

УДК 550.34, 624.044
PACS 91.30.Dk

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДУЛЯ СДВИГА МАТЕРИАЛА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ НАСЫПИ

Г.Н. АНТОНОВСКАЯ¹, Н.К. КАПУСТЯН^{1,2}, В.С. ШИЛЕНКОВА³

¹ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН, г. Архангельск, Россия

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

³ Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Россия

Автор для переписки: Г.Н. Антоновская, e-mail: essm.ras@gmail.com

Поступила в редакцию 31.03.2023 г.; после доработки 02.05.2023 г.

Принята к публикации 03.05.2023 г.

Аннотация. Представлены экспериментальные примеры, подтверждающие правильность аналитического решения задачи определения модуля сдвига материала железнодорожной насыпи. Непрерывная регистрация проходящих поездов проводилась широкополосным велосиметром. Записи после фильтрации в полосе 0.01–1.25 Гц (определяемой постановкой задачи) сравнивались с теоретической сейсмограммой. Показано, что результаты расчетов и эксперимента совпадают не только качественно, но и количественно. Для получения наилучшего подобия экспериментальным данным в расчетах перебирались значения модуля сдвига. Доказано, что величина амплитуды первого экстремума вертикальной составляющей A_z определяется преимущественно модулем сдвига материала насыпи; влияние веса поезда удастся минимизировать при статистическом анализе величин A_z . Показана чувствительность вариаций медианных значений A_z к сезонным деформационным изменениям в грунтах. Предложенная теория может служить основой разрабатываемой технологии сейсмической вибродиагностики железнодорожного земляного полотна.

Ключевые слова: железнодорожная насыпь, широкополосный сейсмометр, амплитуда, модуль сдвига

DOI: <https://doi.org/10.21455/VIS2023.3-7>

Цитирование: Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Шиленкова В.С. Экспериментальное подтверждение задачи определения модуля сдвига материала железнодорожной насыпи // Вопросы инженерной сейсмологии. 2023. Т. 50, № 3. С. ??-??. <https://doi.org/10.21455/VIS2023.3-7>

ВВЕДЕНИЕ

Определение упругих характеристик материала железнодорожной насыпи и их изменений во времени составляет важную задачу мониторинга состояния грунтов для обеспечения безопасности железнодорожного земляного полотна [Полевиченко, 1999; Коншин, 2010; Ашпиз, 2012; ОДМ..., 2020]. При этом важны два момента: способ должен не разрушать насыпь и может быть применен достаточно оперативно без нарушения графика движения.

Таких способов, применяемых на практике, в настоящее время практически нет, но возможности подобных работ рассматривались ранее [Антоновская и др., 2020; Antonovskaya et al., 2022].

В работе [Добровольский, 2023] предложена такая возможность на основе теоретического рассмотрения задачи деформирования трапециевидной железнодорожной насыпи движущимся поездом. Приведено аналитическое решение задачи и теоретическая сейсмограмма колебаний в точке на берме. С учетом того,

что по пути могут проходить десятки поездов в сутки, представленное решение является обоснованием возможности неразрушающего сейсмического мониторинга состояния насыпи. Для применения данного решения в виде методики необходимы, во-первых, его экспериментальное подтверждение, а во-вторых, оценка чувствительности определения модуля сдвига при ожидаемых временных изменениях этого параметра, что составляет цель нашего рассмотрения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наблюдения проводились на специально выбранной насыпи на участке Северной железной дороги в Архангельской обл. в течение длительного времени (с ноября 2021 г. поныне). Геометрия теоретической модели [Добровольский, 2023] соответствует этой насыпи. Запись велась по трем компонентам (вертикальной и двум горизонтальным) непрерывно и в автоматическом режиме. Получены записи для различных типов поездов, из которых для сравнения с теорией подбирались грузовые поезда с одним типом вагонов в составе (визуально, по дневнику наблюдений). Регистрировались колебания примерно одинаковой мощности вдоль записи, что, по нашему опыту, соответствует и постоянной скорости движения.

Регистрация осуществлялась широкополосным трехкомпонентным сейсмометром Trillium Compact 120s с регистратором Centaur (фирма Nanometrics), установленным постоянно на берегу в приямке, питание – от солнечных батарей. Для определения строения насыпи проводились работы по малоглубинной сейсморазведке станцией «Телс-402» (ООО «ГЕОСИГНАЛ»).

Получаемая сейсмограмма прохождения поезда (рис. 1) представлена сигналом, в котором присутствует набор частот, определяемых интерференцией колебаний разной природы: взаимодействие колесо–рельс и пр. Рассмотренное в работе [Добровольский, 2023] колебание надо «вычленивать» из записи; для этого была приведена полосовая фильтрация 0.01–1.25 Гц. Нижняя граница полосового фильтра – практически открытый канал датчика, верхняя же граница определяется теоретическими соображениями, описанными в [Добровольский, 2023]. Анализ спектра записи при более широкой полосе 0.01–2 Гц (рис. 1, в) выявляет максимум на частоте около 1 Гц, что доказывает реальность воздействия от нагрузки, рассмотренной теоретически.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравним расчетную и экспериментальную записи, учитывая разное направление вертикальной оси для них (рис. 2): при расчете теоретической сейсмограммы по [Добровольский, 2023]

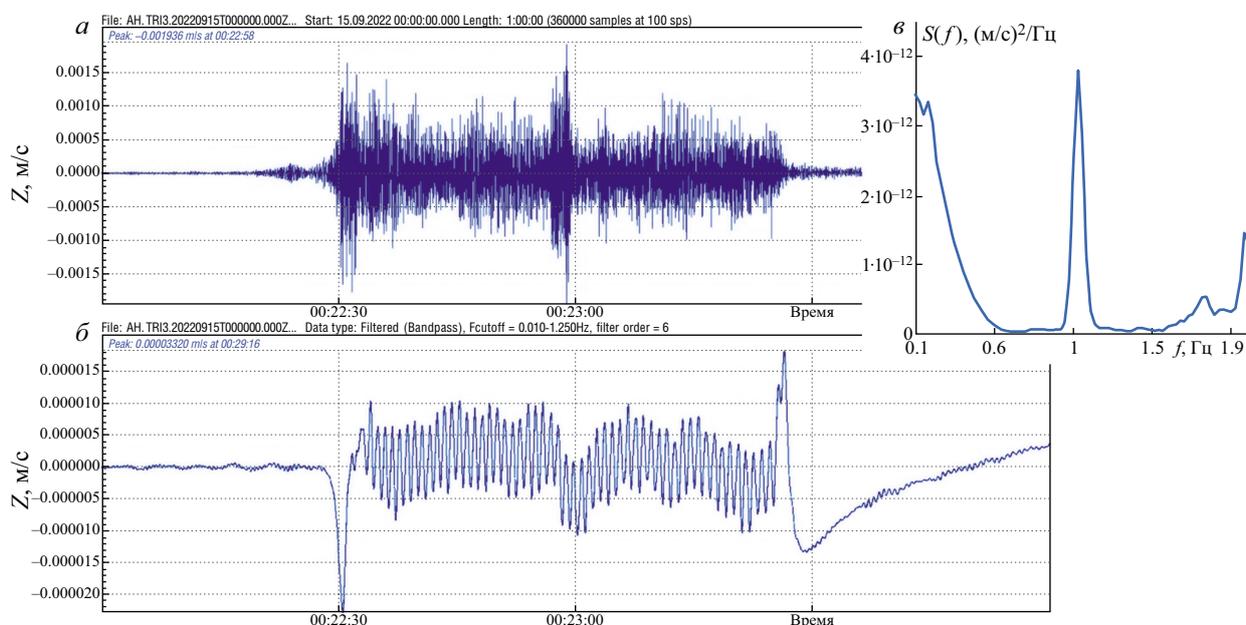


Рис. 1. Пример регистрации движения поезда широкополосным сейсмометром на вертикальном канале Z в разных полосах частот

a – исходная запись; b – запись после применения полосового фильтра 0.01–1.25 Гц; c – спектр мощности записи при фильтрации в полосе частот 0.01–2 Гц

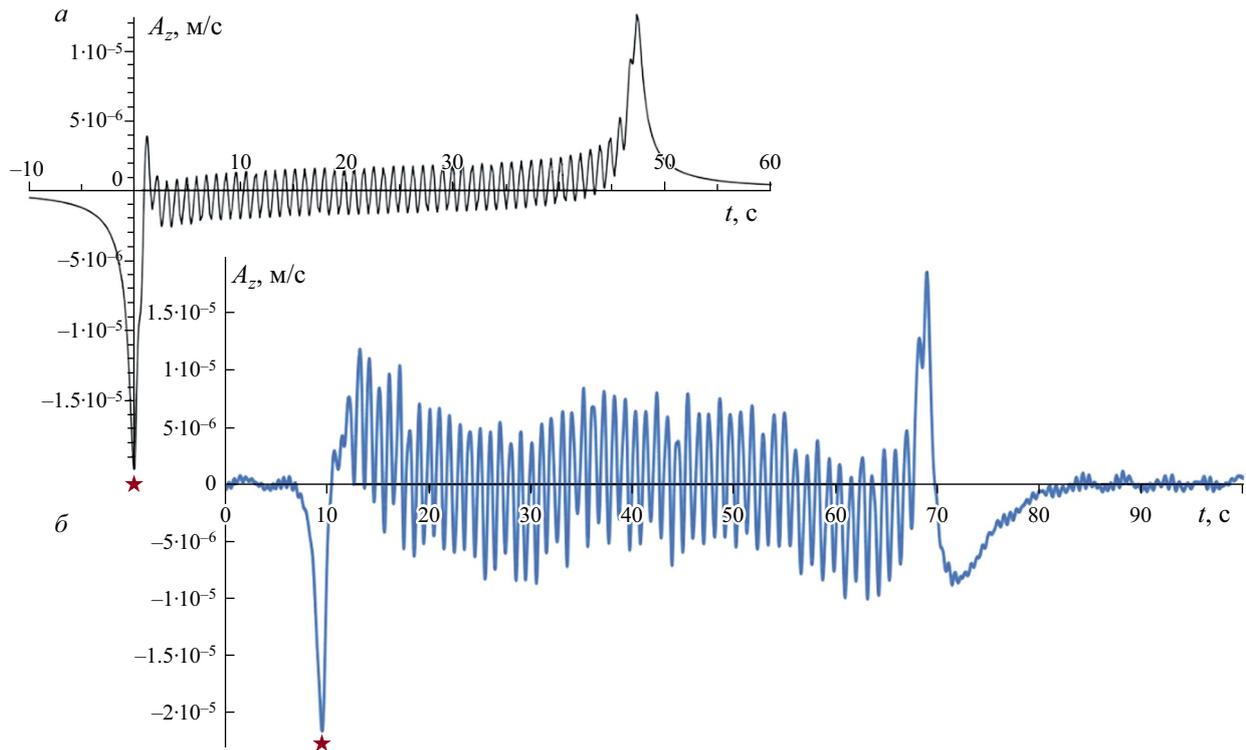


Рис. 2. Расчетная (а) и экспериментальная (б) сейсмограммы

вертикальная ось Z была направлена вниз, тогда как в эксперименте ось Z направлена всегда вверх. Значения параметра модуля сдвига μ перебирались для получения наилучшего подобия эксперименту. Сравнение волновых форм показывает, что начало и конец записи характеризуются относительно низкочастотными всплесками амплитуд, а средняя часть представляет собой синусоидальный цуг. Вариации амплитуд цуга в эксперименте определяются вкладом низкочастотной составляющей, связанной, по-видимому, с неоднородностью вагонов в составе, неравномерностью хода поезда и пр. Для мониторинга мы использовали значения амплитуды первого экстремума (на рис. 2 он отмечен звездочкой) вертикальной компоненты Z , форма и значения амплитуд которого в эксперименте и теории хорошо согласуются не только качественно, но и количественно при подборе значений μ . В итоге на основании результатов было получено следующее значение модуля сдвига для приведенной сейсмограммы (рис. 2, б): $\mu = 5.5 \cdot 10^7$ Па.

Существенно, что анализируемая амплитуда первого экстремума вертикальной составляющей A_z определяется модулем сдвига, а также весом локомотива. Аналитическая связь данных параметров как основа для модельных расчетов приведена в работе [Добровольский, 2023]. Учитывая, что в сутки на рассматриваемом

участке проходит примерно 40 поездов, а свойства грунтов за несколько суток заметно не меняются, получить значение амплитуды, пригодное для выявления изменений в грунте, можно по распределению амплитуд за несколько суток, что позволит уменьшить влияние вариаций веса. Сравнение распределений амплитуд при наблюдениях в ноябре 2021 г. и июле 2022 г. (рис. 3, а), т.е. при сезонных изменениях в грунтах, показывает их различие, прежде всего по медианному значению. Это, по существу, является демонстрацией чувствительности методики. Видно, что медианные значения различаются: в ноябре – $1.8 \cdot 10^{-5}$ м/с; в июле – $2.0 \cdot 10^{-5}$ м/с. При нагрузке на ось 50 т подбор значений μ при моделировании дает для ноября $\mu = 5.5 \cdot 10^7$ Па, а для июля – $\mu = 5.0 \cdot 10^7$ Па.

Оценим точность определения μ . В эксперименте точность определения амплитуды A_z зависит от соотношения уровня микросейсм на данной частоте и амплитуды сигнала; в нашем случае это не более 10%. Из работы [Добровольский, 2023] следует, что точность определения μ также будет около 10%. Учитывая, что $V_s = (\mu/\rho)^{1/2}$, и полагая, что ρ при сезонных изменениях в теле насыпи меняется мало, получаем изменение V_s на 5%, что находится на грани разрешающей способности малоглубинной сейсморазведки на SH -волнах. В нашем случае результаты проведенной малоглубинной

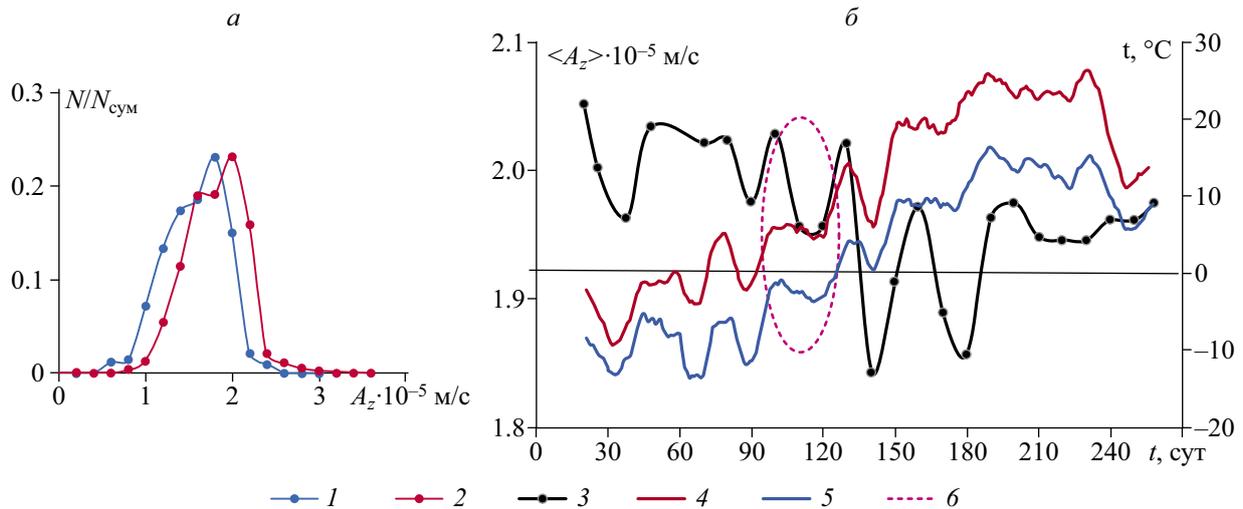


Рис. 3. Основные параметры, определяющие возможности мониторинга железнодорожной насыпи при движении поездов

a – распределение значений амплитуд первого экстремума A_z за ноябрь 2021 г. (1) и июль 2022 г. (2);
б – временной ход осредненных за 10 сут значений вертикальных амплитуд A_z (3) в сравнении со значениями дневных (4) и ночных (5) температур окружающей среды. Овалом *б* выделена область неустойчивого характера изменения значений $\langle A_z \rangle$

сейсморазведки дают значения на берме $V_S = 150$ м/с. При плотности $\rho = 2000$ кг/м³, характерной для уплотненного грунта насыпи, получаем $\mu \approx 5 \cdot 10^7$ Па. Отметим, что значения V_S определены при плотной системе наблюдения по *SH*-волнам (расстояние между сейсмомприемниками 1 м); изменение скоростей на 10 м/с (5%) отследить крайне трудно. Таким образом, точность определения μ *in situ* путем сопоставления расчетов и экспериментально измеренных амплитуд превосходит имеющиеся традиционные возможности.

Непрерывный мониторинг в течение 2022 г. позволил наблюдать детальную картину временных изменений несущей способности насыпи по вариациям A_z . Исходя из формы распределений амплитуд (рис. 3, *a*), к дальнейшей обработке принимались значения в полосе $1.8 \cdot 10^{-5}$ – $2.8 \cdot 10^{-5}$ м/с и рассчитывались величины $\langle A_z \rangle$ – средние значения за 10 сут. Временной ход параметра $\langle A_z \rangle$ сравнивался с кривыми изменения дневной и ночной температур, также с 10-суточным сглаживанием (рис. 3, *б*). Отмечается неустойчивый характер изменения $\langle A_z \rangle$ в интервале 90–200 сут (от начала года), что связано с переходом через 0°C дневных и ночных температур и, по-видимому, с послойным оттаиванием насыпи [Ланис и др., 2022]. Несомненно, требуются более детальные наблюдения с послойным обследованием насыпи и установкой системы температурного мониторинга грунтов. Тем не менее, намечается возможность не только мониторинга

устойчивости железнодорожной насыпи, но и прогноза ее состояния, исходя из текущих значений упругих параметров и прогноза хода температур, который дают метеорологические наблюдения.

ВЫВОДЫ

Аналитическое решение, предложенное И.П. Добровольским [2023], в сравнении с экспериментальными данными показывает, что предложенная теория может составить основу простой и технологичной методики сеймовибрационного мониторинга опасных процессов в грунтах насыпи. Методика не требует проведения специальных работ; установка сейсмической аппаратуры не нарушает структуры насыпи и не мешает движению поездов. По нашему опыту, возможно создать условия для автономной регистрации, т.е. для проведения мониторинга состояния железнодорожной насыпи с выявлением опасных процессов на ранней стадии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена по государственному заданию Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук и в рамках темы государственного задания Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики Уральского отделения Российской академии наук, № государственной регистрации 122011300389-8.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Антоновская Г.Н., Добровольский И.П., Капустян Н.К., Орлова И.П. Определение *in situ* упругих свойств нижнего строения железнодорожного пути при сейсмометрических наблюдениях // Сейсмические приборы. 2020. Т. 56, № 1. С. 44–55. <https://doi.org/10.21455/si2020.1-4>
- Ашпиз Е.С. Проектирование земляного полотна железных дорог в зоне многолетнемерзлых грунтов // Наука и транспорт. Транспортное строительство. 2012. № 4. С. 18–21.
- Добровольский И.П. Методика определения модуля сдвига материала железнодорожной насыпи // Вопросы инженерной сейсмологии. 2023. Т. 50, № 1. С. 84–88. <https://doi.org/10.21455/VIS2023.1-6>
- Конишин Г.Г. Упругие деформации и вибрации земляного полотна. Учебн. пособие. М.: МИИТ, 2010. 180 с.
- Ланис А.Л., Разуваев Д.А., Усов Д.А. Влияние оттаивания сезонно-мерзлых грунтов на деформации земляного полотна // Вестник СГУПС. 2021. № 3 (58). С. 104–111. https://doi.org/10.52170/1815-9265_2021_58_104
- ОДМ 218.4.1.002-2020 Отраслевой дорожный методический документ. Организация и проведение геотехнического мониторинга при строительстве земляного полотна на слабых грунтах [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573320667> [Дата доступа: 31.03.2023 г.].
- Полевиченко А.Г. Деформации земляного полотна, меры предупреждения и способы ликвидации. Конспект лекций. Хабаровск: ДВГУПС, 1999. 29 с.
- Antonovskaya G.N., Orlova I.P., Kapustian N.K. Ultra-low-frequency seismic sounding of railway subgrade state by passing trains // Canadian Geotech. J. 2022. V. 59, N 12. P. 2151–2162. <https://doi.org/10.1139/cgj-2021-0621>

Сведения об авторах

АНТОНОВСКАЯ Галина Николаевна – Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова РАН. Россия, 163000, г. Архангельск, Никольский пр-т, д. 20. E-mail: essm.ras@gmail.com

КАПУСТЯН Наталия Константиновна – Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Россия, 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1; Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова РАН. Россия, 163000, г. Архангельск, Никольский пр-т, д. 20. E-mail: nkapustian@gmail.com

ШИЛЕНКОВА Валерия Сергеевна – Российский университет транспорта (МИИТ). Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9. E-mail: vssh333@gmail.com

EXPERIMENTAL CONFIRMATION OF THE PROBLEM OF RAILWAY EMBANKMENT MATERIAL SHEAR MODULUS DEFINITION

G.N. ANTONOVSKAYA¹, N.K. KAPUSTIAN^{1,2}, V.S. SHILENKOVA³

¹ N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russia

² Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³ Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Corresponding author: G.N. Antonovskaya, e-mail: essm.ras@gmail.com

Abstract. Experimental examples confirming the analytical solution of the shear modulus determination of the railway embankment material are presented. We carried out continuous registration of passing trains by a broadband seismometer. Records after filtering in the 0.01–1.25 Hz band (determined by the problem statement) were compared with a theoretical seismogram. It is shown that the results of calculations and experiment coincide not only qualitatively but also quantitatively. To obtain the best similarity to the experimental data, the values of the shear modulus were iterated in the calculations. It is proved that the magnitude of the amplitude of the vertical component first extremum A_z is determined mainly by the shear modulus of the embankment material. The influence of train weight can be minimized

by statistical analysis of A_z values. The sensitivity of median A_z values variations to seasonal deformation changes in soils is shown. The result is the basis of the developed technology of seismic vibration diagnostics of the railway roadbed.

Keywords: railway embankment, broadband seismometer, amplitude, shear module

Financial support

This study was funded by Russian Federation Ministry of Science and Higher Education according to the research project 122011300389-8 of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences and state task of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences.

Ethics declarations

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

ANTONOVSKAYA Galina Nikolaevna – N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Russia, 163020, Arkhangelsk, Nikolsky Av. 20. E-mail: essm.ras@gmail.com

KAPUSTIAN Natalia Konstantinovna – Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Russia, 123242, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya st. 10-1; N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Russia, 163020, Arkhangelsk, Nikolsky Av. 20. E-mail: nkapustian@gmail.com

SHILENKOVA Valeriya Sergeevna – Russian University of Transport (MIIT). Russia, 127994, Moscow, Obraztsova st. 9, bld. 9. E-mail: vssh333@gmail.com

Cite this article as: Antonovskaya G.N., Kapustian N.K., Shilenkova V.S. Experimental confirmation of the problem of railway embankment material shear modulus definition, *Voprosy Inzhenernoi Seismologii* (Problems of Engineering Seismology). 2023. V. 50, No. 3. P. ??–??. [in Russian]. <https://doi.org/10.21455/VIS2023.3-7>

English translation of the article will be published in *Seismic Instruments*, ISSN: 0747-9239 (Print) 1934-7871 (Online), <https://link.springer.com/journal/11990>