

Определение *in situ* упругих свойств нижнего строения железнодорожного пути при сейсмометрических наблюдениях

© 2020 г. Г.Н. Антоновская¹, И.П. Добровольский², Н.К. Капустян^{1,2},
И.П. Орлова²

¹ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
имени академика Н.П. Лаверова РАН, г. Архангельск, Россия

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

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

Аннотация

По результатам сейсмометрических наблюдений вибраций при прохождении поезда показана возможность определения упругих параметров земляного полотна железнодорожного пути. Обоснование методики мониторинга получено при анализе собственных экспериментальных данных и теоретического рассмотрения при хорошем согласии теории и эксперимента. Как составная часть методики рассмотрены требования к регистрирующей аппаратуре и указаны наиболее подходящие типы датчиков – Trillium Compact-120s, которые можно располагать вблизи полотна на безопасном от него расстоянии. Такой датчик с соответствующим регистратором и программой оперативной обработки записей может быть включен в комплекс методов мониторинга состояния земляного полотна. Приведенные оценки разрешающей способности предлагаемой методики показывают, что она является достаточно чувствительной для выявления деформационных свойств грунтов на ранней стадии их деградации, что особенно важно для многолетнемерзлых грунтов.

Ключевые слова: земляное полотно, нижнее строение железнодорожного пути, вибрации от подвижного состава, сейсмическая аппаратура, расчеты теории упругости

Цитируйте эту статью как: 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>

Введение

Разработка способов определения деформационных свойств горных пород в условиях их естественного залегания (*in situ*) приобретает практическую важность для грунтов оснований зданий и сооружений, в частности для обеспечения безопасности железнодорожного движения. Существенно, что в России дороги, особенно на Севере и в Сибири, проходят по территориям со сложными грунтовыми условиями, например многолетнемерзлые породы в России распространены на 67 % территории страны. Техногенная нагрузка и изменение климата способствуют деградации грунтов.

Несмотря на большое количество натуральных и теоретических исследований по оценке динамической устойчивости железнодорожных насыпей (см., например, [Zhang, Dhanasekar, 2012; Коншин, 2004; Железнодорожный..., 2013; Аунуз, Шмаков, 2019; Каспржицкий и др., 2019]), существующие знания не в полной мере отражают степень влияния реальной вибрационной нагрузки от подвижного состава, что показали

новейшие исследования [Капустян и др., 2018; Антоновская и др., 2019], которые выявили особенности деформирования нижнего строения пути (грунтов насыпи совместно с ее основанием) на низких частотах и вовлеченность в процесс деформирования грунтов с больших глубин, чем это считалось ранее. Результаты получены с помощью сейсмических датчиков, размещаемых на берме у основания откоса. Здесь наиболее важным и сложным является установление соответствия между показаниями датчика (велосиметра, акселерометра) и так называемыми “истинными” движениями среды, т.е. перемещениями [Грайзер, 1984]. Теоретически задача должна исследоваться методами механики твердой деформируемой среды, и настоящая работа посвящена этому вопросу, что дает обоснование для разработки методики обработки экспериментальных данных.

Существенным для безопасности движения поездов является комплекс способов определения состояния нижнего строения пути не по образцам, а *in situ*, реализованный, например, в специализированных путевых экипажах [Железнодорожный..., 2013]. Тем не менее существующая технология не позволяет выявить ослабление основания пути на достаточно ранней стадии. Это связано с разрешающей способностью методов; ее существенное увеличение возможно лишь при использовании подходов, основанных на так называемых динамических характеристиках волнового поля (амплитуды, спектры и пр.). Эти параметры на один-два порядка более чувствительны к свойствам среды [Капустян, Юдахин, 2007], чем кинематика (времена вступлений волн). Для практики важно также, что могут использоваться пассивные наблюдения, не требующие специализированного источника. Это микросейсмы, техногенные источники механических вибраций; одним из них может служить движущийся путевой экипаж (поезд, дрезина и пр.). Принципиальная возможность этого обсуждалась ранее [Антоновская и др., 2019].

Целью данной статьи является рассмотрение возможности и обоснование методики определения *in situ* упругих свойств грунтов нижнего строения железнодорожного полотна при прохождении путевого экипажа по результатам сейсмометрических наблюдений при установке датчика вблизи насыпи. Для этого была поставлена и решена задача определения воздействия поезда на насыпь; результаты теоретического рассмотрения сопоставлены с экспериментальными данными.

Экспериментальные данные

Сейсмометрические наблюдения велись на Северной железной дороге вблизи п. Онега Архангельской обл.; более подробно см. [Антоновская и др., 2017]. Были выполнены сейсморазведочные работы для определения строения насыпи и параметров земляного полотна и грунтов основания. Одновременно у основания насыпи (на берме) на глубине 1 м велась регистрация двумя типами широкополосных 3-компонентных сейсмологических датчиков-велосиметров TRI (Trillium Compact-120s с регистратором Centaur (Nanometrics, Канада)) и PSS (CMG-6TD, Güralp Systems Limited, Великобритания). На рис. 1 приведен пример записей вертикальной компоненты скоростей смещения (Z) при проходе грузового состава (регистрация в широкой полосе частот и при полосовой фильтрации 0.01–0.1 Гц). Обратим внимание на следующее:

- высокочастотные вибрации при прохождении грузового состава по амплитуде превосходят низкочастотные более чем на два порядка;
- низкочастотные колебания характеризуются своеобразной волновой формой с двумя интенсивными всплесками в виде периода синусоиды в начале и в конце записи, причем эти начальная и хвостовая синусоиды – в противофазе;
- вступление первой по времени синусоиды практически совпадает с вступлением интенсивных колебаний на высокочастотной записи, а хвостовая синусоида вступает позже спада высокочастотных колебаний, т.е. эти колебания происходят после прохода состава мимо датчика.

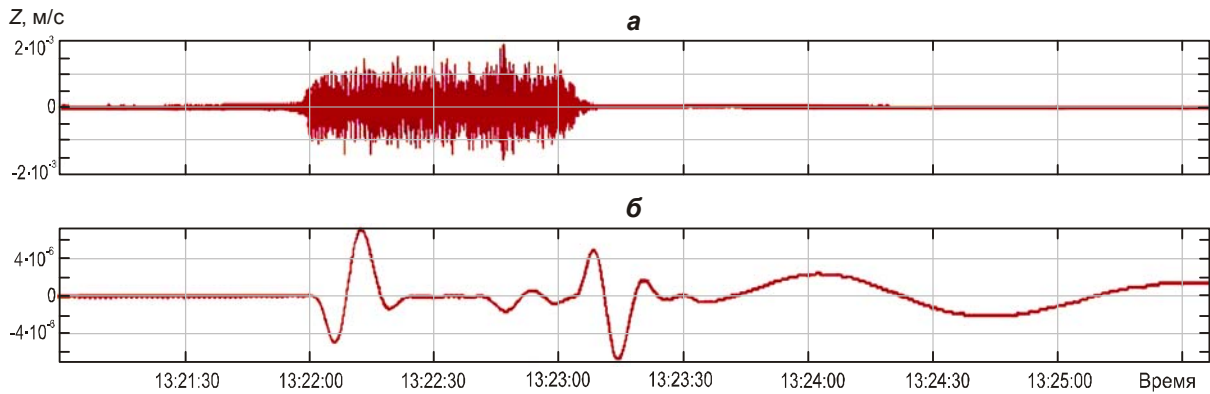


Рис. 1. Пример вертикальной (Z) компоненты сейсмической записи прохождения грузового состава: a – в широкой полосе частот; b – фильтрация 0.01–0.1 Гц

Полученная волновая форма скоростей смещений, подобная периоду синусоиды, соответствует наблюдавшимся ранее смещениям в подрельсовом сечении, создаваемым колесной парой движущегося экипажа [Коншин, 2004; Железнодорожный ..., 2013].

Рассмотрим возможность использования низкочастотной волновой формы, прежде всего в начале записи, для определения параметров деформирования грунтов. Для этого исследуем устойчивость волновой формы Z -компоненты для набора записей прохождения грузовых составов (рис. 2, a). Видно, что сохраняется тип волновой формы, описанный выше, т.е. наличие интенсивных экстремумов в начале и в конце записи. Между ними могут быть как небольшие по амплитуде колебания, так и заметные всплески. Длительность волновой формы также различна, причем более короткой соответствуют более интенсивные всплески в интервале между основными фазами

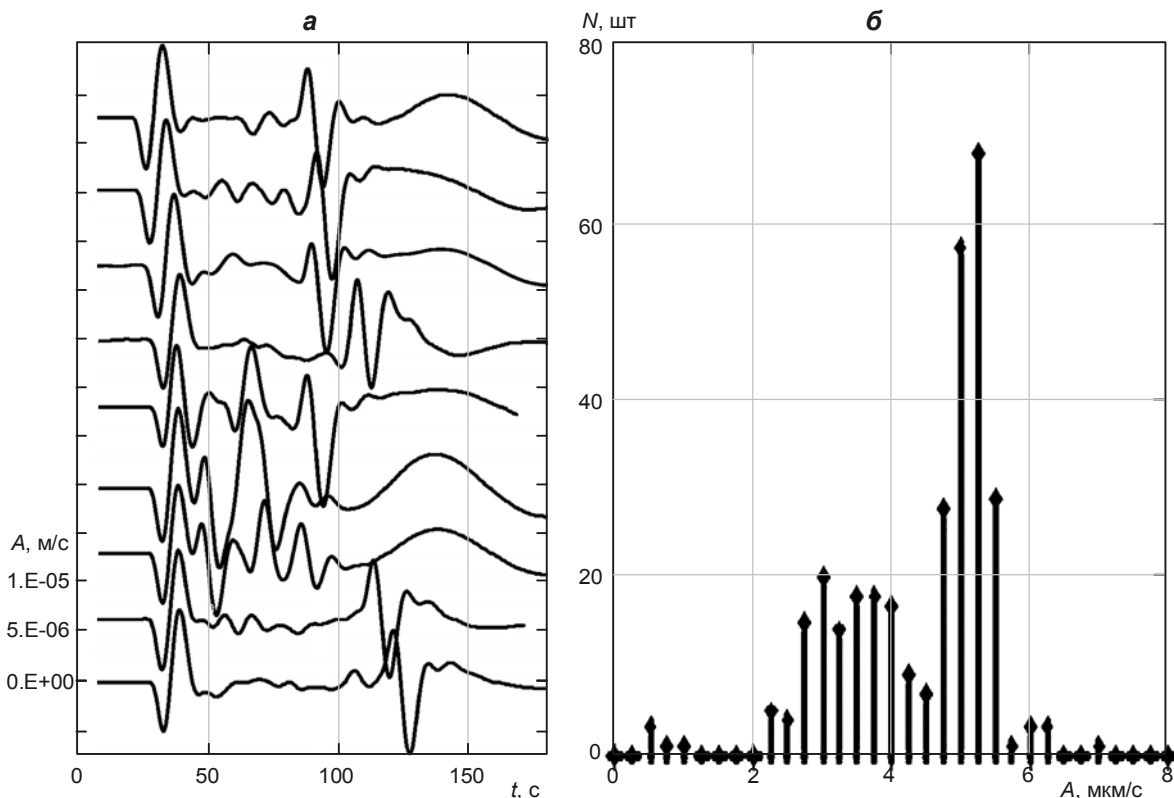


Рис. 2. Волновые формы Z -компоненты записи велосиметра в полосе 0.01–0.1 Гц при прохождении грузовых составов, записи совмещены по первым вступлениям (a); распределение амплитуд первого минимума волновых форм (b)

(начальной и конечной). В связи с тем, что наилучшая повторяемость присуща первому минимуму, его амплитуда A (отсчитываемая от нулевой линии) была принята для дальнейшего анализа.

Достаточно длительная регистрация (в течение недели) в 2019 г. позволила получить распределение величин A (рис. 2, б). Гистограмма представлена тремя группами событий: в интервале 4.5–6 мкм/с колебания соответствуют груженным составам; 2.5–4.5 мкм/с – пассажирские поезда, груженные дрезины и пр.; менее 2.5 мкм/с – отдельные негруженные экипажи. Оценка медианы и стандартного отклонения для груженных составов дает значения 5.01 и 0.04 мкм/с соответственно. Таким образом, по экспериментальным данным величина A мало зависит от таких параметров состава, как тип вагонов и длина поезда. Величина скорости поезда регламентируется нормами и расписанием, составляя около 70 км/ч, и, по-видимому, ее вариации невелики для груженных составов.

Повторяемость волновой формы и значений амплитуд A показывает, что этот параметр может быть использован для мониторинга состояния грунтов *in situ*, т.е. для наблюдений при стационарной установке датчика в выбранной точке. Для этого была сделана предварительная оценка такой возможности по материалам наблюдений 2017 и 2019 гг. (19 и 210 поездов соответственно) в одной и той же точке регистрации (таблица). Несмотря на малое количество измерений в 2017 г., видно существенное отличие (в 1.5 раза) амплитуд по сравнению с таковыми в 2019 г., что может быть объяснено разными упругими свойствами грунтов при длительном засушливом периоде в августе 2017 г. и оттаиванием грунтов и дождями в апреле 2019 г.

Статистические оценки A по результатам регистрации 2017 и 2019 гг.

Оценка амплитуды	Значение оценки, мкм/с	
	2017 г.	2019 г.
Медиана	7.5	5.01
Стандартное отклонение	0.5	0.04

Подбор типа регистрирующей аппаратуры

Для разработки методики мониторинга состояния грунтов земляного полотна путем измерения амплитуд записи скоростей смещения у основания насыпи важно определить, какие из современных датчиков наиболее подходят для этой цели. Рассматриваются низкочастотные колебания в полосе 0.01–0.1 Гц, т.е. для этих частот велосиметры имеют преимущества перед акселерометрами. Помимо регистрации низкочастотных сигналов, существенна также запись более высоких частот, до примерно 20 Гц или даже выше, т.е. датчики должны быть широкополосными. Как отмечалось при обсуждении рис. 1, низкочастотная составляющая значительно меньше высокочастотной, т.е. необходим датчик с большим динамическим диапазоном. В экспериментах 2017 г. регистрация велась велосиметрами TRI и PSS, отвечающими этим требованиям.

Для мониторинга важна хорошая повторяемость записей и, соответственно, значений A . Здесь следует рассмотреть два фактора: повторяемость амплитудно-частотной характеристики для разных типов датчиков и влияние условий установки при замене датчика. Три датчика-велосиметра были размещены на берме вдоль пути с интервалом 30 м, при этом два – одного типа (TRI), между ними – другого (PSS). На рис. 3, а приведены отрезки записей прохождения дрезины; виден временной сдвиг, что соответствует движению со скоростью примерно 60 км/ч. Для всех датчиков наблюдается подобие волновых форм, особенно первого минимума и максимума, но соотношение амплитуд максимума и второго минимума примерно одинаково для обоих датчиков TRI и иное для PSS.

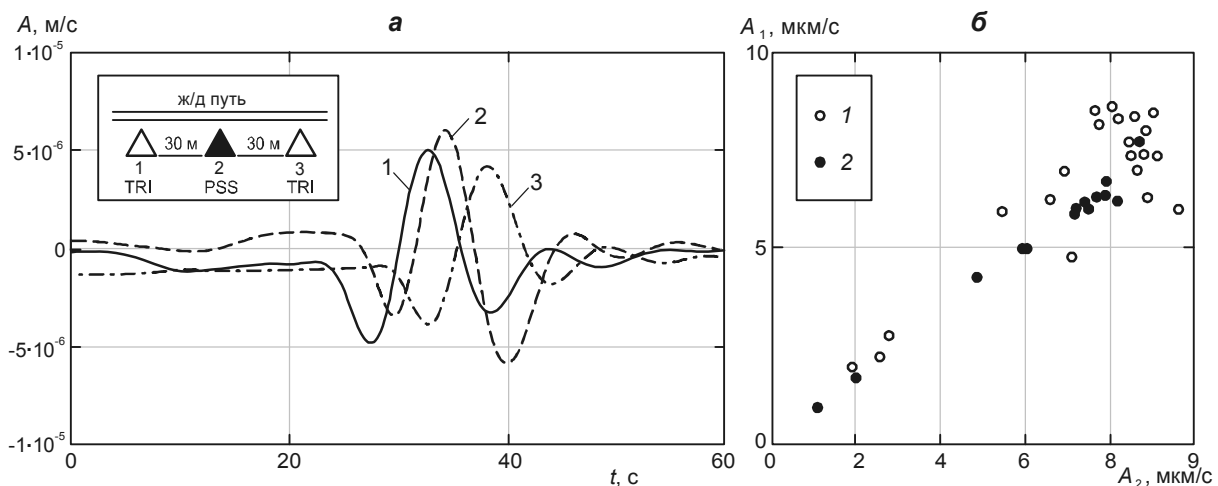


Рис. 3. Волновые формы записей Z -компоненты разными датчиками в полосе 0.01–0.1 Гц при прохождении дрезины (а) и диаграмма разброса значений амплитуд A , записанных одновременно датчиками 1 и 2 (б): 1 – PSS1 и PSS2; 2 – TRI1 и TRI2

Учитывая, что при наблюдениях определение свойств грунтов предлагается производить по величинам A , важно оценить их погрешность при наблюдении разными экземплярами датчиков одного типа. Для этого в экспериментах с одновременной регистрацией разными датчиками были подобраны записи прохождения экипажей всех типов. Для волновых форм после фильтрации 0.01–0.1 Гц определялась величина A и строились диаграммы разброса амплитуд, измеренных попарно для стоящих рядом датчиков 1 и 2 (рис. 3, б). Видно, что для TRI1 и TRI2 точки ложатся практически на одну прямую, стандартное отклонение составляет 0.09 мкм/с, т.е. примерно 1 % от измеряемой величины. Этот тип датчиков нечувствителен к условиям установки; наклон прямой может быть устранен при более тщательной калибровке. Для датчиков типа PSS разброс точек значительно больший – 0.4 мкм/с, т.е. примерно 5 % от A , что может осложнять их использование для мониторинга.

Расчет деформирования линейно-упругой среды вне насыпи при прохождении поезда

Приведенные выше экспериментальные данные составляют предмет теоретического рассмотрения, которое является основой предлагаемой методики. Рассматриваемые теоретические задачи являются, вообще говоря, динамическими. Однако, если принять во внимание характерные размеры, скорость нарастания нагрузки и скорость распространения упругих волн, то хорошим приближением будет процесс, проходящий через множество равновесных состояний. Иными словами, в теоретическом исследовании будут использоваться статические задачи, в которых время играет роль параметра. Работа носит в значительной степени методический характер.

Исходные сведения. Общая схема задачи приведена на рис. 4. В декартовой системе координат (x, y, z) полупространство занимает область $z \geq 0$. На полупространстве расположена насыпь, имеющая в сечении форму трапеции, в которой высота значительно меньше ширины; по существу, это толстая пластина со скошенными краями. Нагрузка, естественно, приложена к верхней плоскости насыпи, и насыпь в этом смысле является объектом передачи нагрузки на поверхность полупространства. Ниже будут обсуждаться разные формы передачи нагрузки. В итоге мы получаем задачу о деформировании полупространства под действием системы сил, приложенных к поверхности. Полупространство считается линейно-упругим, и мы полагаем, что для такого

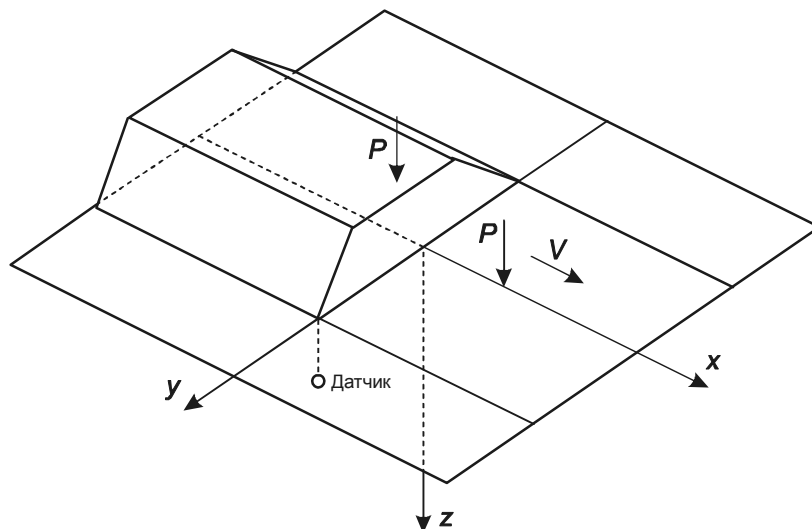


Рис. 4. Общая схема задачи

допущения имеются достаточные основания. Кроме того, полупространство принято изотропным, однородным, а нагрузки – вертикальными. Важно отметить: задача исследуется только для датчика, расположенного *вне зоны* приложения реальной нагрузки.

Нагрузку на рельсы и далее осуществляют колесные пары. Следовательно, элементом нагрузки является нагрузка от одной колесной пары, и прежде всего будет рассматриваться этот случай. Действие нескольких элементарных нагрузок, в том числе распределенных по площади, вычисляется по принципу суперпозиции.

В таком приближении для рассматриваемой проблемы исходной становится задача Буссинеска. Задача Буссинеска – это статическая задача о вертикальной сосредоточенной силе, приложенной к поверхности линейно-упругого однородного изотропного полупространства. Задача рассматривается в декартовой системе координат (x, y, z) для полупространства $z \geq 0$. Вектор перемещения \mathbf{u} имеет компоненты (u, v, w) вдоль осей (x, y, z) соответственно. Решение задачи Буссинеска для перемещений имеет вид (см., например, [Новацкий, 1975]):

$$\begin{aligned} u_1 &= P(X, Y) \frac{x - X}{4\pi\mu} \left(\frac{z}{R^3} - \frac{1 - 2\nu}{R(R + z)} \right); \\ v_1 &= P(X, Y) \frac{y - Y}{4\pi\mu} \left(\frac{z}{R^3} - \frac{1 - 2\nu}{R(R + z)} \right); \\ w_1 &= P(X, Y) \frac{1}{4\pi\mu} \left(\frac{z^2}{R^3} + \frac{2(1 - \nu)}{R} \right), \end{aligned} \tag{1}$$

где P – вертикальная сила; μ – модуль сдвига; ν – коэффициент Пуассона; (x, y, z) – координаты точки датчика; (X, Y) – точка приложения силы; $R = \sqrt{(x - X)^2 + (y - Y)^2 + z^2}$.

Изотропная среда характеризуется двумя независимыми модулями. Между различными вариантами этих модулей имеются определённые соотношения (например, [Ломакин, 1976]):

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad K = \lambda + \frac{2}{3}\mu = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}, \quad \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}, \\ E &= \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}, \quad \lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} = \frac{2\nu\mu}{1 - 2\nu}, \quad E = \frac{9\mu K}{3K + \mu}, \quad \lambda = K - \frac{2}{3}\mu, \end{aligned} \tag{2}$$

где λ , μ – постоянные Ламе; E – модуль Юнга (модуль продольной упругости); K – модуль объемного деформирования (объемный модуль). Соотношения (2) позволяют выбрать для конкретной задачи наиболее удобную пару модулей.

Подвижная сосредоточенная сила. Предположим, что движущийся объект моделируется сосредоточенной силой. Предполагается также, что эта сила без изменений (например, диссипации) переносится на поверхность полупространства. Тогда на поверхности мы рассматриваем силу P , движущуюся вдоль оси x со скоростью V . Точка наблюдения расположена на оси y . Следовательно, в третьей формуле (1) полагаем $X=Vt$, $Y=0$, $x=0$. Здесь и далее будут обсуждаться только вертикальные перемещения, поскольку для других составляющих из (1) все производится аналогично. Итак, имеем перемещение и скорость перемещения в виде

$$w = \frac{P}{4\pi\mu} \left(\frac{z^2}{R^3} + \frac{2(1-\nu)}{R} \right),$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{pV^2t}{4\pi\mu} \left(\frac{3z^2}{R^5} + \frac{2(1-\nu)}{R^3} \right),$$
(3)

где $R = \sqrt{(Vt)^2 + y^2 + z^2}$.

В формулах (3) момент $t=0$ соответствует положению, когда сила находится напротив датчика. Если вместо Vt подставить $Vt-l$, то получим силу, движущуюся на l метров позже силы с Vt . Таким приемом можно получить результат от одновременного действия нескольких сил.

Подвижная сила, распределенная по площади. Наиболее точно будет отражать реальность ситуация с произвольной нагрузкой по площади. В общем случае считаем, что действует распределенная по площади S нагрузка плотностью $q(x, y)$. Размерность q Н/м². Тогда общая сила

$$P = \iint_S q(x, y) dy dx. \quad (4)$$

Третья формула из (1) получает вид

$$w_1(X, Y, t) = \frac{q(X-Vt, Y)}{4\pi\mu} \left(\frac{z^2}{R^3} + \frac{2(1-\nu)}{R} \right), \quad (5)$$

где $R = \sqrt{X^2 + (Y-y)^2 + z^2}$.

В итоге перемещение определяется формулой

$$w = \iint_{S(t)} w_1(X, Y, t) dY dX. \quad (6)$$

Колебательная скорость (амплитуда сейсмограммы) определяется как производная по времени от этого выражения. Конкретный вид (6) зависит от вида нагрузки и формы области. Ниже рассмотрим два частных случая. Формулы для них получаются более конкретными, что позволяет относительно простыми способами оценить реальную ситуацию.

В случае нагрузки, равномерно распределенной по длине в прямоугольнике $L \times 2b$, полная нагрузка имеет вид

$$P = L \int_{-b}^b q(y) dy. \quad (7)$$

Третья формула из (1)

$$\bar{w}(X, Y) = \frac{q(Y)}{4\pi\mu L} \left(\frac{z^2}{R^3} + \frac{2(1-\nu)}{R} \right), \quad (8)$$

где $R = \sqrt{X^2 + (Y-y)^2 + z^2}$.

Перемещение и скорость колебаний датчика

$$w = \int_{Vt-\frac{L}{2}}^{Vt+\frac{L}{2}} \int_{-b}^b \bar{w}(X, Y) dY dX, \tag{9}$$

$$\frac{dw}{dt} = V \left[\int_{-b}^b \bar{w} \left(Vt + \frac{L}{2}, Y \right) dY - \int_{-b}^b \bar{w} \left(Vt - \frac{L}{2}, Y \right) dY \right].$$

Для нагрузки, равномерно распределенной по площади в прямоугольнике $L \times 2b$, для третьей формулы из (1) имеем:

$$w_s(X, Y) = \frac{P}{8\pi\mu Lb} \left(\frac{z^2}{R^3} + \frac{2(1-\nu)}{R} \right), \tag{10}$$

где $R = \sqrt{X^2 + (Y - y)^2 + z^2}$.

Тогда перемещение и скорость колебаний датчика

$$w = \int_{Vt-\frac{L}{2}}^{Vt+\frac{L}{2}} \int_{-b}^b w_s(X, Y) dY dX, \tag{11}$$

$$\frac{dw}{dt} = V \left[\int_{-b}^b w_s \left(Vt + \frac{L}{2}, Y \right) dY - \int_{-b}^b w_s \left(Vt - \frac{L}{2}, Y \right) dY \right].$$

Можно получить формулы при равномерном распределении по площади не только в прямоугольнике.

Обсуждение результатов

Основным результатом, имеющим принципиальное значение для проведения практических расчетов, является следующий. Рассмотрим нагрузку на поверхность полупространства от одной колесной пары. В этом случае очевидно, что точечная нагрузка от колес на поверхности полупространства распределится по некоторой площади. Были проведены вычисления реакции датчика от разных видов распределения по площади и от такой же по величине точечной силы. Оказалось, что эти результаты практически совпадают: различие составляет по величине не более 3 %, и это заметно меньше неопределённости других параметров задачи. Следовательно, для расчетов мы можем пользоваться простыми формулами для одной сосредоточенной силы, которые успешно заменяют непростые вычисления с помощью двойных интегралов. Кстати, нагрузку от тележки также можно заменить одной сосредоточенной силой, поскольку колесные пары расположены здесь весьма близко. Этот результат также проверяется непосредственными расчетами.

Сопоставим результаты расчетов с экспериментальными данными. Были заданы следующие упругие параметры: $\mu=10^9$ Па, $\nu=0.2$. Для путевых экипажей [Железнодорожный . . ., 2013]: $P=25$ тонн силы на тележку или отдельную ось, $V=20$ м/с (72 км/ч). На рис. 5 приведены волновые формы скорости смещения, полученные в результате расчетов, для единичной колесной пары и грузового поезда, состоящего из локомотива и 20 одинаковых вагонов.

Сопоставление с экспериментальными данными, например, на рис. 2, а, показывает хорошее согласие с теоретическим расчетом в следующем:

– начало и конец записи прохождения поезда датчиком вне насыпи (на удалении 5 м и на глубине 1 м) характеризуется интенсивными волновыми формами в виде периода синусоиды;

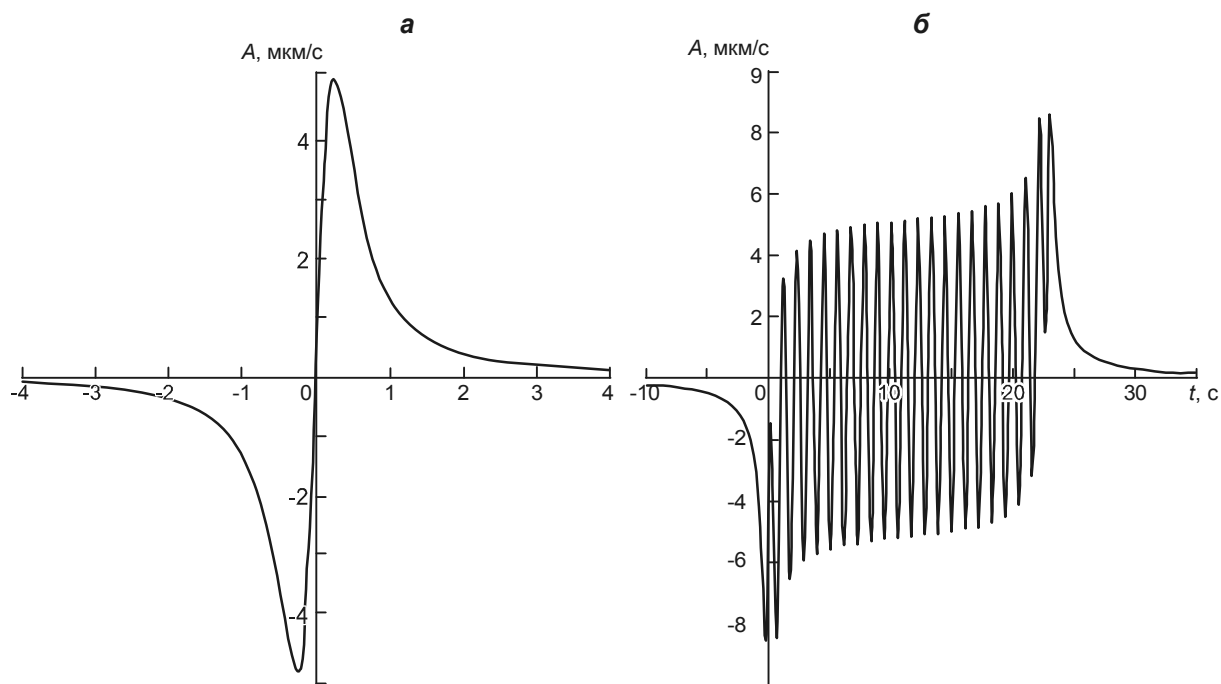


Рис. 5. Расчетные кривые изменения во времени скоростей смещения, регистрируемых сейсмическим датчиком, при движении: *а* – для единичной колесной пары, *б* – для поезда с локомотивом, направление оси z изменено на противоположное по сравнению со схемой рис. 4

– волновая форма в начале записи определяется воздействием на среду первой колесной пары (или тележки при близком расположении колес), хвостовая волновая форма – последнего колеса (или тележки);

– воздействие вагонов внутри состава проявляется в виде набора колебаний, причем при одинаковых вагонах это может быть достаточно регулярная волновая форма, а при разных – характер колебаний зависит от интерференции колебаний;

– полученные величины амплитуд хорошо согласуются с экспериментальными значениями, что, совместно с видом волновых форм, показывает правильность выбранного теоретического подхода.

Обратим внимание на то, что амплитуда регистрируемых колебаний, согласно (11), должна существенно зависеть от скорости состава. Возможно, это проявляется в интервале амплитуд 2.5–4.5 $\mu\text{m/s}$ на распределении на рис. 2, *б*; форма гистограммы выше 4.5 $\mu\text{m/s}$ указывает на то, что скорость движения составов выдерживается с достаточно хорошей точностью. Из соотношения (11) следует, что при вариации скорости на трассе 10 % (7 км/ч при скорости 70 км/ч), получаем вариацию амплитуды также 10 %, что, как видим из экспериментальных данных, существенно больше ошибки измерения “хорошим” датчиком (рис. 3, *б*). Кроме того, при проведении мониторинга можно включить в регламент работ данные по скорости поезда.

Таким образом, экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются с теоретическим рассмотрением.

Заключение

На основании анализа экспериментальных данных и теоретического рассмотрения показана возможность определения *in situ* упругих свойств грунтов нижнего строения железнодорожного полотна по результатам сейсмометрических наблюдений вибраций при прохождении путевого экипажа. По существу, проведенное рассмотре-

ние и полученное хорошее согласие теории и эксперимента можно считать обоснованием новой сейсмометрической методики мониторинга состояния земляного полотна железной дороги.

Как составная часть методики рассмотрены требования к регистрирующей аппаратуре и указаны наиболее подходящие типы датчиков – Trillium Compact-120s, которые можно располагать вблизи полотна на безопасном от него расстоянии. Такой датчик с соответствующим регистратором и программой оперативной обработки записей может быть включен в комплекс методов мониторинга состояния пути *in situ*.

Приведенные оценки разрешающей способности предлагаемой методики показывают, что она является достаточно чувствительной для выявления деформационных свойств грунтов на ранней стадии деградации, особенно для многолетнемерзлых грунтов.

Финансирование

Работа выполнена при частичной поддержке по гранту РФФИ № 19-35-90071, НИОКТР АААА-А17-117060110064-1 (ИФЗ РАН) и государственного задания АААА-А18-118012490072-7 (ФГБУН ФИЦКИА РАН).

Благодарности

Благодарим сотрудников Северной железной дороги и заместителя главного инженера Северной железной дороги по территориальному управлению С.В. Гаревских за помощь в проведении исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

- Антоновская Г.Н., Афонин Н.Ю., Басакина И.М., Капустян Н.К., Басакин Б.Г., Данилов А.В. Возможности сейсмических методов для оценки состояния земляного полотна железнодорожных путей в условиях Крайнего Севера // Транспортные системы и технологии. 2017. Вып. 3(9). С.133–161.
- Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Федоренко Е.В. Возможности сейсмической аппаратуры в задачах оценки состояния железнодорожных насыпей // Сейсмические приборы. 2019. Т. 55, № 3. С.61–73. <https://doi.org/10.21455/si2019.3-4>
- Ашпиз Е.С., Шмаков А.П. Результаты мониторинга высоких насыпей на опытном полигоне Качканар–Смычка // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: Труды XVI международной научно-практической конференции. М.: МИИТ, 2019. С.216–223.
- Грайзер В.М. “Истинное” движение почвы в эпицентральной зоне. М.: ИФЗ АН СССР, 1984. 197 с.
- Железнодорожный путь / Ашпиз Е.С., Гасанов А.И., Глюзберг Б.Э. / Под ред. Е.С. Ашпиза. М.: ФГБОУ “Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте”, 2013. 544 с.
- Капустян Н.К., Юдахин Ф.Н. Сейсмические исследования техногенных воздействий на земную кору и их последствий. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 416 с.
- Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Басакина И.М., Данилов А.В. Моделирование состояния нижнего строения железнодорожного пути с применением сейсмических методов // Наука и технологические разработки. 2018. Т. 97, № 1. С.35–48. [Тематический выпуск “Прецизи-

онный геофизический мониторинг природных опасностей. Часть 1. Приборы и технологии”]. <https://doi.org/10.21455/std2018.1-4>

Каспржицкий А.С., Лазоренко Г.И., Шаповалов В.Л., Окост М.В., Морозов А.В., Явна В.А. Динамические характеристики и устойчивость земляного полотна в условиях тяжеловесного движения // Вестник РГУПС. 2019. № 2. С.104–123.

Коншин Г.Г. Динамические напряжения в земляном полотне от воздействия подвижного состава. М.: МИИТ, 2004. 154 с.

Ломакин В.А. Теория упругости неоднородных тел. М.: Изд-во МГУ, 1976. 368 с.

Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир, 1975. 872 с.

Zhang Z., Dhanasekar M. Dynamics of railway wagons subjected to braking torques on defective tracks // Vehicle system dynamics. 2012. V. 50 (1). P.109–131. <https://doi.org/10.1080/00423114.2011.571265>

Сведения об авторах

АНТОНОВСКАЯ Галина Николаевна – доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, заведующая лабораторией, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова РАН. 163000, Архангельск, наб. Северной Двины, д. 23. Тел.: +7(8182) 21-56-17. E-mail: essm.ras@gmail.com

ДОБРОВОЛЬСКИЙ Игорь Петрович – доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. E-mail: dipedip@gmail.com

КАПУСТЯН Наталия Константиновна – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1; главный научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова РАН. 163000, Архангельск, наб. Северной Двины, д. 23. Тел.: +7(8182) 21-56-17. E-mail: nkapustian@gmail.com

ОРЛОВА Ирина Петровна – научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. E-mail: i.p.kachan@gmail.com

METADATA IN ENGLISH

About the journal

SEISMICHESKIE PRIBORY, ISSN: 0131-6230, eISSN: 2312-6965, DOI: 10.21455/si, http://elibrary.ru/title_about.asp?id=25597

English Translation: Seismic Instruments, ISSN: 0747-9239 (Print) 1934-7871 (Online), <https://link.springer.com/journal/11990>

Determination of in situ elastic properties of roadbed railway by seismic observations

G.N. Antonovskaya¹, I.P. Dobrovolsky², N.K. Kapustian^{1,2}, I.P. Orlova²

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

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

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

Abstract. The possibility of determining of roadbed railway elastic parameters is shown by the seismic observations results of vibrations generated by passing train. The rationale for the monitoring method is obtained

by analyzing our own experimental data and theoretical calculations with a good agreement between the theory and experiment. As the method part, we considered the requirements for seismic equipment and indicated the most suitable types of them (Trillium Compact-120s is the best) that can be located near the roadbed at a safe distance from it. Such sensor with the appropriate data logger and seismic data processing program can be included in the methods' set for state roadbed railway monitoring. These estimates of the proposed method resolution show that it is sufficiently sensitive to detect the deformation soils properties at an early degradation stage, which is especially important for permafrost soils.

Keywords: roadbed railway, substructure, vibrations generated by passing train, seismic equipment, elastic theory calculation

About the authors

ANTONOVSKAYA Galina Nikolaevna – Doctor of Technical Sciences, Deputy Director for Science, Head of the Laboratory of Seismology, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Russian Academy of Sciences. 163000, Arkhangelsk, nab. Severnoi Dviny, 23. E-mail: essm.ras@gmail.com

DOBROVOLSKY Igor Petrovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Russia, 123242, Moscow, ul. Bolshaya Gruzinskaya 10, building 1. E-mail: dipedip@gmail.com

KAPUSTIAN Natalia Konstantinovna – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Russia. 123242, Moscow, ul. Bolshaya Gruzinskaya 10, building 1; Senior Researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Russian Academy of Sciences. 163000, Arkhangelsk, nab. Severnoi Dviny, 23. Email: nkapustian@gmail.com

ORLOVA Irina Petrovna – Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. 123242, Moscow, ul. Bolshaya Gruzinskaya 10, building 1. E-mail: i.p.kachan@gmail.com

Cite this article as: Antonovskaya G.N., Dobrovolsky I.P., Kapustian N.K., Orlova I.P. Determination of *in situ* elastic properties of roadbed railway by seismic observations, *Seismicheskie Pribory*, 2020, vol. 56, no. 1, pp. 44–55. (in Russian). <https://doi.org/10.21455/si2020.1-4>

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