

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Безопасность на транспорте

УДК [UDC] 550.34.01

DOI 10.17816/transsyst20195496-114

© Г. Н. Антоновская<sup>1</sup>, Н. К. Капустян<sup>1,2</sup>, Ю. С. Ромен<sup>3</sup>, А. В. Данилов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова РАН

(Архангельск, Россия)

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

<sup>3</sup>АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (Москва, Россия)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ В ЗАДАЧАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Рассмотрен опыт применения широкополосной сейсмической аппаратуры для выявления изменений в состоянии земляного полотна железнодорожного пути в процессе эксплуатации.

**Цель:** получение экспериментальных обоснований для расширения научных основ геофизических изысканий при мониторинге состояния земляного полотна и выявлении опасных процессов на ранней стадии.

**Материалы и методы:** сейсмические записи, полученные авторами на участке Северной железной дороги. Обработка данных проводилась с применением низкочастотного фильтра ниже 0,5 Гц и анализа траекторий движения точек земляного полотна, выполнялось численное моделирование напряженно-деформированного состояния среды при изменении параметров грунтов, результаты сравнивались с экспериментом.

**Результаты:** Экспериментально и путем численного моделирования показано, что, проводя вблизи железнодорожного пути регистрацию колебаний, создаваемых проходящими поездами, и анализируя изменение амплитуд этих колебаний в низкочастотной области (периоды примерно 100 с), возможно выявить потенциально опасные явления в земляном полотне. Натурные наблюдения показали изменения амплитуд колебаний при сезонном обводнении, результаты согласуются с моделированием. Рассмотрена возможность выявления стадий промерзания-оттаивания грунта и связанных с ними негативных процессов. Путем обсуждения параметров современных аппаратурных средств показаны возможности и применимость разных типов сейсмических датчиков для мониторинга земляного полотна, а также организации интеллектуальной системы мониторинга.

---

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 17-20-02119 “Разработка технологии сейсмического мониторинга и экспресс-оценка состояния земляного полотна железнодорожных путей в условиях Крайнего Севера и Сибири” и темы НИР лаборатории сейсмологии ФГБУН ФИЦКИА РАН, № госрегистрации АААА-А18-118012490072-7.

**Заключение:** Доказана возможность использования вибраций от проходящих поездов для выявления изменений в состоянии земляного полотна путем анализа величин амплитуд регистрируемых колебаний. Представлены рекомендации для выбора сейсмодатчиков и организации системы интеллектуального мониторинга состояния земляного полотна.

**Ключевые слова:** широкополосный сейсмометр, земляное полотно железной дороги, мониторинг, подвижный состав, низкочастотное воздействие.

Rubric 2: SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Transport Safety

© G. N. Antonovskaya<sup>1</sup>, N. K. Kapustian<sup>1,2</sup>, Yu. S. Romen<sup>3</sup>, A. V. Danilov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research

(Arkhangelsk, Russian Federation)

<sup>2</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences

<sup>3</sup>JSC “VNIIZHT”

(Moscow, Russian Federation)

## THE BROADBAND SEISMIC EQUIPMENT APPLICATION IN PROBLEMS OF ROADBED RAILWAY SMART MONITORING

We present our experience of broadband seismic equipment application to detect changes of roadbed railway state in operation.

**Aim:** to obtain experimental validation to expand the scientific basis of geophysical surveys in roadbed railway state monitoring and identifying hazardous processes at an early stage.

**Methods:** seismic records were obtained by the authors on the Northern railway section. Seismic data were processed using a low-frequency filter of 0.5 Hz and analysis of points movement trajectories of the roadbed railway, we performed numerical modelling of the stress-strain state of the soil when specifying various physical parameters, the results were compared with the experiment.

**Results:** We have shown experimentally and by numerical simulation that by conducting near the railway track vibrations registration formed by passing trains and analyzing the amplitudes change of these vibrations in the low-frequency band (periods of about 100 seconds), it is possible to identify potentially dangerous phenomena in the roadbed. Field observations showed changes in amplitude of oscillations during seasonal flooding; the results are consistent with modeling. The possibility of identifying the stages of freezing-thawing of the soil and associated negative processes is considered. By discussing the parameters of modern seismic equipment, the possibilities and applicability of different types of seismic sensors for roadbed railway monitoring as well as the organization of a smart monitoring system are shown.

**Conclusion:** The possibility of using passing trains vibrations to detect changes of the roadbed railway state by analyzing the amplitudes of these vibrations is proved. Recommendations for seismic sensors choice and organization of smart roadbed state monitoring system are presented.

**Keywords:** broadband seismic equipment, roadbed railway, monitoring, railway train, low-frequency vibration

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее важных вопросов для увеличения грузопотока на участках железных дорог, проложенных в северных регионах, является устранение ограничений по эксплуатации насыпей на слабых основаниях. Большое количество таких насыпей считается потенциально опасными, на многих из них периодически происходят осадки, что вызывает необходимость ограничения скоростей движения поездов. Деформации балластного слоя являются, как правило, следствием осадок слабого основания, в результате чего происходит развитие большого количества дефектов, снижающих устойчивость откосов насыпей и приводящих к уменьшению их несущей способности. В условиях роста объемов перевозок и весовых норм задача совершенствования методов мониторинга и диагностики насыпей на слабых основаниях приобретает первостепенное значение.

Существующие диагностические системы основаны на комплексном применении современных геофизических комплексов, лабораторных методов и компьютерного моделирования [1]. Известно, что подвижный состав является источником вибродинамического воздействия, вследствие чего в земляном полотне создаются дополнительные напряжения и развиваются деформации. Транспортные динамические (вибромеханические) нагрузки изучаются [2], но пока недостаточно данных о поведении грунтов при низкочастотных (ниже 0,5 Гц) нагрузках [3]. Как показали наши натурные наблюдения, именно эти частоты, связанные с прохождением подвижных составов, наиболее интенсивны [4]. Тем не менее, отображение свойств грунтов в волновом поле при низкочастотных воздействиях практически не изучалось, и тут мы видим большие методические возможности для выявления опасных процессов в насыпи.

Как известно, среди геофизических методов сейсмические наблюдения являются наиболее информативными [5]. В частности, сейсморазведка позволяет получать детальные разрезы участков среды, включающих дорожную насыпь, в виде слоисто-блоковой модели с распределением скоростей упругих волн, что дает представление о вещественном составе. Существенным недостатком традиционной сейсморазведки на транспорте является использование в основном кинематических характеристик получаемого волнового поля, т.е. времен вступления волн, для определения их скоростей распространения. Динамические характеристики (спектры, амплитуды и пр.) используются в основном только в нефтегазовой сейсморазведке для уточнения параметров разреза. Еще одной, важной для выявления изменений в среде, особенностью динамики сейсмических волн, в первую очередь амплитуды

колебаний, является так называемая тензочувствительность амплитуды, которая на один-два порядка выше, чем для кинематики [6]. Это свойство амплитуды колебаний, используемое как параметр мониторинга изменений в среде, позволяет существенно раньше, чем при анализе кинематики, заметить изменения в породах, в том числе и опасные для насыпи. Этот вопрос применительно к мониторингу с использованием динамических нагрузок от подвижного состава рассматривается ниже.

Разрезы среды, получаемые структурными методами (например, сейсморазведкой), составляют основу расчетных моделей. Численное моделирование используется сейчас для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) и, в частности, устойчивости насыпи. Компьютерный расчет позволяет рассматривать набор моделей, на основании чего определять мероприятия для укрепления насыпи. При этом практически не используется возможность моделирования изменения НДС насыпи при малых изменениях свойств, например, при сезонных вариациях параметров грунтов. Это, прежде всего, обусловлено тем, что наблюдать такие изменения *in situ* крайне сложно при традиционных методах изысканий.

И, наконец, важным подспорьем для совершенствования сейсмических наблюдений при диагностике и мониторинге земляного полотна железной дороги является современное развитие измерительной техники, способов сбора и передачи данных.

Целью работы является получение экспериментальных обоснований для расширения научных основ геофизических изысканий, в первую очередь, при мониторинге состояния насыпи и выявлении опасных процессов на ранней стадии.

Для достижения поставленной цели предлагается использование комплекса методик, включающих структурные изыскания (в нашем случае малоглубинную сейсморазведку), численное моделирование НДС насыпи, и новый способ, основанный на сейсмической регистрации низкочастотных (периоды 100 с и более) колебаний, возникающих при прохождении железнодорожного состава.

Натурные сейсмические наблюдения по оценке вибрационных воздействий, создаваемых подвижными составами, с применением широкополосной сейсмической аппаратуры выполнялись на участке Северной железной дороги (СЖД) Онежского района Архангельской области в течение двух полевых сезонов. Объектом исследований являлось земляное полотно в районах заторфованных (неблагоприятных) и устойчивых грунтов. Выполнялось компьютерное моделирование различных состояний грунта для оценки достоверности экспериментальных результатов. Согласно СП 11-105-97 [7], территория района отнесена к II категории сложности инженерно-геологических

условий. Участок исследований находится в пределах аккумулятивной равнины озерно-ледникового происхождения приморской низменности. В пределах низменных равнин залегают неоднородные тонкослоистые текучие глинистые водонасыщенные отложения, мощность которых колеблется от нескольких метров до 10 м [8].

## ИНСТРУМЕНТЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

В качестве основных средств измерений колебаний от поезда использовалась широкополосная сейсмическая аппаратура фирмы Nanometrics (Канада): датчик – универсальный сейсмометр Trillium Compact с частотным диапазоном (120 с – 100 Гц), регистратор – Centaur с динамическим диапазоном 142 дБ при 100 отс/с. Подробно о технических характеристиках измерительной аппаратуры можно ознакомиться на сайте официального представителя Nanometrics в России – <https://www.vulcan-inc.ru/>.

Регистрировались вибрации, создаваемые подвижными составами разного типа. Преимущественно, это были товарные поезда с количеством вагонов 50-70 шт., длительность прохождения относительно точки наблюдения составляла 60-100 с.

Первый цикл наблюдений проводился в августе 2017 г., применяли два типа широкополосных сейсмометров, анализ записей которых показал, что вид записей вибраций ниже 0,5 Гц существенно зависит от амплитудно-частотной характеристики датчиков [4], как основные были рекомендованы широкополосные низкочастотные датчики. Второй цикл выполнялся в конце апреля – середине июня 2019 г., на том же участке с указанной выше аппаратурой. Был смонтирован автономный пункт наблюдений с записью данных на флеш-носитель в регистраторе. Оборудование (датчик и регистратор) установлено непосредственно в грунт на глубине 1 м. Горизонтальные компоненты датчика ориентированы поперек (Y, направление на насыпь) и вдоль (X) пути. Электропитание оборудования обеспечено за счет солнечной электростанции. Внешний вид пункта сейсмических наблюдений представлен на Рис. 1а, обратим внимание, что датчик установлен на расстоянии примерно 5 м от оси пути.

В Табл. 1 приведены пиковые значения скоростей смещений грунта при прохождении подвижных составов в разные месяцы по трем взаимно перпендикулярным компонентам, варианты с применением низкочастотного фильтра 0,5 Гц и без него. Видим, что в низкочастотной области, в отличие от исходной записи, наблюдаются повышение значений от апреля к августу по всем компонентам. При этом значения для

интервала апрель-июнь в целом подобны, достаточно резкое отличие по амплитудам наблюдается в августе, что, предположительно может быть связано с изменением физических характеристик грунта.

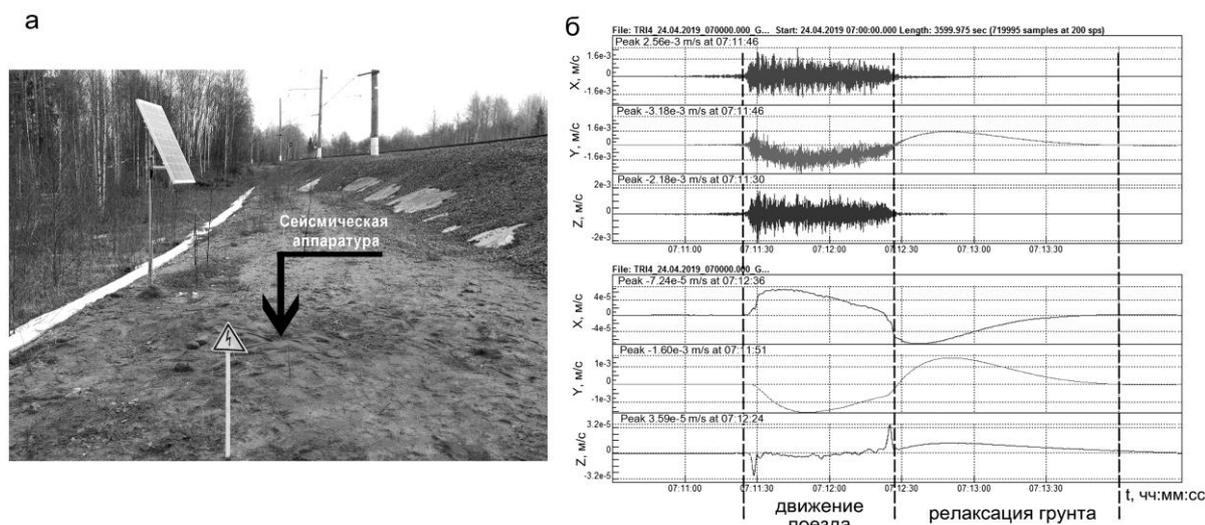


Рис. 1. Автономный пункт сейсмических наблюдений 2019 г. (а), сейсмическая аппаратура находится в грунте, и пример записи подвижного состава по трем взаимно перпендикулярным компонентам (б), где верхние три волновые формы – исходная запись, нижние три – с применением низкочастотного фильтра 0,5 Гц, выделены временные промежутки движения поезда и релаксации грунта после его прохождения

Таблица 1. Значения пиковых скоростей смещений грунта при прохождении подвижного состава

Дата	Пиковые значения скоростей смещений грунта, мм/с					
	Исходная запись			Низкочастотный фильтр 0,5 Гц		
	X	Y	Z	X	Y	Z
24-30 апреля 2019	2,6	3,2	2,2	0,1	1,6	0
1-31 мая 2019	1,9	3,2	1,7	0,1	1,5	0
1-17 июня 2019	1,9	3,2	1,8	0,1	1,4	0
17 августа 2017	1,8	4,1	3,0	0,4	2,5	0,1

Отмеченные различия наиболее ярко проявляются в кривых, соответствующих низкочастотным (периоды около 100 с) составляющим траекторий движения точки насыпи в горизонтальной плоскости при прохождении поездов (Рис. 2). По осям отложены величины скоростей смещений грунта (амплитуды записей), приняты разные масштабы, так как основные по интенсивности колебания происходят в направлении поперек пути (Y). В апреле-июне грунты более водонасыщенные, чем в августе. Сдвиговые деформации во влагонасыщенных средах определяются деформационными свойствами скелета, жидкость не работает на сдвиг, что приводит к меньшим, чем в необводненной среде, величинам сдвиговых деформаций [9]. Учитывая, что велосиметром мы регистрируем амплитуды

скоростей смещений (амплитуды виброскоростей), которые пропорциональны добавочным деформациям в точке регистрации, наблюдаемые нами значения амплитуд в сухой период (август) указывают на большие в это время сдвиговые деформации. Кроме того, построенные кривые за апрель-июнь демонстрируют подобие амплитуд, что можно связать с неизменностью физического состояния земляного полотна.

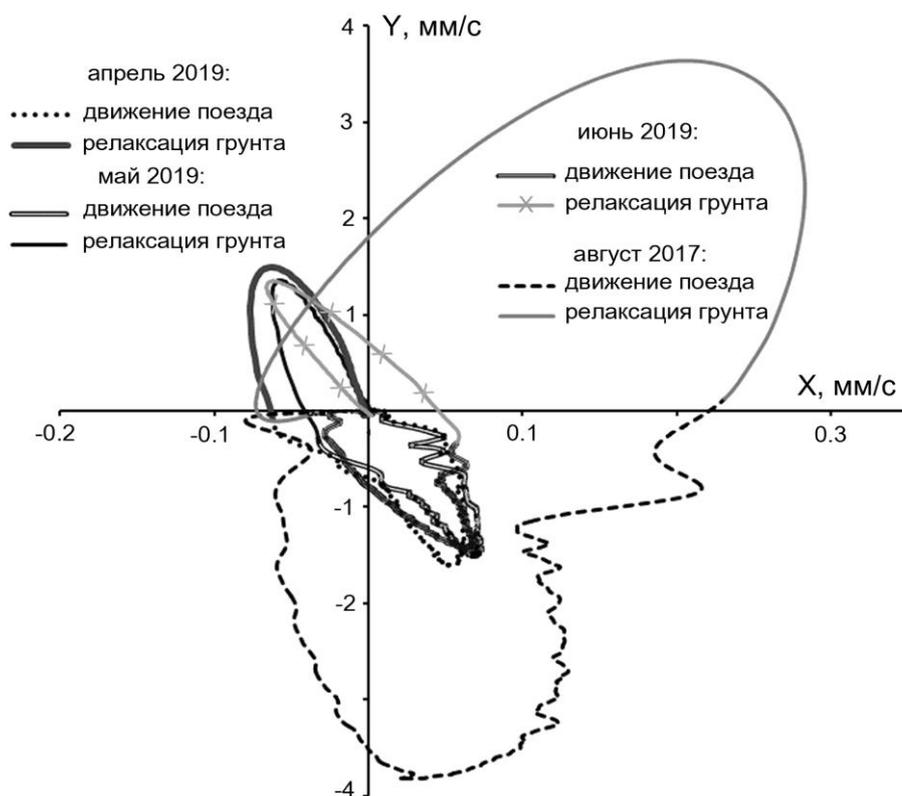


Рис. 2. Кривые, соответствующие траекториям движения точки насыпи в горизонтальной плоскости в разные месяцы при прохождении поездов (полоса частот 120 с – 0.5 Гц)

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ НАСЫПИ

Численное моделирование земляного полотна железной дороги выполнялось с тремя вариантами инженерно-геологических условий (Рис. 3), геометрия слоев и основные параметры задавались по данным малоглубинной сейсморазведки, более подробно результаты приведены в [10]. Расчеты проводились в осесимметричной форме (половина схемы) в статической постановке, что качественно соответствует длиннопериодным колебаниям (период 100 с и более). Численное моделирование выполнено в программном комплексе PLAXIS 2D, работающем на основе метода конечных элементов. В качестве модели грунта использована упругопластическая модель Кулона-Мора, позволяющая выполнять расчет

напряжений и деформаций. Поле напряжений определяется решением двумерной задачи с использованием конечных элементов треугольной формы. Матрица жесткости элементов, которая связывает силы и перемещения в узлах, определяется исходя из минимизации полной потенциальной энергии. Система совместных уравнений, базирующаяся на общей матрице жесткости, решается для перемещения каждого узла. После определения перемещений для каждого элемента определяются напряжения. Таким образом, становятся известными нормальные и касательные напряжения для каждой точки грунтового массива, которые позволяют определить прочность на сдвиг из условия Кулона-Мора:

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta \quad (1)$$

$$\tau = -\tau_{xy}\cos 2\theta - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\sin 2\theta \quad (2)$$

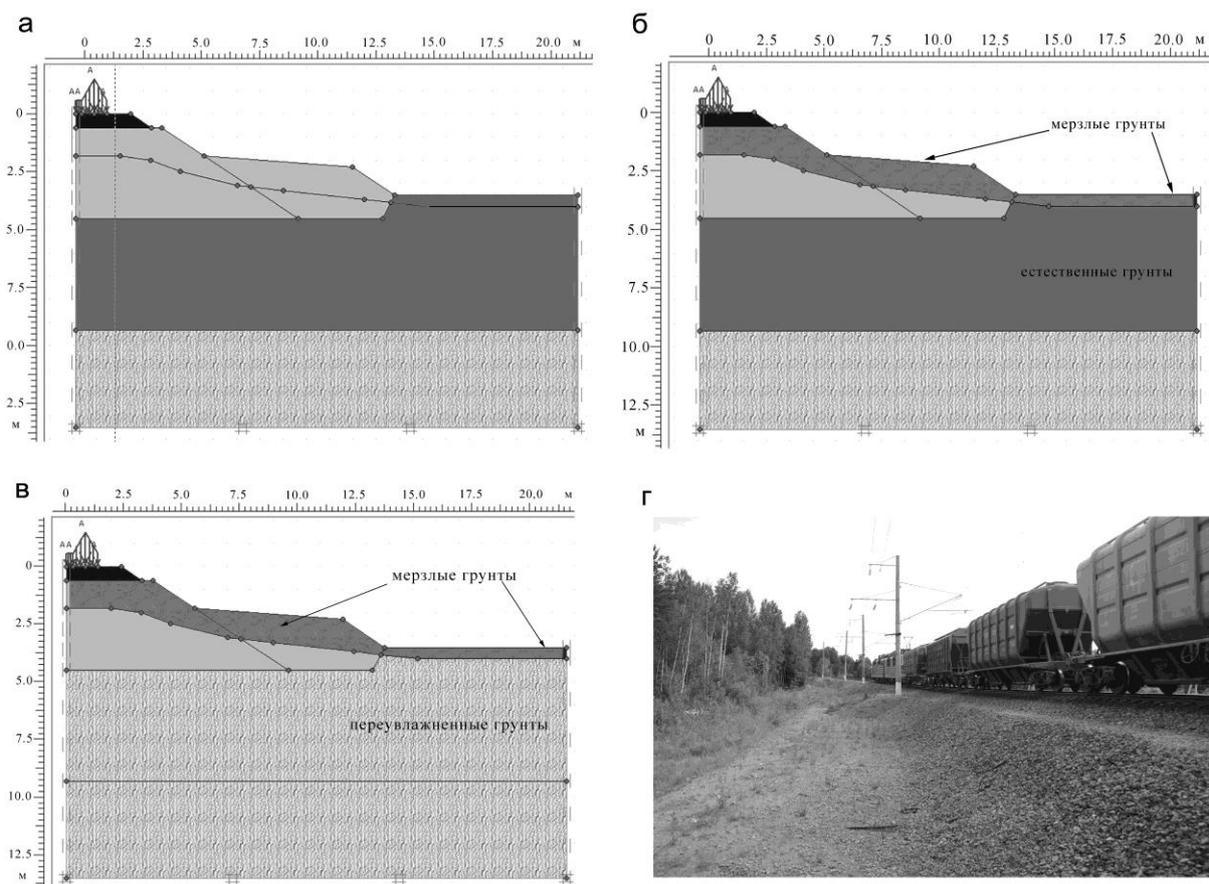


Рис. 3. Варианты расчетных схем, задаваемых для моделирования: а – модель I, грунты в естественном состоянии; б – модель II, глубина промерзания грунта 2 м, ниже грунты в естественном состоянии; в – модель III, глубина промерзания 2 м, ниже грунты в переувлажненном состоянии; г – фото моделируемой насыпи

Вес поезда задавался 40000 т.

Три модели описывают следующие ситуации. Модель I (Рис. 3а) позволяет оценить НДС в различных слоях насыпи, это исходная модель для мониторинга, относительно которой рассматриваются возможные изменения НДС. Модель II (Рис. 3б) – вариант сезонных изменений при зимнем промерзании, модель III (Рис. 3в) – появление обводнения или возможность деградации мерзлых грунтов. Параметры грунтов, задаваемых при моделировании, приведены в Табл. 2, приняты значения параметров, позволяющие получить качественную картину, необходимую в нашей задаче. Разбивка сетки конечных элементов грубая, что позволяет получать результаты расчетов без значительных временных затрат.

Таблица 2. Расчетные характеристики грунтов

Параметры	Модуль упругости, Е, кПа	Удельное сцепление, С, кПа	Угол внутреннего трения $\phi$ , град
Насыпь (мерзлый)	100000	–	–
Насыпь	50000	3	36
Суглинок (мерзлый)	100000	–	–
Суглинок	50000	22	19
Суглинок (увлажненный)	30000	10	12
Гравелистый грунт	100000	4	40

На Рис. 4 показаны результаты расчетов для моделей I-III, описывающие НДС насыпи при движении состава, в частности, в качестве примера – сдвиговые деформации, определяющие зоны, в которых касательные напряжения преобладают над нормальными. Как правило, эти области формируют потенциальные поверхности обрушения, контролируемые расчетами устойчивости. Построение изополей сдвиговых деформаций для разных моделей проводилось в программе Surfer, интерполяция данных осуществлялась с применением кригинга.

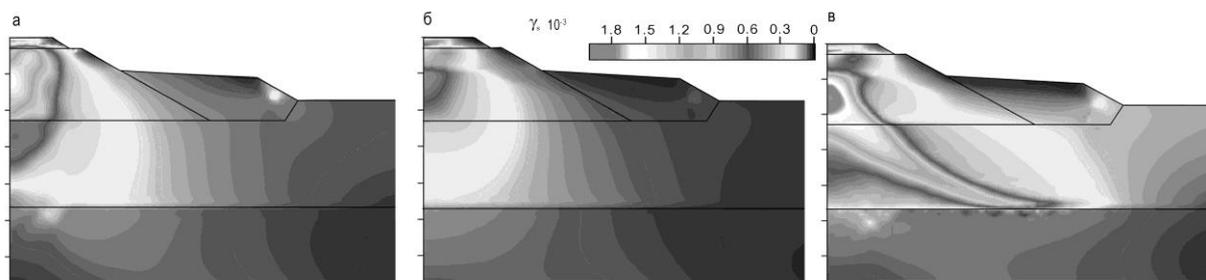


Рис. 4. Изополя сдвиговых деформаций для разных моделей:

- а – модель I, грунты в естественном состоянии;
- б – модель II, глубина промерзания грунта 2 м, ниже грунты в естественном состоянии;
- в – модель III, глубина промерзания 2 м, ниже грунты в переувлажненном состоянии

Видно, что насыпь в естественном состоянии (модель I) характеризуется сдвиговыми деформациями, приуроченными к вертикали, что не грозит горизонтальными подвижками насыпи. При промерзании верхнего слоя (сезонные изменения, модель II) насыпь становится более прочной, что известно на практике. Картина сдвиговых деформаций, представленная для модели III, соответствует неблагоприятному состоянию пути. В сравнении с моделью II это может описывать случай подтаивания мерзлых грунтов. Опасной может быть зона, отходящая вглубь и вбок от оси насыпи. Такая зона, инициируемая движением состава, может стать оползневой. Ситуации, отраженные моделями I и II, достаточно безопасны. Таким образом, численное моделирование с заданием вариаций параметров слоев – это важная составная часть в комплексе методов изысканий, оно способно ориентировать эксплуатационников на возможность опасных явлений.

Рассмотрим вопрос о возможности экспериментального наблюдения эффектов, выявленных при моделировании. В Табл. 3 для некоторых точек насыпи, где теоретически может быть размещено сейсмическое оборудование, приведены значения амплитуд вертикальных вибросмещений, виброскоростей и виброускорений согласно выполненному моделированию для моделей I-III в сравнении с реальными значениями амплитуд виброскоростей в информативном низкочастотном диапазоне. Расчетные значения виброскоростей и виброускорений были получены путем пересчета значений вибросмещений, приняв средний период колебаний за 100 с. Сопоставление результатов компьютерного моделирования и натурных наблюдений, представленных в Табл. 3 (выделено жирным шрифтом), показывает достаточно хорошую сопоставимость данных, т.е. не критично к детальности расчетных моделей.

Таблица 3. Значения амплитуд вертикальных вибросмещений, виброскоростей и виброускорений для моделей I-III в зависимости от места установки датчика в сравнении с экспериментальными значениями амплитуд виброскоростей в диапазоне частот ниже 0,5 Гц

Значения амплитуд:		Подрельсовое пространство (основная площадка)	Основная площадка, глубина 2 м (ниже уровня промерзания)	Берма, основание откоса, глубина 2 м (ниже уровня промерзания)
вертикальных вибросмещений, мм, для моделей	I	7,00	6,50	1,00
	II	4,00	3,50	0,70
	III	9,00	8,00	1,70
вертикальных виброскоростей, мм/с, для моделей	I	0,44	0,41	0,06
	II	0,25	0,22	0,04
	III	0,57	0,50	0,11

Значения амплитуд:		Подрельсовое пространство (основная площадка)	Основная площадка, глубина 2 м (ниже уровня промерзания)	Берма, основание откоса, глубина 2 м (ниже уровня промерзания)
вертикальных ускорений, мм/с <sup>2</sup> , для моделей	I	0,03	0,03	0,004
	II	0,02	0,01	0,003
	III	0,04	0,03	0,007
экспериментальных виброскоростей, мм/с, по компонентам	X	–	–	0,07
	Y	–	–	1,48
	Z	–	–	0,04

Теперь перейдем к вопросу подбора аппаратуры, способной зарегистрировать такие низкочастотные колебания. В Табл. 4 представлены характеристики приборов различного типа, которые, согласно данным технических паспортов, возможно использовать для мониторинга изменения состояния грунтов путем наблюдения их реакции на низкочастотные воздействия при прохождении поезда.

Таблица 4. Технические характеристики приборов сейсмометрических наблюдений

Модель прибора	Акселерометр АС-73	Titan Posthole акселерометр	Сейсмометр Trillium Compact (ТС-120s/ТС-120s Posthole)	Trillium Cascadia сейсмометр + акселерометр	Скважинный деформометр МОЭД-1П
Измеряемая величина / кол-во каналов	Ускорение/3	Ускорение/3	Скорость/3	Скорость/3 и ускорение/3	Смещение/4
Чувствительность	от 2,5 до 20 В/г	от 5 до 80 В/г	750 В с/м	750 В*с/м; от 5 до 80 В/г	–
Диапазон измерений	± 0,5g, 1g, 2g, 3g или 4g	±4 g, ±2 g, ±1 g, ±0,5 g, ±0,25 g, ±0,125 g	0,026 м/с до 10 Гц и 0.17г выше 10 Гц	для акселерометра: ±4 g, ±2 g, ±1 g, ±0,5 g, ±0,25 g, ±0,125 g	0...35 мм
Динамический диапазон	156 дБ (на 1 Гц, RMS)	> 155 дБ (RMS)	>152 дБ на 1 Гц	для сейсмометра: >152 дБ на 1 Гц; для акселерометра >155 дБ	–
Частотный диапазон	0 до 200 Гц	0 до 430 Гц	от 120 с до 108 Гц	для сейсмометра: от 120 с до 108 Гц; для акселерометра: от 0 до 430 Гц	–
Минимально регистрируемый полезный сигнал	6,34E-8 g	7,11E-8 g	6,53E-10 м/с	для сейсмометра: 6,53E-10 м/с для акселерометра: 7,11E-8g	5 мкм
Источник	[11]	[12]	[13, 14]	[15]	[16]

В эксперименте мы использовали широкополосные сейсмометры-велосиметры, линейка которых также приведена в Табл. 4. Весьма перспективным, согласно Табл. 4, является использование форс-балансных акселерометров. Для этой цели было выполнено моделирование акселерограмм в области низкочастотного воздействия подвижного состава путем дифференцирования отфильтрованных записей в программном комплексе GeoDAS (разработка компании GeoSIG, Швейцария). Кроме того, в этом же программном комплексе рассчитаны вибросмещения путем интегрирования этих же записей виброскоростей в низкочастотной области. Для качественного анализа были построены кривые траекторий для виброускорений и вибросмещений для горизонтальных компонент при воздействии поезда за май 2019 г. и август 2017, т.е. тогда, когда были получены явные различия в аналогичных кривых для виброскоростей. Результаты пересчета представлены на Рис. 5, где пунктирными линиями показан участок кривой при движении поезда, а сплошной – в интервале релаксации грунта после прохождения поезда. Это позволяет отчетливо увидеть процесс затухания колебаний в грунте.

Сопоставление кривых, представленных на Рис. 2 и Рис. 5, показывает, что для регистрации низкочастотных колебаний можно использовать любой тип оборудования: скважинные деформометры, сейсмометры и акселерометры. Акселерометры удобнее в эксплуатации и экономичнее, тем не менее, слабые длиннопериодные колебания сейсмометры (велосиметры) регистрируют лучше, в более удобном для анализа виде.

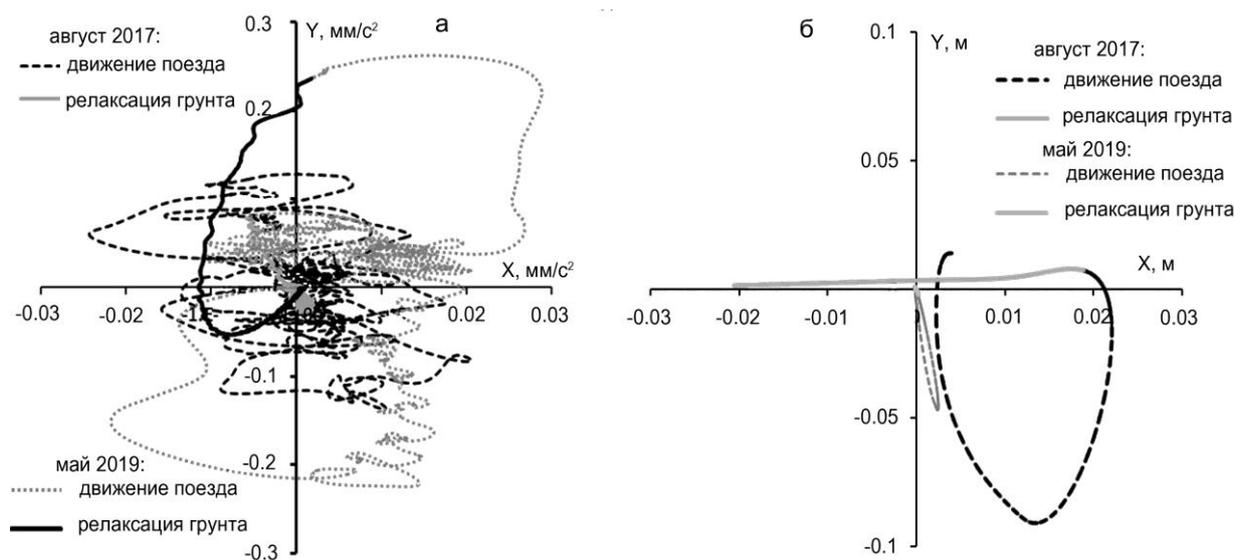


Рис. 5. Кривые, соответствующие траекториям смещения точки насыпи при движении поездов для периодов 120 с – 0,5 Гц в горизонтальной плоскости в разные месяцы – май 2019 г. и август 2017 г. записи:  
а – ускорений, б – смещений

Использование датчиков смещений (скважинных деформометров) для подобных исследований также возможно, но следует учесть большую трудоемкость при установке по сравнению с сейсмическими приборами.

Учитывая современные возможности аппаратуры наблюдений и информационной инфраструктуры, рассмотрим возможность построения систем сейсмического мониторинга для решения задач выявления на ранней стадии негативных природных и природно-техногенных изменений в состоянии железнодорожного полотна и подстилающих грунтов. На Рис. 6 приведена схема предлагаемой системы сейсмического мониторинга, составленная на основе нашего опыта наблюдений, сбора и передачи данных. Такую систему можно назвать интеллектуальной, т.к. она проводит сбор данных, выявляет момент их передачи, взаимодействует с разными устройствами.

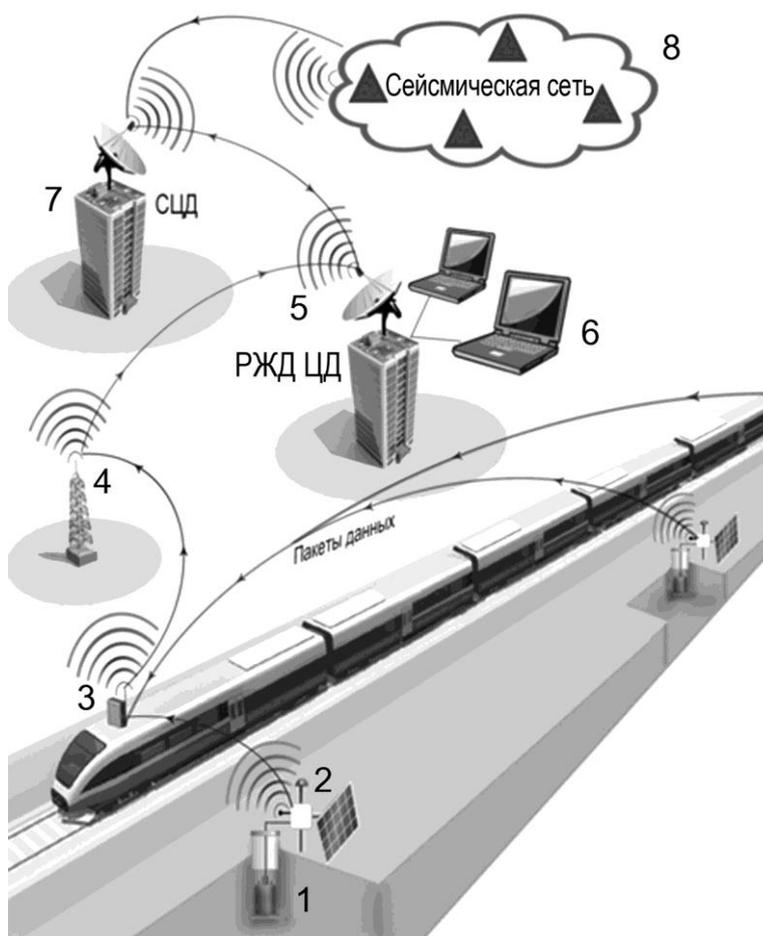


Рис. 6. Схема системы сейсмического мониторинга железнодорожного земляного полотна: 1 – сейсмический датчик; 2 – система электропитания, локального сбора, передачи и хранения сейсмических данных; 3 – система мобильного сбора сейсмических данных (приема-передачи и хранения), установленная внутри поезда; 4 – мачта сотовой связи; 5 – Центр данных РЖД (РЖД ЦД); 6 – автоматическая обработка данных; 7 – Сейсмологический центр данных (СЦД); 8 – региональная сейсмическая сеть, действующая в регионе

Вдоль линий железнодорожного полотна устанавливаются пункты сейсмических наблюдений (1), оснащенные системами электропитания, локального сбора, хранения и передачи данных (2). Шаг расстановки зависит от сложности инженерно-геологических условий района, предполагается сгущение пунктов в более сложных районах (карст, заболоченность, тектонический разлом и пр.), вплоть до установки сейсмических мини групп. Использование аналоговых датчиков при расположенном рядом блоке цифровой регистрации и передачи данных позволяет при необходимости достаточно просто заменять датчик при его поломке или усложнении решаемой задачи. При прохождении состава (пассажирского или грузового), оснащенного системой мобильного сбора сейсмических данных (3), происходит последовательный опрос локальных пунктов сбора во всех точках с использованием в качестве беспроводной связи, например, радиоканала. Далее, при вхождении в зону покрытия сотовой связи (или используя каналы связи РЖД), данные передаются на сервер в центр данных РЖД (5), где происходит их архивация и автоматическая обработка с целью выявления развития опасных процессов, определение уровня опасности участка (6). Кроме того, существует возможность в блоке регистрации заложить алгоритм выделения сигналов, характеризующих опасные процессы (предобработка) с соответствующим реагированием.

Эффективность предлагаемой комплексной технологии достигается сопоставлением натуральных наблюдений с базой данных изменения параметров при наборе ожидаемых опасных процессов в грунтах и моделировании.

При выявлении развития неблагоприятной ситуации при необходимости на участке устанавливается локальная система мониторинга, нацеленная на получение дополнительной информации о состоянии природно-техногенной системы, или проводятся комплексные геофизические исследования. Например, можно дополнительно использовать радиоволновой метод, позволяющий следить за изменением размеров и положением неоднородности и пр. [17].

Использование полноценных датчиков сейсмологического типа позволяет выявлять не только изменение свойств грунтов, но и изменение параметров эндогенного излучения среды с большей глубины (микротресков, слабой сейсмичности и пр.), вплоть до ощутимых землетрясений. Данными возможно обмениваться с региональным сейсмологическим центром данных (7) по сети Internet, который является центральным банком сейсмических данных в регионе (8), тем самым уплотнить наблюдательную сейсмическую сеть.

На Рис. 8 приведен пример регистрации проходящего состава и телесеизмического землетрясения, произошедшего в Папуа-Новая Гвинея

06.05.2019, время в очаге  $t_0=21:19:35$ , широта  $-6,97^\circ$ , долгота  $146,4^\circ$ , магнитуда  $m_b=6,9$ . Для выделения землетрясения использовался фильтр  $0,02-1,4$  Гц. Как видно из Рис. 7, сигнал от поезда на порядок больше по амплитудам колебаний, чем пришедшее землетрясение, но последнее больше по длительности записи (более 20 мин) и отличается по характерной волновой форме. Известно [17], что землетрясения, конечно более сильные, могут вызывать разжижение, течение и проседание грунта, поэтому данные воздействия необходимо включать в систему мониторинга земляного полотна для оценки спектров реакции. Это особенно важно в сейсмоактивных зонах, например, на Байкале, Дальнем Востоке и пр. Отметим, что зарегистрировать оба типа события, достаточно сильно различающихся по параметрам, возможно лишь с использованием широкополосных датчиков и регистраторов с динамическим диапазоном более 140 дБ на 1 Гц.

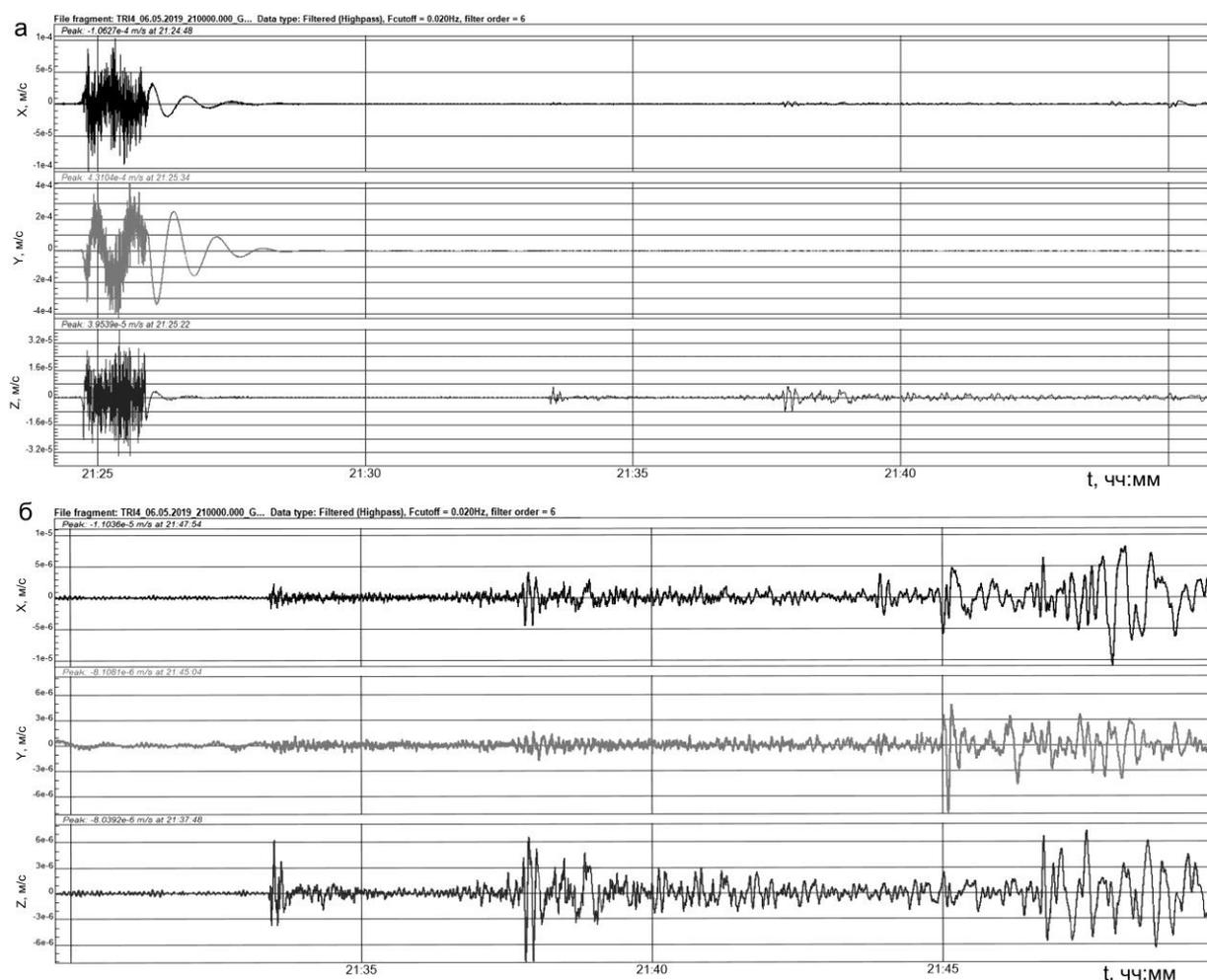


Рис. 7. Пример регистрации телесеismicического землетрясения станцией, расположенной рядом с ж/д линией: Папуа-Новая Гвинея, 06.05.2019,  $t_0=21:19:35$ ,  $m_b=6,9$ , фильтр  $0,02-1,4$  Гц:

а – запись подвижного состава и землетрясения,  
б – волновые формы землетрясения (с увеличением)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены экспериментальные данные и результаты численного моделирования, которые показывают возможности современной сейсмической аппаратуры, методов наблюдения и интерпретации данных в решении задач выявления изменений в грунтах основания железнодорожной насыпи. По существу, получено экспериментальное обоснование для расширения научных основ геофизических изысканий, в первую очередь, при мониторинге состояния насыпи и выявлении опасных процессов на ранней стадии. Важно, что предлагаемый подход в определенной степени закрывает брешь в наборе геофизических методов для непрерывного контроля состояния грунтов оснований пути.

Для этого предлагается использование комплекс методик, включающих структурные изыскания (например, малоглубинную сейморазведку), численное моделирование НДС насыпи, и новый способ, основанный на сейсмической регистрации низкочастотных (периоды 100 с и более) колебаний, возникающих при прохождении железнодорожного состава. Представлена схема интеллектуального мониторинга с разными типами датчиков и сбора и передачи данных. Уверенны, что предлагаемые разработки позволят повысить безопасность на транспорте.

## БЛАГОДАРНОСТИ

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

Особую благодарность за создание расчетных моделей выражаем научному консультанту геотехнического отдела ООО«НИП Информатика» кандидату геолого-минералогических наук Е. В. Федоренко.

### Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Явна В.А., Каспржицкий А.С., Кругликов А.А., Лазоренко Г.И. и др. Этапы проектирования интеллектуальной системы мониторинга объектов транспортной инфраструктуры // Управление большими системами. – 2012. – № 38. – С. 105–120. [Yavna VA, Kasprzhitsky AS, Kruglikov AA, Lazorenko GI, et al. Design stages of intelligent system for transport infrastructure monitoring. *Large-Scale Systems Control*. 2012;(38):105-120. (In Russ.)].

2. Коншин Г.Г. Упругие деформации и вибрации земляного полотна: учеб. пособие. – М.: МИИТ, 2010. – 180 с. [Konshin GG. Elastic deformation and vibration of the roadbed: schoolbook. Moscow: МИИТ; 2010. (In Russ.)].
3. Фуникова В.В. Закономерности динамической устойчивости песчаных и глинистых грунтов (монография). LAP LAMBERT Academic Publishing Saarbrücken, Deutschland, 2011. 199 с. [Funikova VV. *Regularities of dynamic stability of sandy and clay soils* (monograph). LAP LAMBERT Academic Publishing Saarbrücken, Deutschland, 2011. (In Russ.)].
4. 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. [Kapustian NK, Antonovskaya GN, Basakina IM, Danilov AV. Model Experiment of Railway Track Foundation State Using Seismic Methods. *Science and Technological Developments*. 2018;97(1):35-48. (In Russ.)]. doi: 10.21455/std2018.1-4
5. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды. – М.: Наука, 1985. – 408 с. [Riznichenko YuV. *Problemy sejsmologii. Izbrannye trudy*. Moscow: Nauka; 1985. (In Russ.)].
6. Николаев А.В. Проблемы нелинейной сейсмики: сб. статей. – М.: Наука, 1987. – 288 с. [Nikolaev AV. *Problemy nelinejnoj sejsmiki: collected papers*. Moscow: Nauka; 1987. (In Russ.)].
7. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Свод правил. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200000255>. Дата обращения: 06.11.2019. [Code of practice. engineering geological site investigations for construction. Available from: <http://docs.cntd.ru/document/1200000255>. (In Russ.)].
8. Ключева В.Н., Покровская М.В., Баранов М.И. (Производственное геологическое объединение «Гидроспецгеология», Гидрогеологическая экспедиция 29 района. Архангельский филиал ФБУ «ТФГИ по Северо-Западному федеральному округу»). Инженерно-геологическая съемка масштаба 1:200000. Листы: Р-37-III, IV, X, XI, XII, XVI, XVII. 1984. [Klueva VN, Pokrovskaya MV, Baranov MI. (Production Geological Association “Ggidropspegeologiya”, Hydrogeological expedition 29 district. Arkhangelsk branch of FBU “TFGI in the North-Western Federal district”). Engineering-geological mapping of scale 1:200000. Sheets: P-37-III, IV, X, XI, XII, XVI, XVII. 1984. (In Russ.)].
9. Пьянков С.А., Азизов З.К. Механика грунтов: учеб. пособие. – Ульянов. гос. техн. ун-т. Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 103 с. [Pyankov SA, Azizov ZK. *Mekhanika gruntov: schoolbook*. Ulyanovsk: USTU; 2008. (In Russ.)].
10. Антоновская Г.Н., Афонин Н.Ю., Басакина И.М., Капустян Н.К. и др. Возможности сейсмических методов для оценки состояния земляного полотна железнодорожных путей в условиях Крайнего Севера // Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 3. – № 3. – С. 133–161. [Antonovskaya GN, Afonin NY, Basakina IM, Kapustian NK, et al. Possibilities of seismic methods for the estimation of a railway roadbed state under the conditions of the far north. *Transportation Systems and Technology*. 2017;3(3):133-161. (In Russ., Engl.)]. doi: 10.17816/transsyst201733133-161
11. Форс-балансный акселерометр АС-73/72/71. Доступно по: <https://www.vulcan-inc.ru/index.php/equipment/geosig/ac-73>. Ссылка активна на 06.11.2019. [Force-

- balanced accelerometer AC-73/72/71. [Internet]. [cited 2019 November 6]. Available from: <https://www.vulcan-inc.ru/index.php/equipment/geosig/ac-73> (In Russ.).
12. Titan posthole accelerometer [Internet]. [cited 2019 November 6]. Available from: <https://www.nanometrics.ca/products/accelerometers/titan-posthole-accelerometer>.
  13. Trillium Compact [Internet]. [cited 2019 November 6]. Available from: <https://www.nanometrics.ca/products/seismometers/trillium-compact>.
  14. Trillium Compact Posthole [Internet]. [cited 2019 November 6]. Available from: <https://www.nanometrics.ca/products/seismometers/trillium-compact-posthole>.
  15. Trillium Cascadia [Internet]. [cited 2019 November 6]. Available from: <https://www.nanometrics.ca/products/seismometers/trillium-cascadia>.
  16. Многоканальный оптоэлектронный деформометр продольного типа – МОЭД-1П. Доступно по: <http://www.misd.ru/cooperation/commercial/10133/>. Ссылка активна на 06.11.2019. [Mnogokanal'nyj optoelektronnyj deformometr prodol'nogo tipa – MOED-1P. [Internet]. [cited 2019 November 6]. Available from: <http://www.misd.ru/cooperation/commercial/10133/>. (In Russ.).]
  17. Вознесенский Е.А. Землетрясения и динамика грунтов // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 2. – С. 101–108. [Voznesenskiy EA. Zemletryaseniya i dinamika gruntov. *Sorosovskiy obrazovatel'niy journal*. 1998(2):101-108. (In Russ.).]

**Сведения об авторах:**

Антоновская Галина Николаевна, доктор технических наук;  
адрес: 163000, Архангельск, наб. Северной Двины, 23;  
eLibrary SPIN: 7696-7625; ORCID: 0000-0002-8105-5892;  
E-mail: [essm.ras@gmail.ru](mailto:essm.ras@gmail.ru)

Капустян Наталия Константиновна, доктор физико-математических наук;  
eLibrary SPIN: 8637-6226; ORCID: 0000-0002-3478-2691;  
E-mail: [nkapustian@gmail.com](mailto:nkapustian@gmail.com)

Ромен Юрий Семенович, доктор технических наук;  
eLibrary SPIN: 9426-4849;  
E-mail: [uromen@mail.ru](mailto:uromen@mail.ru)

Данилов Алексей Викторович;  
eLibrary SPIN: 9234-2212; ORCID: 0000-0002-4748-2591;  
E-mail: [danilov.aleksey.vikt@gmail.com](mailto:danilov.aleksey.vikt@gmail.com)

**Information about the authors:**

Galina N. Antonovskaya, Doctor of Technical Sciences;  
eLibrary SPIN: 7696-7625; ORCID: 0000-0002-8105-5892;  
E-mail: [essm.ras@gmail.ru](mailto:essm.ras@gmail.ru)

Natalia N. Kapustian, Doctor of Physical and Mathematical Sciences;  
eLibrary SPIN: 8637-6226; ORCID: 0000-0002-3478-2691;  
E-mail: [nkapustian@gmail.com](mailto:nkapustian@gmail.com)

Yuriy S. Romen, Doctor of Technical Sciences;  
eLibrary SPIN: 9426-4849;  
E-mail: uromen@mail.ru

Alexey V. Danilov;  
eLibrary SPIN: 9234-2212; ORCID: 0000-0002-4748-2591;  
E-mail: danilov.aleksey.vikt@gmail.com

**Цитировать:**

Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Ромен Ю.С., Данилов А.В. Использование широкополосной сейсмической аппаратуры в задачах интеллектуального мониторинга земляного полотна железнодорожного пути // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 96–114. doi: 10.17816/transsyst20195496-114

**To cite this article:**

Antonovskaya GN, Kapustian NK, Romen YuS, Danilov AV. The broadband seismic equipment application in problems of roadbed railway smart monit. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(4):96-114. doi: 10.17816/transsyst20195496-114