

DOI: [10.7242/1999-6691/2021.14.1.8](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2021.14.1.8)  
УДК 681.3.01

## АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ДВИЖУЩИМСЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ СОСТАВОМ

Ю.М. Заславский<sup>1</sup>, В.Ю. Заславский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Российская Федерация*

<sup>2</sup>*Нижегородский государственный национальный исследовательский университет, Нижний Новгород, Российская Федерация*

Излагается теоретический анализ сейсмических колебаний, возбуждаемых быстро движущимся железнодорожным экспрессом. Исследуется возможность использования сейсмических колебаний техногенной природы, создаваемых самим транспортным средством, которые регистрируются сейсмической аппаратурой под путями и в их окрестностях, подверженных, например, карстовым явлениям, где риски аварийности повышены. Указаны основные физические механизмы возбуждения сейсмических волн, бегущих вдоль свободной поверхности и уходящих вглубь земной толщи. Основное внимание уделяется релеевским поверхностным волнам, доминирующим на малых и средних удалениях от пути на частотах до первых десятков герц. Выполнен расчёт спектра поверхностной релеевской волны, преобладающей в сейсмическом отклике, соответствующем указанной дистанции. Рассматриваются амплитудно-частотные характеристики и их зависимости от скорости движения нагрузки, перепада скорости распространения упругих волн в толще грунта. Графики спектра сейсмического волнового отклика демонстрируются при нескольких значениях скорости движения и параметров верхнего слоя претерпевшей осадку земляной толщи в виде рельефа на плоскости аргументов «частота–дистанция по перпендикуляру к направлению движения». Анализируется влияние частотной дисперсии скорости распространения поверхностных волн в слоистой структуре нижнего строения железнодорожного пути на спектр волнового отклика. Характерные особенности в рельефе, изображающем спектр в двухкоординатном представлении, расцениваются как информативные признаки, которые закладываются в алгоритмы мониторинга слоистой структуры грунта, а также в основу работы систем диагностики локальных аномалий, вызванных, например, карстовыми явлениями под магистралью.

*Ключевые слова:* сейсмические колебания, возбуждение волн, упругое полупространство, движущийся источник колебаний, железнодорожный путь, мониторинг грунта

## ANALYSIS OF SEISMIC VIBRATIONS EXCITED BY A MOVING RAILWAY CONSTRUCTION

Yu.M. Zaslavsky<sup>1</sup> and V.Yu. Zaslavsky<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

This paper presents a theoretical analysis of seismic vibrations generated by a fast moving train. The possibility of using seismic vibrations of technogenic character, created by the vehicle itself and recorded by the equipment used in seismic exploration of the subsoil, to detect and localize areas of the geomedium under the tracks and in its vicinity, prone to karst phenomena, where the risk of accidents is increased, is investigated. The main physical mechanisms for the excitation of seismic waves traveling along the free surface and going deep into the earth are listed. Particular attention is paid to Rayleigh surface waves, which dominate at small and medium distances from the path at frequencies up to the first tens of hertz. The calculation of the spectrum of the surface Rayleigh wave, prevailing in the seismic response recorded at the indicated distances, has been performed. The amplitude-frequency characteristics and their dependence on the velocity of movement and on the difference in the velocity of propagation of elastic waves in the sedimentary strata are considered. The graphs of the seismic wave response spectrum at several values of the velocity of movement and parameters of the upper layer of the sedimentary strata are shown as a relief on the plane of arguments: frequency - distance along the perpendicular. The effect of the frequency dispersion of the velocity of propagation of surface waves in a layered structure under the mainline on the spectrum of the wave response is analyzed. The characteristic features in the relief, depicting the spectrum in two-coordinate representation, are considered as informative features that are laid down in the algorithms for monitoring the layered structure of the soil, as well as the basis for the operation of diagnostic systems for local anomalies caused by karst phenomena under the highway.

*Key words:* seismic vibrations, wave excitation, elastic half-space, moving vibration source, railway track, ground monitoring

### 1. Введение

В настоящее время повышенный интерес проявляется к исследованиям сейсмических колебаний, создаваемых в результате динамических воздействий на земную поверхность со стороны железнодорожного состава, движущегося по путям со скоростью 30–50 м/с. Быстрое перемещение постоянной тысячтонной нагрузки по свободной поверхности сопровождается откликом создаваемого поля квазистатических деформаций, передний фронт которого движется синхронно с нагрузкой и вызывает встряску и вибрацию высокой интенсивности не только верхнего и нижнего строений железнодорожного пути, но и прилегающей к нему инфраструктуры (сооружений, зданий, светофорной сигнализации, электрификационной системы и всевозможных коммуникаций, обеспечивающих условия и нормальное функционирование железной дороги). Контактное взаимодействие колёс с рельсами представляет собой источник, вызывающий интенсивные сотрясения земляного полотна, которые сложно погасить на ближних от пути дистанциях. При этом возбуждаемые на инфразвуковых частотах техногенные возмущения

распространяются далее по земной поверхности и вглубь толщи грунта в виде сейсмических волн (ground vibration). Анализ сейсмических волн, излучаемых быстро движущимся сложным источником, образованным множеством элементарных, соединённых в длинную цепочку, и адекватная интерпретация спектра результирующего сейсмического отклика, составляют предмет данной работы. На основе полученных результатов создается предпосылка решения проблемы снижения уровня вибраций и устранения их негативных последствий. Облегчается мониторинг и диагностика нарушений за счет природных воздействий на весь сложный комплекс, образующий железнодорожный путь.

Многочисленные исследования можно разделить на две части. Одни из них направлены на поиск способов создания «барьеров», экранирующих распространение по грунту упругих волн, порождаемых поездом, быстро движущимся в пределах густо населенных территорий [1, 2], другие посвящены мониторингу дорожного полотна и грунта вблизи пути и связаны с диагностикой возможных аномалий (провалов, пустот карстового происхождения, зон с пониженной несущей способностью непосредственно под путями) [3–6]. Указанное направление представляет интерес и в рамках настоящей работы. При этом следует отметить, что на территориях, покрытых сетью железных дорог, на постоянной основе проводится тщательный систематический контроль посредством инженерной сейсморазведки, что связано с необходимостью соблюдения условий безаварийной эксплуатации подвижного состава железнодорожного транспорта, исключения рисков возникновения аварийных ситуаций вследствие несвоевременного реагирования на негативное воздействие природных факторов, способных стать причиной отказов при эксплуатации транспортной инфраструктуры (рельсового пути, технических устройств обеспечения движения и другого).

Однако наряду с применением традиционных методов инженерной сейсморазведки, позволяющих контролировать состояние железнодорожного пути, для этих целей также возможно использование собственных сейсмических полей, создаваемых движущимся поездом, что предполагает регистрацию соответствующих сейсмических откликов и требует тщательного изучения их характеристик. Этому посвящён ряд работ, в которых представлены результаты анализа сейсмических колебаний и деформаций структуры среды, при движении поезда наблюдаемых под полотном, вблизи пути и в некоторой его окрестности. Зафиксированные отклики характеризуются широкой частотной полосой. Ограничение снизу соотносится с «несколькими секундами», а сверху — с несколькими десятками герц. После оценки полученных данных обычно следует заключение, что для диагностики и выявления мест локализации наиболее «ослабленных» грунтов максимальной информативностью обладают сигналы низких частот — порядка первых десятков герц и даже ниже (~0,5 Гц).

Вместе с тем, очевидно, что регистрируемые сигналы отвечают области ближней — не волновой, зоны неизлучаемых колебаний, создаваемых в среде под источником и в непосредственной близости от него. Подобная этой «низкочастотная» область с привлечением импедансных характеристик имеет свой аналог, используемый в акустической дефектоскопии. Аналогичные исследования поля деформаций среды на частотах, близких к вышеуказанным, также осуществляются при изучении явлений, связанных с взаимодействием, например, основания сооружения с вмещающим массивом грунта при сейсмических воздействиях естественной природы (землетрясениях), для чего применяются современные вычислительные методы и средства [7].

Задача расчёта поля деформаций, появляющихся не под воздействием излучения, то есть не уносящих от источника энергию, а вызванных движущейся (наезжающей) постоянной нагрузкой, распределённой по границе полубесконечной полосы, рассмотрена в [8] (двумерный случай). Её решение, как и результаты из перечисленных выше публикаций, представляют интерес при формулировании признаков, учёт которых требуется для удалённой диагностики наличия локальных неоднородностей в насыпном грунтовом массиве под путями.

В данной работе основное внимание обращается на спектральные характеристики сейсмических волновых откликов на частотах выше 0,5 Гц, излучаемых и уносящих энергию вдаль от быстро движущегося источника колебаний, причём их особенности предполагается использовать в качестве основы для создания алгоритмов работы устройств мониторинга среды под железнодорожными путями.

## 2. Формулировка задачи. Пояснение подходов к решению

Для анализа спектрального состава сейсмических волн следует определиться с основными источниками волнового возбуждения. Причины возникновения переменных сил, локализованных на контакте колесо–направляющая, ранее уже рассматривались (см. [9–12]), в связи с чем, ограничившись лишь упоминанием основных факторов возбуждения, далее обратимся к теоретическому анализу характеристик упругих волновых полей преобладающего уровня, распространяющихся вблизи земной поверхности. Перечислим несколько доминирующих физических механизмов, приводящих к появлению силовой реакции, которая представляет собой источник возбуждения сейсмических колебаний. По значимости к преобладающим относятся: колебания центра массы вагона заметной амплитуды по вертикали, генерируемые при его поступательном движении вследствие неполного демпфирования в системе подвески (рессор) (1-й механизм); аналогичные продольно-осевые колебания центра масс вагона

(2-й механизм); автоколебательный режим возвратных боковых, другими словами, перпендикулярных корпусу вагона смещений колёсной пары (и несущей тележки) в пределах стандартно допустимого интервала — зазора между рельсом и ребордой на ободу колеса (3-й механизм). Его упрощенной моделью может быть безотрывное (без проскальзывания) качение тяжелой полированной сферы по прямолинейному полированному жёлобу, проложенному на границе упругого полупространства, с постоянной средней скоростью, но с «рысканьем или вихлянием» по курсу. Вследствие боковых циклических или возвратных перемещений, сопровождающих качение с постоянной (в среднем) осевой скоростью, на стенки жёлоба действует переменная сила (а противоположная сила реакции возвращает отклонившийся шарик к продольной оси), при этом в полупространстве, окружающем жёлоб, возбуждаются поверхностные и объёмные волны. На рисунке 1 представлены схемы, иллюстрирующие упомянутые физические механизмы переменного силового воздействия на грунт, и условно обозначены излучаемые волны преобладающего уровня. Возникающие квазипериодические осциллирующие силовые воздействия на рельсы и шпалы (сопровождающиеся их деформацией) передаются на насыпную (гравийную либо щебёночную) подушку и далее на подстилающий грунт и возбуждают сейсмические волны, которые формируются и распространяются вглубь него и вдоль земной поверхности.

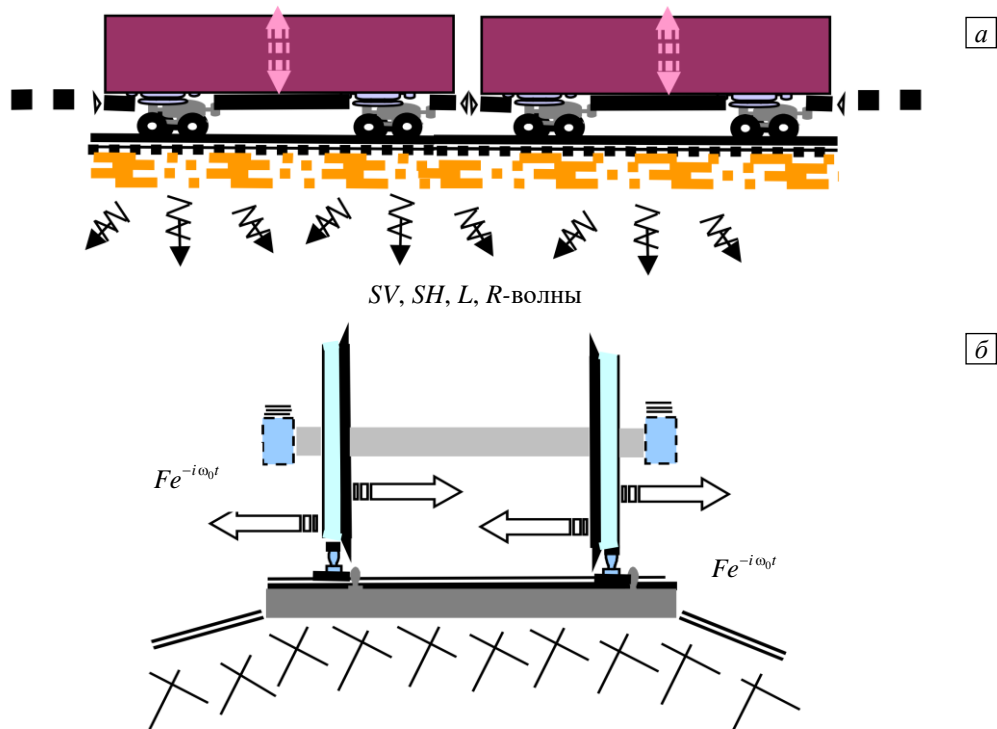


Рис. 1. Схема воздействия на грунт и преобладающие в излучении волны при колебании центра масс вагона (а), при возвратных боковых (по траверзу) смещениях колёсных пар (б)

Ввиду того, что на современных железнодорожных магистралях повсеместно используется бесшовная состыковка рельсов, далее в статье не упоминается о сейсмических колебаниях, обусловленных прохождением колеса по сварному шву между рельсами. Следует заметить, что анализ сейсмических колебаний становится наиболее востребованным применительно к случаю заболоченной местности (со слабыми рыхлыми грунтами, где скорость распространения волн  $c_R = 150...250$  м/с) и в связи с возрастающими скоростями движения транспорта ( $V \approx 50$  м/с), на которых число Маха достигает значений  $\sim M = V/c_R = 0,3$ , а сейсмическое излучение становится анизотропным и приобретает резко выраженную направленность.

Переменные нагрузки возникают при поступательном движении состава, причём каждый вагон (или колёсная пара) является дискретным источником сейсмического излучения. Железнодорожный состав в виде соединённых в цепочку вагонов образует многозвенный сейсмический источник. Для оценки максимально достижимого уровня полезного сигнала используется предположение о синфазности (когерентности) осциллирующих силовых воздействий вдоль по цепочке дискретных источников как наиболее предпочтительное по сравнению с моделью независимых источников, причём применительно ко всем выше перечисленным механизмам. При этом имеет место синхронное осциллирующее воздействие источников на плоскую границу сплошной среды, поступательно движущихся со скоростью, при которой число Маха заметно отличается от нуля. Доплеровское смещение, обусловленное движением состава

(как целого), нарушает синфазность волн, идущих к приёмнику от каждого элементарного источника, что ведёт к снижению уровня суммарного сигнала и расширению полосы частот его спектра.

Общий анализ возбуждения сейсмических волн различного вида (природы) применительно к движущимся источникам разного типа выполнялся и ранее [9, 10]. В частности, сейсмические волны, создаваемые объектами автотранспорта при движении по автомагистралям, исследовались теоретически и экспериментально. Существует некоторая общность в механизмах возбуждения, но имеются и существенные физические отличия, определяющие особенности волновых характеристик, соответствующих железнодорожному транспорту. Среди основных — это «технологически ровная» поверхность рельса, в контакте с которой находится обод колеса вагона и которая позволяет достигнуть уровня сейсмических колебаний, вызванных неровностями контактной поверхности рельса, минимального по сравнению с возбуждением на неровностях (микропрофиле) покрытия шоссеной дороги. Кроме того, у железнодорожного состава имеет место существенное превышение как по массе, так и по линейным размерам (на несколько порядков) автотранспортного средства. Воздушно-акустический шум, вызванный изгибными деформациями вагонов при движении состава, также может вносить вклад в сейсмический отклик. Все эти различия обуславливают разный спектральный и волновой состав сейсмических колебаний.

### 3. Вывод расчётных соотношений

Обращаясь к общей характеристике сейсмического излучения, создаваемого перечисленными физическими механизмами и учитывая результаты ранее проведённых исследований, можно заметить, что в случае действия 1-го и 2-го механизмов возникнут сейсмические отклики в диапазоне нескольких герц, причём в виде поверхностных  $R$ - и  $L$ -волн и объёмных поперечных  $SV$ - и  $SH$ -волн (вклад продольных волн незначителен). Колебательные возвратно-боковые смещения колёсных пар вместе с несущими тележками при воздействии на рельсы также представляют собой осциллирующий сдвиговой источник объёмных и поверхностных волн (3-й механизм). Соответствующие ему сейсмические отклики (условно) попадают в частотный интервал до 10...20 герц. Волны, порождаемые этим механизмом, вероятно, будут доминировать в полной совокупности регистрируемых откликов на фоне микросейсм от близких к полотну дороги дистанций и вплоть до нескольких сотен метров от него.

Согласно вышеизложенному, дальнейшее обсуждение касается поверхностных релеевских волн, возбуждаемых 3-м физическим механизмом. Предполагаются условия в виде равнинной местности и прямолинейных участков пути с рельсами, проложенными по невысокой насыпи. Поэтому при анализе и количественных оценках следует обратиться к приближенному (полуэмпирическому) подходу, при котором реальное земляное полотно моделируется как однородное полупространство с плоской верхней горизонтальной границей. Расчёт спектральной амплитуды сейсмического отклика (в лабораторной системе, связанной с приёмником), обусловленного совокупным источником, осуществляется по выражению для волновых смещений в поверхностной релеевской волне. При этом волна порождается на границе однородного упругого полупространства движущимся элементарным источником переменной силы, осциллирующим с частотой  $\omega_0$ , и имеет горизонтальную поляризацию, перпендикулярную движению источника. При выводе расчётных соотношений с учётом указанных упрощений используются формулы, полученные в работах [9, 10], описывающие упругие вертикальные смещения частиц на свободной границе  $z = 0$  в релеевской волне, возбуждаемой движущимся источником. В принципе этот же подход можно применить к поверхностной волне Лява [11] с учётом того, что её амплитудный максимум ориентирован в продольном направлении, то есть параллелен магистрали и совпадает с направлением вектора скорости, а также и к объёмным волнам, уходящим вглубь.

Поскольку интерес представляют спектральные (и угловые) характеристики волны (зависимость от частоты в точке приёма), то числовые коэффициенты, учитывающие амплитуду переменного сдвигового силового воздействия  $F$  (горизонтальной поляризации в направлении, перпендикулярном движению), и параметры плотности и упругости среды в формуле для вертикальных волновых смещений опущены. Таким образом, для расчёта используется следующее «укороченное» выражение:

$$u_{zj}^{Rayl} \Big|_{z=0} \sim \sqrt{\frac{\omega_0}{r_j (1 - (V/c_R) \cos \varphi_j)}} \sin \varphi_j \exp \left( -i \frac{\omega_0 (t - (r_j/c_R))}{1 - (V/c_R) \cos \varphi_j} - \frac{\omega_0 \Theta r_j}{2c_R (1 - (V/c_R) \cos \varphi_j)} \right).$$

Здесь:  $c_R$  — скорость релеевской волны;  $V$  — скорость поступательного движения источника;  $\Theta$  — декремент затухания (поглощения) релеевской волны;  $r_j = \sqrt{h^2 + x_j^2}$ ,  $x_j = j \cdot d$ , где  $d$  — условная дистанция между «излучающими звеньями»,  $h$  — дистанция между железнодорожным путём и приёмником, расположенным на траверзе (линии, пересекающей магистраль по перпендикуляру);

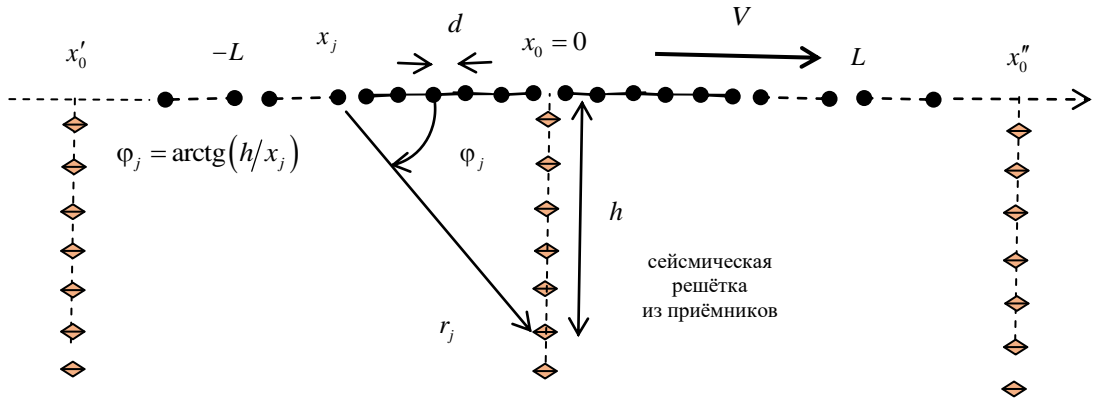


Рис. 2. Общий схематический вид многозвенного источника и приёмной сейсмической косы; ●● – звено источника (вагон); ◊ – элемент косы (приёмник)

$i$  — мнимая единица,  $\varphi_j$  — угол азимута элементарного источника в цепочке с номером  $j$  ( $-L < j < L$ ),  $\cos \varphi_j = x_j / \sqrt{h^2 + x_j^2}$ , при этом  $L$  — длина той части цепочки, где достигается превышение по уровню полезного сигнала над микросейсмами, а также предполагается известной (или «заданной») частота  $\omega_0$  преобладающих колебаний в каждом элементарном источнике (см. Рис. 2).

Отметим, что по порядку величины амплитуда колебательного воздействия силой  $F$  на рельсы со стороны движущегося источника достигает порядка  $\sim 10^3$  Н. Это замечание представляет интерес при поиске и выяснении условий снижения техногенного сейсмического или вибрационного воздействия на окружающую инфраструктуру.

Будем рассматривать когерентный многозвенный источник (состав) с синфазными силовыми воздействиями по его длине в момент времени, который соответствует его симметричному расположению относительно центральной линии траверса. На линиях траверса установлена приёмная сейсмическая коса (мобильная система сейсмической регистрации). Представляет интерес зависимость от времени  $t$  спектральных характеристик сигнала в области, отстоящей на дистанции  $h$  от приёмника. В этом случае для суммарного сейсмического отклика на свободной границе в виде поверхностных релеевских волн, генерируемых железнодорожным составом, движущимся со скоростью  $V$  по магистрали мимо сейсмоприёмной косы, нетрудно записать следующее выражение:

$$U(t) = \sum_{j=-L}^L \frac{\sqrt{\frac{(\omega_0 h / c_R)}{(1 - (V/c_R) \cos \varphi_j)}}}{\sqrt[4]{(1 + (x_j/h)^2)^3}} \exp \left[ -i \frac{\omega_0 \left( t - (h/c_R) \sqrt{1 + (x_j/h)^2} \right)}{1 - \frac{(V/c_R) \cdot (x_j/h)}{\sqrt{1 + (x_j/h)^2}}} - \frac{\omega_0 (\Theta h / 2c_R) \sqrt{1 + (x_j/h)^2}}{1 - \frac{(V/c_R) \cdot (x_j/h)}{\sqrt{1 + (x_j/h)^2}}} \right].$$

Суммирование предполагается лишь по той части цепочки  $2L$  из общей длины, на которой полезный сигнал превышает уровень микросейсмов. Длина этой части в принятых условных единицах  $d$  ввиду двух опорных тележек, приходящихся на длину вагона, равна половине длины вагона. При записи формулы для суммарного отклика учитывается доплеровское смещение частоты, возникающее в излучении элементарного источника в движущемся составе и приходящем к приёмнику от каждого из них.

Суперпозиция вкладов всех источников выполняется путём перехода к безразмерным переменным  $\zeta = h/d$ ,  $\tau = c_R t/h$ ,  $\varpi = \omega_0 d/c_R$ ,  $\omega_0 h/c_R = \varpi \zeta$  (где  $\omega_0$  — частота колебаний в системе, связанной с источником) с использованием замены дискретного суммирования по  $j$  интегрированием по  $\xi = x_j/d$ , что является идеализацией, упрощающей вычисления. Принимая это во внимание, приходим к следующей записи для суммарного отклика:

$$U(\tau, \zeta) = \int_{-L}^L \left( \frac{\sqrt{\varpi \zeta / \left( 1 - \frac{M(\xi/\zeta)}{\sqrt{1 + \xi^2/\zeta^2}} \right)}}{\sqrt[4]{(1 + \xi^2/\zeta^2)^3}} \right) e^{i \left( \left( -i \varpi \zeta \left( \tau - \sqrt{1 + \xi^2/\zeta^2} \right) \right) - \varpi \zeta (\Theta/2) \sqrt{1 + \xi^2/\zeta^2} \right) / \left( 1 - \frac{M(\xi/\zeta)}{\sqrt{1 + \xi^2/\zeta^2}} \right)} d\xi,$$

где  $M = V/c_R$ .

При вычислении спектра сигнала делается предположение, что уровни регистрируемого полезного сигнала и микросейсмов при прохождении серединой состава траверза в центре находятся в определённом взаимном соотношении (с превышением максимального уровня на траверзе над микросейсмками в несколько раз; далее принято 20 дБ), что в дополнение к спаду при волновом распространении ограничивает дальность «слышимости» полезного сигнала (на фоне шума), а следовательно, входит как определяющий фактор в вычисляемые далее спектральные соотношения. Уровень микросейсмков зависит от метеоусловий, а уровень полезного сигнала — от степени загруженности вагонов в составе. Спектр суммарного сигнала вычисляется как его Фурье-преобразование на временном промежутке (симметричном относительно нуля ввиду равномерности движения), на котором имеет место превышение сигналом уровня микросейсмков:

$$S(\nu, \zeta) = \int_{-L}^L \frac{\sqrt{\varpi \zeta / \left(1 - \frac{M(\xi/\zeta)}{\sqrt{1 + (\xi/\zeta)^2}}\right)} \sin \varpi L \left( \nu - 1 / \left(1 - \frac{M(\xi/\zeta)}{\sqrt{1 + (\xi/\zeta)^2}}\right) \right)}{\sqrt[4]{(1 + (\xi/\zeta)^2)^3} \left( \nu - 1 / \left(1 - \frac{M(\xi/\zeta)}{\sqrt{1 + (\xi/\zeta)^2}}\right) \right)} e^{(-\varpi \zeta \Theta \sqrt{1 + (\xi/\zeta)^2}) / \left(2 \left(1 - \frac{M(\xi/\zeta)}{\sqrt{1 + (\xi/\zeta)^2}}\right)\right)} d\xi, \quad (1)$$

где  $\nu = \omega/\omega_0$ ,  $\varpi = \omega_0 d/c_R = 1$ ,  $f_0 \approx \omega_0/(2\pi) \approx 1...20$  Гц,  $\varpi L \approx \frac{2}{\Theta} \ln\left(\frac{u_0}{u_{micr}}\right)$ . Соотношение (1) определяет

спад по частоте в спектре отклика. Кроме того, в него как параметр входит отношение уровня сигнала в максимуме  $u_0$  к уровню микросейсмков  $u_{micr}$ , которое задает «эффективную длину» части состава:

$$L \approx \frac{2}{\varpi \Theta} \ln\left(\frac{u_0}{u_{micr}}\right) = \frac{20}{\varpi \Theta \cdot 4,36} \lg\left(\frac{u_0}{u_{micr}}\right),$$

дискретные элементарные источники которой создают полезный сигнал с уровнем, превышающим уровень микросейсмков на приёмниках в точках центрального траверза.

#### 4. Спектральные амплитуды сигналов

Результаты вычисления спектральной амплитуды  $S(\nu, \zeta)$  при совпадении середины состава с центральным траверзом представлены на рисунке 3. Одна половина элементарных источников соответствует положительному сдвигу по частоте, а другая — отрицательному. Поэтому спектр суммарного сигнала имеет распределение относительно центра, близкое к симметричному. Рассматривается влияние увеличения скорости поступательного движения, при котором число Маха  $M = V/c$  принимает значения  $M = 0,1$  (Рис. 3а) и  $M = 0,3$  (Рис. 3б). Спектральная амплитуда изображается двумерным рельефом — в виде функции двух аргументов, одним из которых является безразмерная частота  $\nu$  в спектре сейсмических колебаний приёмника, нормированная на центральную частоту осцилляций  $\omega_0$  (измеряемую в системе самого источника). Другим аргументом служит  $\zeta = h/d$  — дистанция  $h$  от точки приёма до железнодорожного пути по линии траверза, также нормированная на «длину звена»  $d$ . Сечение этого рельефа при некотором  $\zeta$  представляет собой амплитудный спектр суммарного сейсмического отклика на фиксированном удалении от магистрали. Рельеф, изображающий спектральную амплитуду, представлен применительно к среде с невысоким значением декремента затухания, а именно  $\Theta = 0,2$ , и при отношении  $u_0/u_{micr} = 20$  дБ. Максимум в частотном распределении

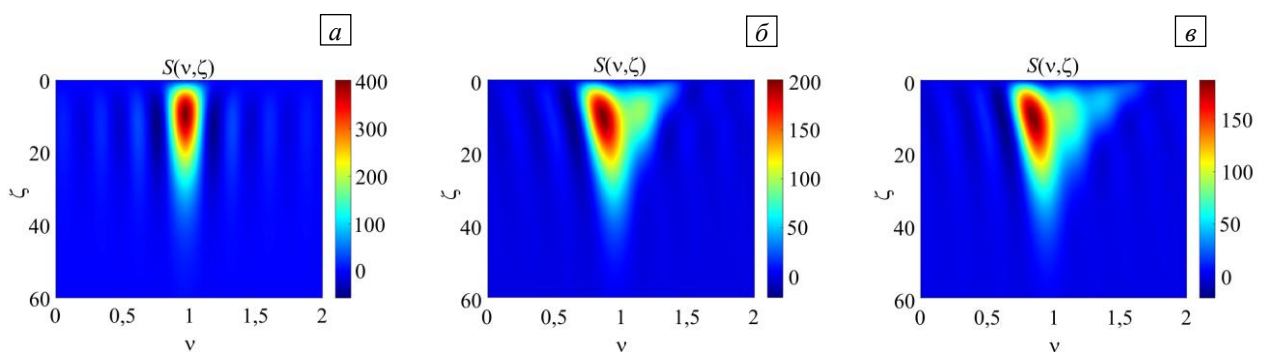


Рис. 3. Спектральная амплитуда сейсмических откликов  $S(\nu, \zeta)$ , зарегистрированных на центральной линии траверза при  $\Theta = 0,2$ ,  $\varpi = 1$ ,  $u_0/u_{micr} = 10$  и различных значениях числа Маха и параметра  $\beta$ :  $M = 0,1$ ,  $\beta = 0$  (а);  $M = 0,3$ ,  $\beta = 0$  (б);  $M = 0,3$ ,  $\beta = 0,3$  (в)

спектральных амплитуд достигается на незначительном расстоянии ( $h \sim 35...50$  м) от магистральной линии, после чего по мере удаления от неё точек регистрации уровень амплитуд падает. Ширина полосы частот при удалении точек регистрации также сужается, что связано с конкурирующим влиянием фактора волнового возбуждения и фактора волновой диссипации при распространении.

#### 4.1. Учёт дисперсии скорости распространения поверхностной волны

Описанные выше спектральные характеристики, рассчитанные в предположении простейшей модели однородной сплошной среды с плоской границей, необходимо преобразовать ввиду того, что реальная структура толщ грунта более сложная, поскольку имеет слоистый характер. Необходимость учёта усложненной структуры отвечает также первоначальной цели — анализу возможности выявления в волновом отклике (или в его спектре) признаков, свидетельствующих о присутствии неоднородности. Рассмотрим простейший случай, в котором неоднородностью является слой, покрывающий однородное полупространство со средой. Параметры слоя отличаются от нижележащей среды. В типичных равнинных условиях упругий слой, лежащий на упругом полупространстве, характеризуется пониженной плотностью и скоростью распространения поперечных волн относительно подстилающей среды. В такой структуре поверхностная волна становится «квазирелевской» — возникает набор волновых мод, ветви которых берут начало на критических частотах (если прибегнуть к оценочным расчётам):  $f_n = (c_{11}/2\pi h)(n)$ , где  $c_{11}$  — скорость волн сдвига в полупространстве. При низких частотах, примыкающих к нулю и простирающихся до следующего по порядку номера, возбуждается первая мода  $n=0$ ; при более высоких частотах преимущество по амплитуде приобретают моды с возрастающими значениями  $n$ . Взяв в качестве примера слой мощностью  $h=3$  м, при скорости волн сдвига  $c_{11}=200$  м/с получим в качестве частотного интервала, в котором только первая мода является возбуждаемой, а высшие моды не присутствуют, следующую величину:  $\Delta f \cong 0...20$  Гц. Указанный интервал предположительно соответствует первой — фундаментальной — моде поверхностных волн релеевского типа и рассматриваемому здесь физическому механизму вибровозбуждения грунта. На графике дисперсионных кривых — зависимостей фазовой скорости от частоты, эта мода изображается ветвью, спадающей от  $c_{\max}$  при  $f=0$  до  $c_{\min}$  при  $f \rightarrow \infty$ .

Для учёта влияния дисперсии в среде далее предлагается следующая простейшая аппроксимация зависимости скорости распространения  $c_R$ , теперь уже выраженной в относительных частотах  $v$ :

$$c_R(v) = \hat{c}_R - \Delta c \frac{2}{\pi} \arctg v = \hat{c}_R \left( 1 - \frac{\Delta c}{\hat{c}_R} \frac{2}{\pi} \arctg v \right) = \hat{c}_R (1 - \beta \cdot \arctg(v)), \quad \beta \leq \frac{2}{\pi}, \quad (2)$$

где  $\hat{c}_R = c_{\max}$ ,  $\Delta c = c_{\max} - c_{\min}$  — перепад значений фазовой скорости поверхностных волн на низких и на высоких частотах дисперсионной кривой первой моды, которая используется в расчёте спектральной амплитуды при подстановке выражения (2) для  $\hat{M} = V/\hat{c}_R$  в формулу (1).

Величина спада фазовой скорости с ростом частоты варьируется выбором параметра  $\beta$ , причём увеличение его значения соответствует росту контраста сдвиговой упругости в слое и подстилающем полупространстве, а при  $\beta=0$  — переходу к ранее рассмотренному случаю отсутствия дисперсии скорости у волны, когда среда не содержит подповерхностной границы и слоя. В дальнейших исследованиях предполагается выявление и анализ признаков присутствия поверхностных неоднородностей, не бесконечно протяжённых по латерали (в перпендикулярных к железнодорожному пути направлениях), а ограниченных.

На рисунке 3в демонстрируется рельеф, изображающий двумерную зависимость спектральной амплитуды отклика  $S(v, \zeta)$  при наличии дисперсии в поверхностной волне и соответствующий случаю движения состава с повышенной скоростью ( $\hat{M} = 0,3$ ,  $V \approx 50$  м/с,  $\hat{c}_R \approx 150...200$  м/с). Нетрудно видеть, что в этом случае в области рельефа, отвечающей близкой к магистрали дистанции, образуется локальный побочный максимум, который далее сменяется резким максимумом преобладающего уровня. С ростом контраста упругих параметров, а также при увеличении скорости движения на ближних к магистрали дистанциях происходит расширение частотной полосы и повышение в ней спектральной амплитуды, приводящее к образованию побочного максимума. Выявленная трансформация объясняется доплеровским смещением частоты спектральных амплитуд. Имеет место интерференция и перераспределение компонент, возникающих как с более низкой, так и с более высокой скоростью волнового распространения. Образование локального максимума составляет отличительный признак движения с повышенной скоростью многозвенного источника по границе среды со слоем и указывает на отличие от уже



рассмотренного случая движения по границе однородной среды. Присутствие локальных максимумов является одним из диагностических признаков слоистости структуры. Заметим, что такой максимум в указанной части спектра не образуется при движении с низкими скоростями, в том числе и при наличии дисперсии у волновой скорости.

При экспериментальных исследованиях вибрации грунта, порождаемой в натуральных условиях в процессе движения железнодорожного экспресса со скоростью 300 км/ч выполнялась регистрация интегрального уровня вибрации (вертикальных колебаний) поверхности грунта [6]. Интегральный уровень сигнала с увеличением расстояния от пути до приёмника в основном характеризуется спадом, за исключением локального подъёма и максимума (в интервале 15...30 м), сменяемого дальнейшим спадом с удалением от пути измерительных точек. При описании экспериментальных результатов, как правило, отсутствуют данные об особенностях в распределении спектральных компонент по частоте, в отличие от демонстрируемой зависимости уровня, что не позволяет сравнивать их с полученными теоретическими значениями. Дальнейший спад по уровню после локального максимума объясняется преобладанием ближнего поля вибрации и деформаций, сопровождающих движущуюся нагрузку. Однако наблюдаемое в эксперименте присутствие вышеупомянутого локального максимума можно объяснить доминированием в сейсмическом отклике вклада поверхностных волн на определённом интервале дистанций в условиях «высокоскоростного» движения, что является подтверждением теоретического обоснования, изложенного выше. При этом изображение спектральной амплитуды в виде рельефа на плоскости двух переменных  $\nu$ ,  $\zeta$  позволяет более детально рассмотреть её частотную зависимость на различных удалениях, что важно для диагностики присутствия подповерхностной границы. В частности, по оценкам данных с рисунка 3, максимум спектральной амплитуды должен достигаться на удалении от магистрали  $\zeta = 7...15$  ( $h \sim 35...50$  м). Более значительная по сравнению с экспериментально наблюдаемой теоретическая величина интервала дистанций связана с заниженным значением декремента затухания волны, взятого в качестве оценочного. Использование предположения о единственной возбуждаемой релеевской волне и когерентности виброисточников также приводит к тому, что представленная математическая модель не в полной мере описывает вибрационный отклик грунта в задаче волнового возбуждения.

#### 4.2. Спектры сейсмического отклика перед приближающимся и за удаляющимся составом

Представленные выше результаты соответствуют отклику, регистрируемому в установившемся режиме поступательного равномерного движения протяжённого многозвенного источника, а его приём выполняется в момент пересечения центральной траверзной линии точкой на середине длины железнодорожного состава. Как уже упомянуто в разделе 1, подход и вступление головной части движущегося состава на границу «невозмущенной» области как магистрали, так и её окрестностей вызывает переходные процессы в ближнем поле деформаций среды грунта и приводит к специфическим эффектам.

Аналогичных особенностей следует ожидать и в сейсмическом излучении, поэтому интересно выполнить сравнительный анализ спектральных характеристик сейсмических откликов при регистрации в трёх случаях: в точках на линии траверза, предшествующей приходу головной части состава через пункт  $x_0''$ ; при совпадении точки на середине длины состава с центральной линией траверза (с координатой  $x_0$ ); за хвостовой частью состава, что соответствует траверзу с координатой  $x_0'$  (см. Рис. 2). В случае одиночного источника (локального объекта автотранспорта) аналогичный анализ ранее уже проводился в [12].

Далее представим двумерные рельефы амплитудных спектров сигналов, регистрируемых в трёх указанных ситуациях, которые на практике можно упрощенно реализовать при использовании двух пространственно разнесённых кос.

Расчёт амплитудного спектра применительно к этим случаям выполнен по формуле (1) для линии приёма на траверзе  $x_0 = 0$ , а также для линий, смещённых влево ( $\xi' = x_0'/d = 30$ ), или вправо ( $\xi'' = x_0''/d = -30$ ). Такие параметры выбраны для размещения приёмной решетки за пределами не только длины «слышимости» полезного сигнала, но и длины состава: как перед головной, так и за хвостовой его частью.

Рассматриваются спектры сигнала, создаваемого составом, движущимся по границе полупространства, имеющего верхний покрывающий слой (показатель контраста  $\beta = 0,3$ ), при повышенной скорости движения  $\sim V = 50$  м/с, что соответствует  $\hat{M} = 0,3$ . На рисунке 4а представлен случай приёма на линии с координатой  $x_0''$ , на рисунке 4б — на линии  $x_0 = 0$ , на рисунке 4в — на линии  $x_0'$ . В первом и последнем случаях должен присутствовать сдвиг центральной частоты спектра суммарного сигнала наряду с уширением спектрального распределения. Из их сравнения нетрудно видеть, что на линии со стороны подхода головной части состава к траверзу  $x_0''$  частота в максимуме спектра выше, чем в максимуме



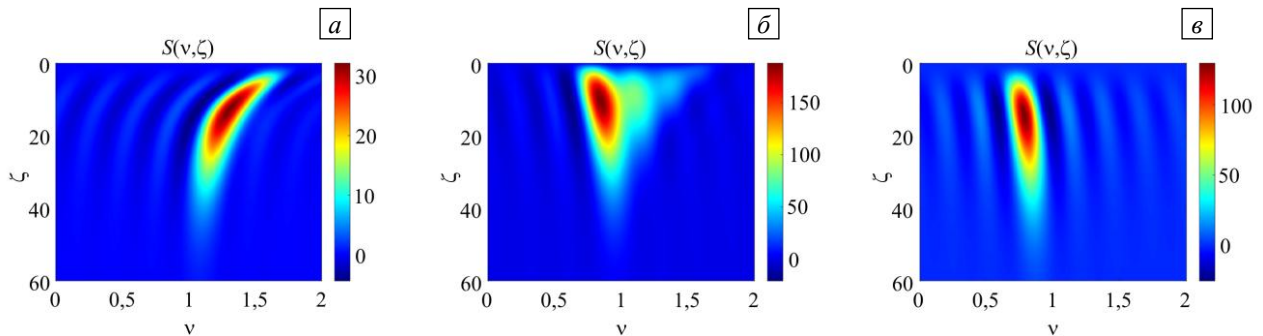


Рис. 4. Спектральная амплитуда сейсмических откликов, зарегистрированных при  $\varpi = 1$ ,  $M = 0,3$ ,  $u_0/u_{micr} = 10$ ,  $\Theta = 0,2$ ,  $\beta = 0,3$  на разных линиях приёма: при подходе состава,  $\xi'' = -30$  (а); на траверзе,  $\xi_0 = 0$  (б); за уходящим составом,  $\xi' = 30$  (в)

спектра у сигнала на траверзе  $x_0$ , которая, в свою очередь, выше, чем на линии  $x'_0$ . Также следует отметить, что спектральные амплитуды сигнала, регистрируемого в точках по обе стороны от центра, имеют существенно более низкий уровень относительно тех, которые соответствуют сигналу при нахождении срединной точки состава над центральной линией приёма, то есть в момент её симметричного расположения относительно линий приёмников перед и позади состава, причём более высокий уровень фиксируется за хвостом поезда.

Выявляемые различия в спектральном составе сигнала, регистрируемого перед головной и за хвостовой частями, могут использоваться в алгоритмах работы устройств удалённого контроля и диагностики параметров упругости среды, учитывающих признаки присутствия поверхностного слоя с резким контрастом в нём величины скорости распространения поверхностных сейсмических волн. Можно предположить, что признак, характеризующий неоднородность в виде слоя, следует рассматривать и как указатель присутствия локальной подповерхностной аномалии, ограниченной в размерах по горизонтальным координатам.

Существенной особенностью, возникающей и обнаруживающейся в случае заметного контраста по упругим параметрам верхнего (мелкого) слоя относительно подстилающей однородной среды и при повышенной скорости движения, является наличие в двумерном рельефе вблизи основного максимума еще одного (локального) максимума на близких к магистрали дистанциях, что свидетельствует о расширении частотной полосы спектра. Эта особенность присутствует в спектре сигнала, регистрируемого на центральном траверзе и в его ближней окрестности. Характерно повышение спектральных частот сигнала, фиксируемого на линии перед головной частью поезда. Указанные особенности могут найти применение при разработке алгоритмов реконструкции структуры земляного полотна железнодорожного пути, в перспективе их следует рассматривать и как информативный признак в удалённой диагностике локальных подповерхностных неоднородностей под магистралью.

Отметим, что в представленном рассмотрении не затронут анализ объёмных волн (волн сжатия)  $P$  и волн сдвига  $SV$ ,  $SH$ , возбуждаемых быстро движущимся составом. Эти волны уходят вглубь земной толщи, а затем отражённые и рассеянные границами раздела слоёв, глубоко залегающих в недрах, возвращаются к свободной границе. Их селективная регистрация на фоне микросейсм и других волновых типов может использоваться при сеймопрофилеировании в целях поиска залежей полезных ископаемых в ареалах, прилегающих к магистралям.

Завершая, скажем, что вышеизложенные вопросы востребованы в связи с перспективой осуществления высокоскоростного движения на отечественных железнодорожных магистралях. В мировой практике в последнее время появились примеры введения в эксплуатацию участков с высокоскоростным движением поездов со скоростями  $V = 200...300$  км/ч.

## 5. Заключение

Получены расчётные соотношения для спектральной амплитуды сейсмического отклика, возникающего при движении железнодорожного состава, на расстояниях от пути в первой сотне метров. Рассматривается сейсмический отклик, возбуждаемый взаимодействием в системе «колёсная пара–рельсы» при движении состава на скоростях до  $\sim 50$  м/с. При этом предполагается доминирование поверхностной волны релевского типа в диапазоне частот приблизительно до двух десятков герц и не учитывается влияние на отклик ближнего поля деформаций. Для среды, по поверхности которой проложен путь, используется упрощенная модель структуры «слой–полупространство». Результаты представлены в виде двумерного рельефа на плоскости переменных «частота–удаление по перпендикуляру от магистрали». Расчётные зависимости спектральной амплитуды от удалённости точек регистрации (в пределах первых сотен метров), от скорости движения поезда и от контраста параметров упругости в слое и в подстилающей толще качественно соответствуют данным экспериментальных замеров, представленным в литературе.

На основе рассмотрения сейсмических откликов обсуждается возможность текущего контроля глубины залегания границы раздела слоя и среды, а также оценки параметров упругости материала в слое и в полупространстве. Предполагается, что особенности в спектре отклика, проявляющиеся при повышенных скоростях движения, могут быть применены при построении систем мониторинга грунтовой толщи под железнодорожными путями, при диагностике её структуры, выявления информативных признаков присутствия локальных неоднородностей, например, карстового происхождения.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект 0030-2021-0018).

## Литература

1. Connolly D.P., Giannopoulos A., Fan W., Woodward P.K., Forde M.C. Optimising low acoustic impedance back-fill material wave barrier dimensions to shield structures from ground borne high speed rail vibrations // *Construct. Build. Mater.* 2013. Vol. 44. P. 557-564. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.034>
2. Волков В.А., Владов М.Л., Граминовский Н.А., Капустин В.В., Калинина А.В., Аммосов С.М., Марченков А.Ю. Оценка вибрационного воздействия подвижного состава на здания и сооружения вдоль скоростной магистрали «Москва-Казань-Екатеринбург» // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: Материалы докладов XIII Общероссийской конференции изыскательских организаций, Москва, 28 ноября – 1 декабря 2017. М.: Геомаркетинг, 2017. С. 363-364.
3. Крылатков С.М., Крылаткова Н.А., Нещеткин О.Б. Исследование карстоопасных участков железных дорог с помощью сейсморазведки // *Известия Уральской государственной горно-геологической академии.* 2003. Вып. 18. С. 177-187.
4. Орлова И.П., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Басакина И.М. Опыт сейсмического исследования гетерогенной среды земляного полотна железнодорожного пути // *Механика композиционных материалов и конструкций сложных гетерогенных сред: Сб. трудов 8-й Всероссийской конференции с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского,* Москва, 18-19 декабря 2018 г. М.: ИПМ РАН, 2019. С. 329-335.
5. Способ выявления неоднородных участков земной поверхности вдоль железнодорожного полотна: а.с. 1541551 СССР: G 01 V 1/00 / 1985; а.с. 342151 СССР: G 01 V 1/00 / 1972. Кротов Н.В. – № 2069873; заявл. 21.07.1992; опубл. 27.11.1996.
6. Connolly D.P., Kouroussis G., Giannopoulos A., Verlinden O., Woodward P.K., Forde M.C. Assessment of railway vibrations using an efficient scoping model // *Soil Dynam. Earthquake Eng.* 2014. Vol. 58. P. 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.12.003>
7. Баженов В.Г., Дюкина Н.С. Численное исследование взаимодействия сооружений с грунтовым основанием при сейсмических воздействиях // *Вычисл. мех. сплош. сред.* 2012. Т. 5, № 1. С. 19-24. <http://dx.doi.org/10.7242/1999-6691/2012.5.1.3>
8. Гольдштейн Р.В. Волны Рэлея и резонансные явления в упругих телах // *ПММ.* 1965. Т. 29, № 3. С. 516-525. (English version [https://doi.org/10.1016/0021-8928\(65\)90066-3](https://doi.org/10.1016/0021-8928(65)90066-3))
9. Ben-Menahem A. Radiation of seismic surface-waves from finite moving sources // *Bulletin of the Seismological Society of America.* 1961. Vol. 51. P. 401-435.
10. Заславский Ю.М. Об особенностях рэлеевских волн, возбуждаемых равномерно движущейся по поверхности осциллирующей силой // *Акустический журнал.* 1988. Т. 34, № 3. С. 536-538.
11. Заславский Ю.М. Волны Лява, возбуждаемые движущимся источником // *Акустический журнал.* 2016. Т. 62, № 1. С. 87-94. <https://doi.org/10.7868/S0320791915060155>
12. Заславский Ю.М., Заславский В.Ю., Соков А.М. Акустическое и сейсмическое поле движущегося источника шума и вибрации (регистрация решеткой микрофонов и сейсмической косой) // *Ученые записки физического факультета Московского университета.* 2017. № 5. 1751405.

## References

1. Connolly D.P., Giannopoulos A., Fan W., Woodward P.K., Forde M.C. Optimising low acoustic impedance back-fill material wave barrier dimensions to shield structures from ground borne high speed rail vibrations. *Construct. Build. Mater.*, 2013, vol. 44, pp. 557-564. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.034>
2. Volkov V.A., Vladov M.L., Graminovskiy N.A., Kapustin V.V., Kalinina A.V., Ammosov S.M., Marchenkov A.Yu. 8th Russian Conference of survey organizations "Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation", Moscow, 28 November - 1 December, 2017. Moscow, Geomarketing, 2017. Pp. 363-364.
3. Krylatkov S.M., Krylatkova N.A., Neshchetkin O.B. Issledovaniye karstoopasnykh uchastkov zheleznykh dorog s pomoshch'yu seysmorazvedki [Investigation of karst-hazardous sections of railways using seismic prospecting]. *Izvestiya Ural'skoy gosudarstvennoy gorno-geologicheskoy akademii – News of the Ural State Mining University*, 2003, no. 18, pp. 177-187.
4. Orlova I.P., Kapustyan N.K., Antonovskaya G.N., Basakina I.M. 8th Russian Conference with international participation named after I.F. Obraztsov and Yu.G. Yanovsky "Mechanics of composite materials and structures of complex heterogeneous media", 18-19 December, 2018, Moscow, IPM RAS, 2019. Pp. 329-335.
5. Krotov N.V. A method for identifying inhomogeneous areas of the earth's surface along the railroad bed. RF Copyright Certificate No 2,069,873 27 November 1996.

6. Connolly D.P., Kouroussis G., Giannopoulos A., Verlinden O., Woodward P.K., Forde M.C. Assessment of railway vibrations using an efficient scoping model. *Soil Dynam. Earthquake Eng.*, 2014, vol. 58, pp. 37-47. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.12.003>
7. Bazhenov V.G., Dyukina N.S. Numerical study of structure-subsoil interactions under seismic effects. *Vychisl. mekh. splosh. sred – Computational Continuum Mechanics*, 2012, vol. 5, no. 1, pp. 19-24. <http://dx.doi.org/10.7242/1999-6691/2012.5.1.3>
8. Gol'dshtein R.V. Rayleigh waves and resonance phenomena in elastic bodies. *J. Appl. Math. Mech.*, 1965, vol. 29, pp. 608-619. [https://doi.org/10.1016/0021-8928\(65\)90066-3](https://doi.org/10.1016/0021-8928(65)90066-3)
9. Ben-Menahem A. Radiation of seismic surface-waves from finite moving sources. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1961, vol. 51, pp. 401-435.
10. Zaslavskiy Yu.M. Ob osobennostyakh r-eleyevskikh voln, vzbuzhdayemykh ravnomerno dvizhushcheysoya po poverkhnosti ostsilliruyushchey siloy [On the features of Rayleigh waves excited by an oscillating force uniformly moving over the surface]. *Akusticheskiy zhurnal – Soviet physics. Acoustics*, 1988, vol. 34, no. 3, pp. 536-538.
11. Zaslavskii Yu.M. Love waves excited by a moving source. *Acoust. Phys.*, 2016, vol. 62, pp. 89-96. <https://doi.org/10.1134/S1063771015060159>
12. Zaslavsky Yu.M., Zaslavsky V.Yu., Sokov A.M. Acoustic and seismic field of movable sources of the noise and vibration. *Uchenyye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo universiteta – Moscow University Physics Bulletin*, 2017, no. 5, 1751405.

*Поступила в редакцию 11.02.2021; после доработки 17.04.2021; принята к опубликованию 19.04.2021*

---

*Сведения об авторах*

*Заславский Юрий Михайлович*, дфмн, внс, Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46; e-mail: [zaslav@appl.sci-nnov.ru](mailto:zaslav@appl.sci-nnov.ru)

*Заславский Владислав Юрьевич*, кфмн, снс, ИПФ РАН; e-mail: [zas-vladislav@appl.sci-nnov.ru](mailto:zas-vladislav@appl.sci-nnov.ru)