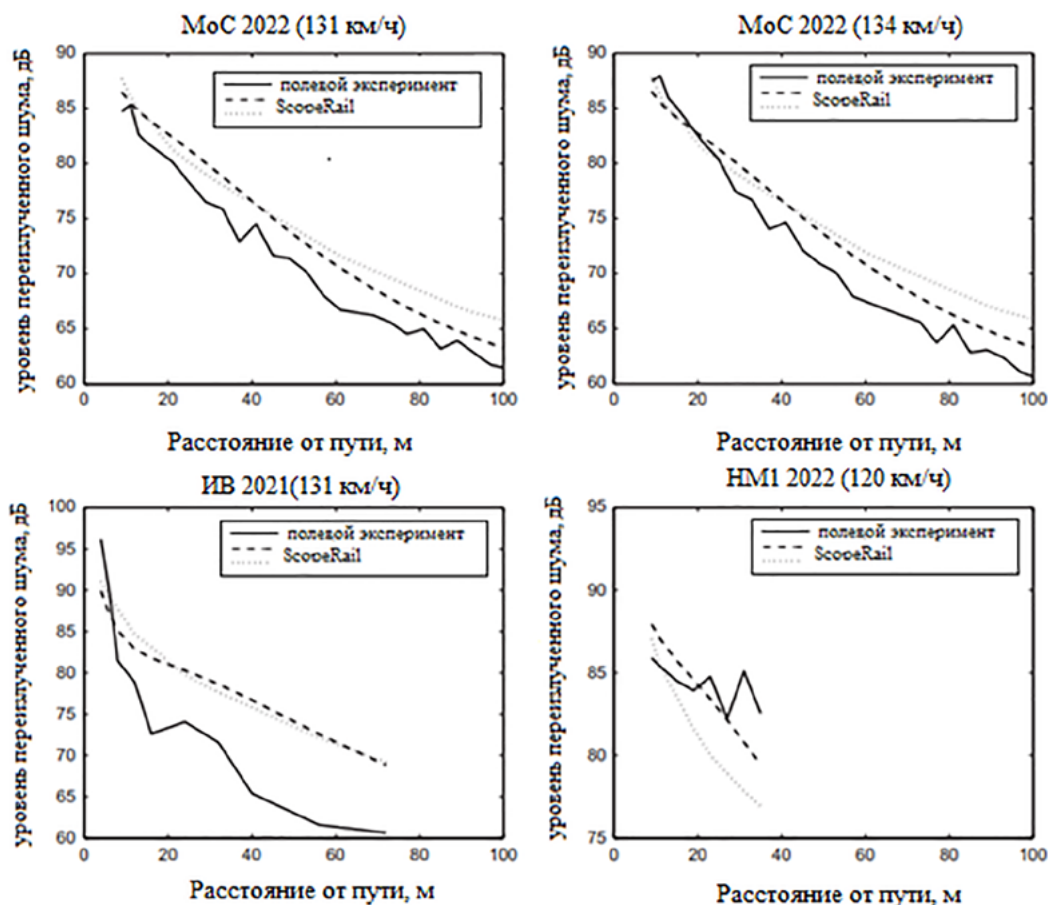


Рис. 2. Производительность однослойной модели при измерениях MoC 2022 (131 км/ч), MoC 2022 (134 км/ч), ИВ 2021, НМ1 2022

схожую производительность, однако обе модели завышают уровни вибрации для большинства мест расположения приемников. Для MoC 2022 ScoreRail предлагает незначительно улучшенную производительность при больших смещениях (2–3 дБ), а для НМ1 2022 — лучшую точность

Двухслойная модель ScoreRail также была протестирована в сравнении с экспериментальными данными. На рис. 3 показано, что снова обе модели завышают прогнозируемые уровни вибрации. Несмотря на это, модель ScoreRail показала более высокую точность по сравнению с моделью, в которой использовался однородный профиль грунта.

Для результатов ИВ 2021 было получено значительное улучшение точности уровней вибрации и переизлученного шума (до 9–10 дБ). Для

результатов MoC 2022 г. точность также была улучшена, однако производительность обеих моделей была низкой на участке НМ1 2022. Установлено, что ScoreRail обеспечивает высокую эффективность прогнозирования вибрации, особенно при использовании двухслойной модели грунта. Точность прогнозирования была самой высокой для MoC 2022 и ИВ 2021, поскольку изменение уровня вибрации в зависимости от расстояния было относительно равномерным, что сделало эти участки более простыми для прогнозирования. Для численной модели было сложно предсказать различные аномалии, однако модель смогла получить и результаты, которые хорошо соответствовали линии наилучшего соответствия.

В заключение стоит отметить, что было проведено тестирование модели ScoreRail, пред-

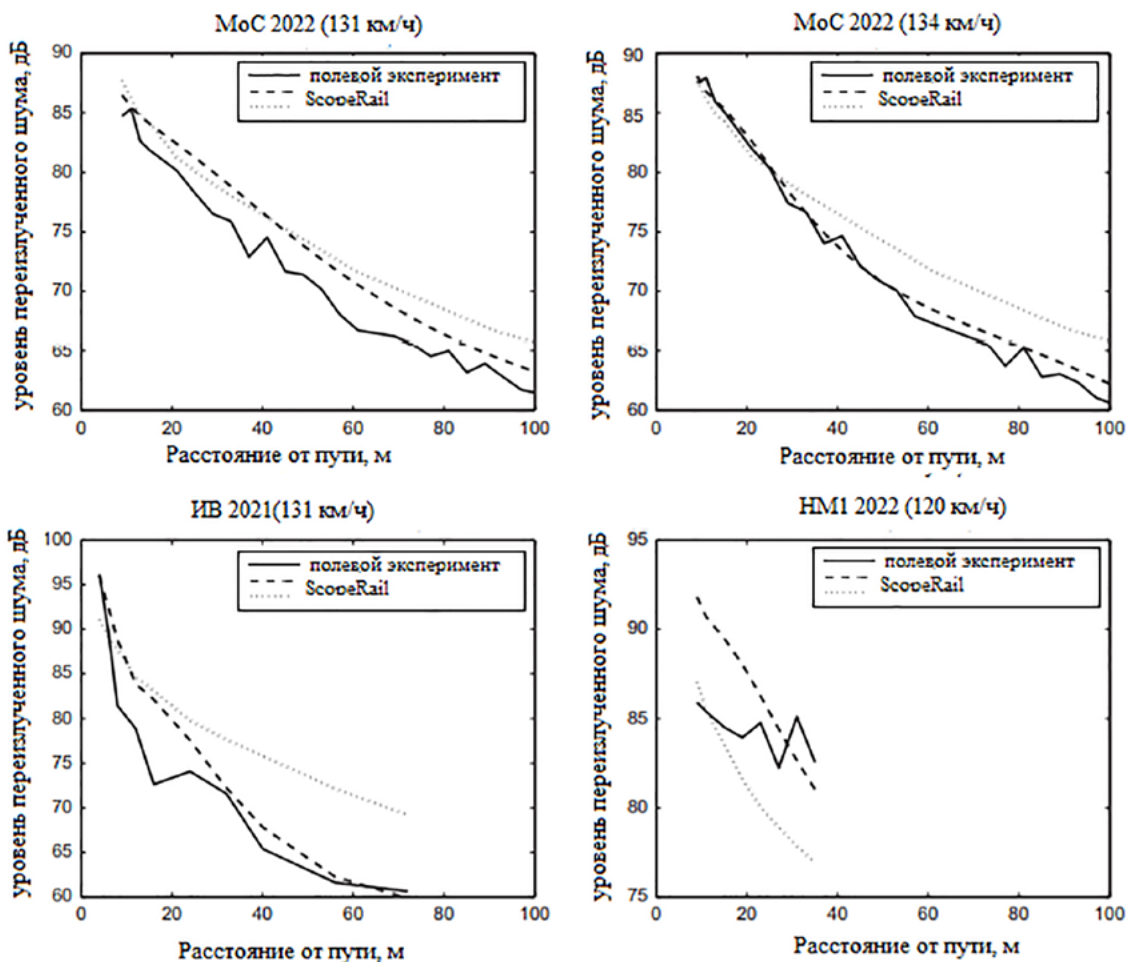


Рис. 3. Производительность двухслойной модели MoC 2022 (131 км/ч), MoC 2022(134 км/ч), ИВ2021, НМ1 2022

назначенной для оценки уровней переизлученного шума и вибрации на территории жилой застройки, вызванных прохождением скоростных поездов. Даны характеристики численной модели ScoreRail, являющейся трехмерной, которая позволяет симитировать возникновение и распространение волн переизлученной вибрации и шума от проходящих поездов. Моделирование проводилось много раз с разным набором комбинаций начальных входных параметров для получения базы данных с полученными результатами. Также проведен анализ этих результатов с целью выявить конкретные параметры, влияющие на переизлученную вибрацию. Анализ ScoreRail показал, что модель позволяет мгновенно прогнозировать уровни вибрации

грунта при наличии различных скоростей поездов и профилей грунта. Также в модель был добавлен набор эмпирических факторов для облегчения прогнозирования структурной вибрации и шума в помещениях зданий, расположенных вблизи высокоскоростных линий.

Преимущество этой повышенной точности заключается в том, что она снижает вероятность занижения или завышения прогнозируемых уровней вибрации. Если уровни вибрации завышены, то для дальнейшего анализа не потребуются ненужные деталильные оценки вибрации, когда занижены — могут потребоваться меры по снижению вибрации. Поэтому более точные прогнозы могут привести к значительной экономии средств.

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. 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.

3. Фиала П. Прогнозирование внутреннего шума в зданиях, создаваемого подземным железнодорожным движением / П. Фиала, Г. Дегранде // *Журнал звука и вибрации*. — Вып. 293. — С. 680–690.

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

5. Рябец В. В., Овчаренко М. С. 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.

6. Завьялов А. Б. Исследование смягчения вибрации и переизлученного шума в зданиях, создаваемых при движении железнодорожного транспорта / А. Б. Завьялов,

О. И. Копытенкова, А. М. Евстафьев // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2023. — Т. 20. — № 2. — С. 433–440.

7. Терловая Н. В. Технологические решения по минимизации шума и вибрации на железнодорожном транспорте / Н. В. Терловая, А. А. Ступак // *Проблемы и перспективы формирования инфраструктуры экономики знаний: сборник статей*. — М., 2018. — С. 177–181.

8. 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.

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

10. 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.

Дата поступления: 10.08.2023

Решение о публикации: 29.09.2023

Контактная информация:

ЗАВЬЯЛОВ Алексей Борисович — ассистент;
zenitpiter91@inbox.ru

Prediction of Re-Radiated Noise and Vibration Generated in the Vicinity of Railroad Lines

A. B. Zavyalov

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

For citation: Zavyalov A. B. Prediction of Re-Radiated Noise and Vibration Generated in the Vicinity of Railroad Lines // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 820–827. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-820-827

Summary

Purpose: To analyze a ScopeRail model capable of predicting re-radiated noise and vibration in structures located in close proximity to rail lines. To compare the obtained results with an alternative, widely used model for accuracy assessment and the potential cost reduction of assessing the impact of vibrations on residential areas for new railway lines. **Methods:** To perform statistical analysis of the obtained data for modeling vibration of different types of ground. To calculate simulation results in order to create a database of vibration characteristics for different ground conditions, train speeds and distances from the track. **Results:** The results obtained have been analyzed and compared with an alternative, widely used model for determining accuracy. It is found that the ScopeRail model yields higher prediction accuracy, which can potentially reduce the cost of assessing the impact of vibrations on residential areas for new rail lines. A model is obtained which can instantly predict the vibration and re-radiated noise levels for different types of soil at different speeds of passing trains. **Practical significance:** Re-radiated vibration and noise model for the spaces in buildings immediately adjacent to the railroad track has been developed using a set of empirically obtained factors. Vibration and noise impacts have also been modeled using additional vibroacoustic mitigation measures (slabs and ballast mats) as well as vibration excitation parameters (switches, crossings and wheel stoppers).

Keywords: Vibration, re-radiated noise, soil depth, wave velocity, accuracy, soil.

References

1. Levanchuk A. V., Kopytenkova O. I., Afanasyeva T. A. Gigienicheskoe obosnovanie metodov snizheniya akusticheskoy nagruzki v zhilyh pomesheniyah [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., Levanchuk A. V. Osobennosti ocenki komfortnosti sredi gorodskih 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)
3. Fiala P., Degrande G., Augusztinovicz F. Prediction of internal noise in buildings generated by underground rail traffic. *Sound and vibration log*, 2012, Iss. 293, pp. 680–690. (In English)
4. 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* [Traumatism at railway transport facilities. Labor protection and technosphere 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)
5. Ryabets V. V., Ovcharenko M. S. Perspektivnyy metod snizheniya vibroakusticheskoy nagruzki vdol' ob'ektov zheleznodorozhnogo transporta [Promising method to reduce vibroacoustic load along linear objects of railway transport]. *Sbornik trudov III Betankurovskogo mezhdunarodnogo foruma* [Proceedings of the III Betancourt International Forum]. 2021, vol. 2, pp. 125–127. (In Russian)
6. Zav'yalov A. B., Kopytenkova O. I., Evstaf'ev A. M. Issledovanie smyagcheniya vibratsii i pereizluchennogo shuma v zdaniyakh, sozdavaemykh pri dvizhenii zheleznodorozhnogo transporta [Prediction of over-radiated noise and vibration generated in the vicinity of railroad lines]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2023, vol. 20, Iss. 2, pp. 433–440. (In Russian)
7. Terlovaya N. V., Stupak A. A. Tekhnologicheskie resheniya po minimizatsii shuma i vibratsii na zheleznodorozhnom transporte [Technological solutions to minimize noise and vibration in railway transport]. *Problemy i perspektivy formirovaniya infrastruktury ekonomiki znaniy: sbornik statey* [Problems and prospects for the formation of the infra-

structure of the knowledge economy: digest of articles]. Moscow, 2018, pp. 177–181. (In Russian)

8. Akulova E. A. Tekhnologiya zashchity zdaniy ot vibratsii [Technology for protecting buildings from vibration]. *Innovatsionnyy potentsial razvitiya obshchestva: vzglyad molodykh uchenykh: sbornik nauchnykh statey II Vserossiyskoy konferentsii perspektivnykh razrabotok* [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)

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

10. Panova A. A., Ermachkova A. Yu., Zakharova I. G. *Vliyanie zheleznodorozhnogo transporta na zdorovye 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-practical conference of students and young scientists]. Samara, 2020. pp. 341–343. (In Russian)

Received: August 10, 2023

Accepted: September 29, 2023

Author's information:

Alexey B. Zavyalov — Assistant; zenitpiter91@inbox.ru