

**Г. Н. Антоновская, Н. Ю. Афонин, И. М. Басакина, Н. К. Капустян,  
Б. Г. Басакин, А. В. Данилов**

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

## **ВОЗМОЖНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПУТЕЙ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА**

Дата поступления 06.10.2017

Решение о публикации 28.10.2017

**Аннотация.** В статье представлены сейсмические методы обследования и результаты мониторинга состояния железнодорожной насыпи с использованием сейсмических методов в районе Крайнего Севера.

**Цель:** Проработать технологию выявления наличия причин просадки железнодорожной насыпи на участке Северной железной дороги.

**Методы:** Обследования грунтов оснований железнодорожной насыпи путем применения комплекса активных и пассивных сейсмических методов, включающий: сейсморазведочный метод преломленных волн, метод многоканального анализа поверхностных волн и инженерно-сейсмический метод, основанный на спектральном анализе сейсмического шума.

**Результаты:** Комплекс методов позволил оценить состояние системы «насыпь-грунты оснований». Была выявлена относительно большая мощность ослабленных грунтов до 9 м, возможно с включениями торфа, залегающих под железнодорожной насыпью. Появлению просадок способствуют динамическая нагрузка от поездов и резонансный эффект в ослабленном грунте, приводящие к его сжатию.

**Практическая значимость:** Разработка технологии экспресс-оценки состояния железнодорожной насыпи для оперативного обнаружения опасного явления на ранней стадии его развития является актуальной и востребованной задачей.

**Ключевые слова:** земляное полотно железнодорожных путей, пассивные и активные сейсмические методы, Крайний Север

### **Введение**

На территории РФ в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов эксплуатируется около 5 000 км линий железных дорог (включая БАМ и большую часть Транссиба) [1]. Промышленное освоение территорий на Крайнем Севере и в Сибири предполагает увеличение протяженности путей одновременно при их активной эксплуатации. Характерными особенностями основания полотна с участками вечной мерзлоты,

заболоченности, распространения карстовых процессов является повышение деформативности пути, вызванное криогенными, карстово-суффозионными процессами в грунтах оснований.

С целью увеличения безопасности на железнодорожном транспорте ОАО «РЖД» особое внимание уделяет разработке и внедрению различных методов мониторинга земляного полотна мобильными средствами. Порядок работ на неустойчивых местах земляного полотна устанавливают индивидуально на основании данных инструментальных и визуальных наблюдений, натурных и инженерно-геологических (геофизических) обследований, расчетов прочности, устойчивости и эксплуатационной надежности объектов. В последние годы в России и за рубежом получили развитие полевые методы исследования грунтов, прежде всего, это статическое и динамическое зондирование. Отметим, что при всей эффективности применяемых методов они не могут выполнять постоянный (непрерывный) контроль земляного полотна и подстилающих его грунтов. Существенно обнаружение явления на ранней стадии его развития, что затруднено при применении лишь как разовой диагностики на опасных/проблемных участках. Существует необходимость более глубокой проработки данного вопроса.

Информативность изучения верхней части разреза (ВЧР) земной коры может быть существенно увеличена с помощью применения новых геофизических технологий, использующих приемы комплексирования различных методов. В последнее время с развитием аппаратной и методической базы применение пассивных сейсмических методов, как правило, микросейсмических, приобретает все большее значение в геофизических исследованиях [2, 3, 4]. Основными преимуществами таких методов являются отсутствие необходимости в специальных источниках зондирующего сигнала, относительная простота и доступность реализации.

Понятие «микросейсмические наблюдения» объединяет целый набор технологий, основанных на анализе волн разного генезиса и типов (сейсмическая эмиссия, техногенные сигналы, поверхностные волны и пр.). Нами прорабатываются подходы обследования ВЧР путем выделения «полезного» сигнала из техногенных микросейсм. Существенно, что для получения принципиально разнородной информации о среде зарегистрированное волновое поле может параллельно обрабатываться различными способами, опирающимися на разные «полезные» составляющие микросейсм.

Разработка технологии сейсмического мониторинга может использоваться как самостоятельно, для получения экспресс-оценки состояния земляного полотна, так и в сочетании с традиционными методами для выявления полной картины происходящих изменений геологической среды в районе размещения железнодорожных путей.

## Постановка задачи

Эксплуатационная длина главных путей Северной железной дороги (СЖД) насчитывает около 1045 км, большая часть из которых размещена в условиях Крайнего Севера. Проработка вопросов технологии микросейсмических наблюдений и способам обработке данных проводилась на участке СЖД, Онежский район Архангельской области.

Объектом исследований является земляное полотно железной дороги в районе заторфованных грунтов. Решалась задача по определению причин просадки грунтов на участке, отмеченный на схеме Рис. 1.

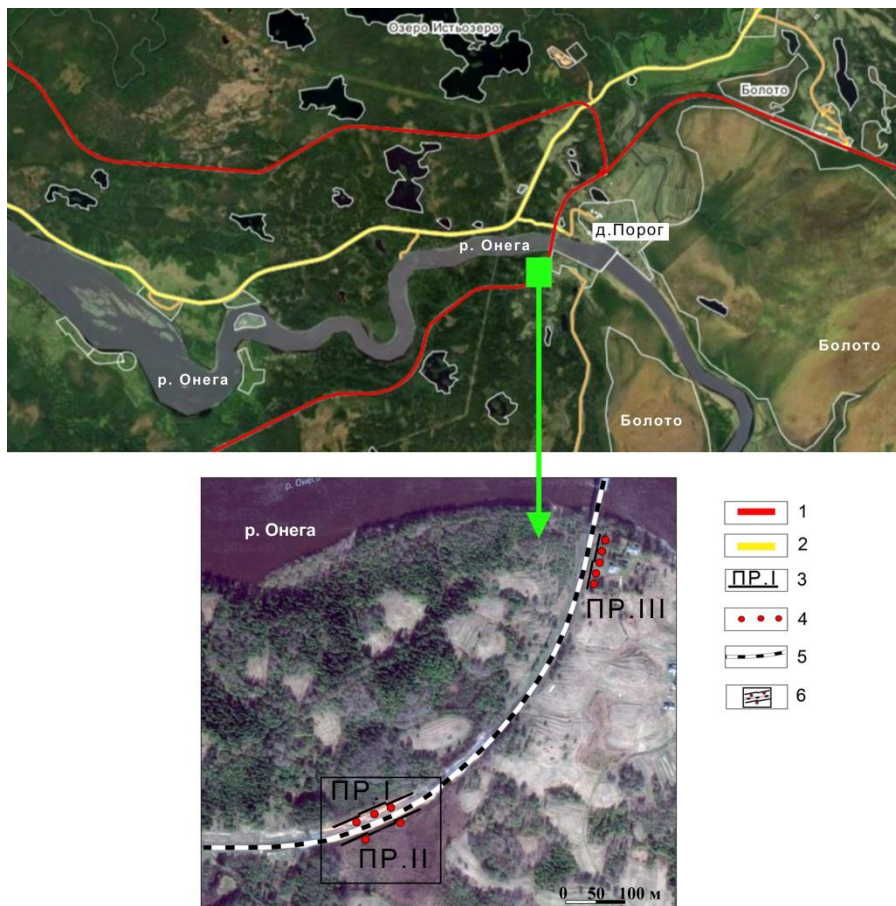


Рис. 1. Схема проведения работ: 1 – линия железной дороги; 2 – автомобильная трасса; 3 – профили инженерной сейсморазведки; 4 – места установки сейсмической аппаратуры; 5 – железная дорога; 6 – участок обследования

Инженерно-геологические условия территории Онежского района определяются равнинным и слабоволнистым характером местности, развитием на преобладающей части территории поверхностных песчано-глинистых ледниковых отложений, песчано-глинистых осадков последних морских трансгрессий, различной их мощности [5, 6, 7].

Существенным фактором, от которого зависит состояние железнодорожного полотна, являются инженерно-геологические характеристики грунтов, уровень грунтовых вод и литологический состав

подстилающих пород. В целом, согласно СП 11-105-97 [8], территория района отнесена ко 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 [7].

Особенности климата района (избыточное увлажнение) и литологический состав слабопроницаемых покровных отложений характеризуют приповерхностное залегание грунтовых вод (менее 2 м). Поверхность грунтовых вод повторяет очертания пологоволнистого рельефа и местами, во впадинах между холмами и грядами, смыкается с болотными водами. На заболоченных территориях мощность торфа колеблется от десятых долей метра до 2 м. На болотных массивах мощность торфа, как правило, составляет 3-6 м, местами достигает 8-10 м. Торф подстилается обычно слабыми грунтами.

### **Принятые допущения**

Для данного участка железнодорожной насыпи, в связи с отсутствием информации об инженерно-геологических изысканиях и типе земляного полотна, исходя из общих сведений о районе проведения работ [5, 7] и СП 32-104-98 [9], нами сделано предположение, что насыпь высотой до 3 м, спроектирована и выполнена с полным или частичным удалением торфа из основания с заменой его минеральным грунтом (песчано-гравийная смесь).

### **Сейсмическая аппаратура**

При регистрации микросейсм района размещения железнодорожной насыпи, а также воздействий на грунт основания от проходящих составов, использовалась широкополосная сейсмическая аппаратура CMG-6TD фирмы Guralp (Великобритания) [10] и Trillium Compact 120s фирмы Nanometrics (Канада) [11]. Датчики были установлены согласно схеме Рис. 1. Оси датчиков располагались вдоль (X) и поперек (Y) насыпи. Шаг между датчиками был выбран 15 м исходя из предполагаемой зондирующей глубины ВЧР.

Для малоглубинных сейсмических исследований ВЧР применялась телеметрическая сейсморазведочная система ТЕЛСС-402 фирмы ООО «ГЕОСИГНАЛ» [12]. Прием сейсмических Р и S волн осуществлялся вертикальными и горизонтальными сейсмоприемниками. Возбуждение волн проводилось ударами кувалды весом 8 кг по плоской металлической плите. Схема расположения профилей представлена на Рис. 1. Расстояние между приемными каналами 2 м, суммарная длина профиля 150 м.

Обработка материалов проводилась с помощью специализированных программ «RadExPro 2016» [13].

### Материалы и методы исследования

Основным источником относительно сильных сейсмических колебаний в районе пролегания железнодорожного полотна СЖД является железнодорожный транспорт. При совпадении резонансной частоты пород системы «насыпь-подстилающие грунты оснований» с частотой сейсмических колебаний от проходящих составов, динамическая нагрузка на насыпь существенно возрастает, что может привести к чрезвычайным ситуациям.

В условиях возможных вариаций состояния грунтов насыпи (карстоопасные районы, заболоченные участки) при невозможности или нецелесообразности ремонтных работ по ее реконструкции оптимальными являются непрерывные (мониторинговые) наблюдения за резонансной частотой грунтов. В данном случае, изменение резонансной частоты будет являться индикатором происходящих в грунтах процессов изменения их состояния. В связи с этим, возникает необходимость оценки резонансных частот грунтов, которые могут быть рассчитаны как теоретически, так и экспериментально.

Теоретический расчет резонансной частоты выполняется при наличии информации о скоростях поперечных волн в исследуемой среде по формуле [14]:

$$f_{rn} = \frac{(2n+1)V_s}{4Z}, \quad (1)$$

где  $V_s$  – средняя скорость поперечных волн в верхнем слое;  $Z$  – мощность верхнего слоя;  $n$  – номер моды.

Основным преимуществом теоретического расчета является возможность моделирования, позволяющего оценить изменения значений собственных частот при изменении состояния системы «насыпь-подстилающие грунты оснований» (например, за счет влагонасыщенности, глубины промерзания и т.д.) и/или ее строения (например, за счет изменения мощности насыпи, изменения характеристик строительного материала и др.). Таким образом, результаты теоретических расчетов, могут быть использованы при планировании мероприятий, направленных на реконструкцию и укрепление железнодорожных насыпей.

В основу эмпирических исследований был положен комплекс пассивных и активных сейсмических методов.

Для расчета резонансной частоты по данным пассивных сейсмических наблюдений, существует ряд методов:

1. Инженерно-сейсмический метод, основанный на спектральном анализе сейсмического шума, позволяющий из всего спектра микросейсм

выделить сигналы, соответствующие гармоническим источникам колебаний [15]. Оценка динамической характеристики записи основана на получении спектров мощности  $S_{ij}(f)$  для каждой из компонент регистрации ( $i, j = X, Y, Z$ ) и функции когерентности  $K_{ij}(f)$  попарно для компонент:

$$K_{ij}(f) = \frac{|S_{ij}(f)|}{\sqrt{S_{ii}(f) \cdot S_{jj}(f)}}, \quad (2)$$

где  $|S_{ij}(f)|$  – взаимный осредненный спектр. Функция когерентности практически является коэффициентом корреляции для каждой частотной составляющей, присутствующей на компонентах регистрации [16].

Для слежения за динамикой микросейсмического процесса анализируются изменения во времени этих оценок. Проводятся расчеты в скользящем по времени окне, строятся спектрально-временные диаграммы (СВАН) –  $S_{ij}(f, t)$  для соответствующих записей.

2. Метод Н/В – отношения горизонтальных компонент микросейсм к вертикальным. Данный метод описан в работе [17] и основан на том, что резонансная частота фундаментальной моды может быть определена из отношения спектров горизонтальных и вертикальных компонент сейсмического шума:

$$f_{r0} = \sqrt{\frac{S^2(\omega)_{NS} + S^2(\omega)_{WE}}{2S^2(\omega)_V}}, \quad (3)$$

где  $S(\omega)_{NS}$ ,  $S(\omega)_{WE}$  – спектры горизонтальных компонент записи;  $S(\omega)_V$  – спектр вертикальной компоненты записи.

Таким образом, в зависимости от условий, возможно, применять как теоретический, так и эмпирический подходы к определению резонансных частот грунтов железнодорожных насыпей.

Методом многоканального анализа поверхностных волн (MASW) на основе полевых записей волнового поля получены скоростные модели изменения значений скоростей поперечных волн. Данный метод был впервые описан в работах [18, 19, 20] и в последующем развит в работе [21]. Метод позволяет получать одномерные скоростные модели геологической среды вдоль линейных сейсморазведочных профилей на основе анализа дисперсионных свойств поверхностных волн. В основе метода многоканального анализа поверхностных волн лежит спектрально-волновое (f-k) преобразование сигнала с последующим его сложением по всем каналам [22].

В качестве активного сейсмического метода использовалась инженерная сейсморазведка на преломленных (МПВ) и отраженных (ОГТ) волнах [23], которая применялась для построения геолого-геофизических разрезов, выделения возможных зон неоднородностей и определения скоростных характеристик среды. В основе МПВ лежит определение

времени пробега преломлённой волны (продольной или поперечной) от источника её возбуждения до пункта регистрации. Одним из условий применения данного метода является увеличение скорости продольных волн с глубиной. Вычисляется глубина залегания по системе встречных и нагоняющих годографов, совмещенными способами  $t_0$  и полей времен, строятся преломляющие границы; граничная скорость в преломляющем пласте и отношение  $V_s/V_p$  характеризует его литологический состав [24].

## Результаты исследований

На Рис. 2. представлен обобщенный скоростной глубинный разрез среды по профилю I (схема представлена на Рис. 1) на участке с нарушениями в системе «насыпь-грунты оснований». Комплексирование активных сейсмических методов позволяет получить более детальный скоростной разрез. Методом многоканального анализа поверхностных волн удалось выделить нижнюю границу насыпи, которую не удалось обнаружить по методу МПВ, из-за сильной зашумленности сигнала.

Таким образом, первая граница выделяется на глубине от 0 до 3 м, средние скорости поперечных волн, определенные по методу MASW, составляют 150 м/с, отношение  $V_s/V_p = 0.33 - 0.4$  и соответствуют щебеночно-песчаному слою [5, 7].

Преломляющая граница выделяется на глубине от 2 до 5 м, с заметным погружением в центре до 8-9 м. Средние скорости продольных волн до границы  $V_p = 333 - 443$  м/с, что характеризует данный слой как неводонасыщенный. Отношение  $V_s/V_p = 0.56$  позволяет предположить, что данному слою соответствуют переслаивание супесей, суглинка и песка ледникового возраста [5, 7]. Далее залегает слой с повышенными скоростями до 2117 м/с, что соответствует глинистым водонасыщенным отложениям.

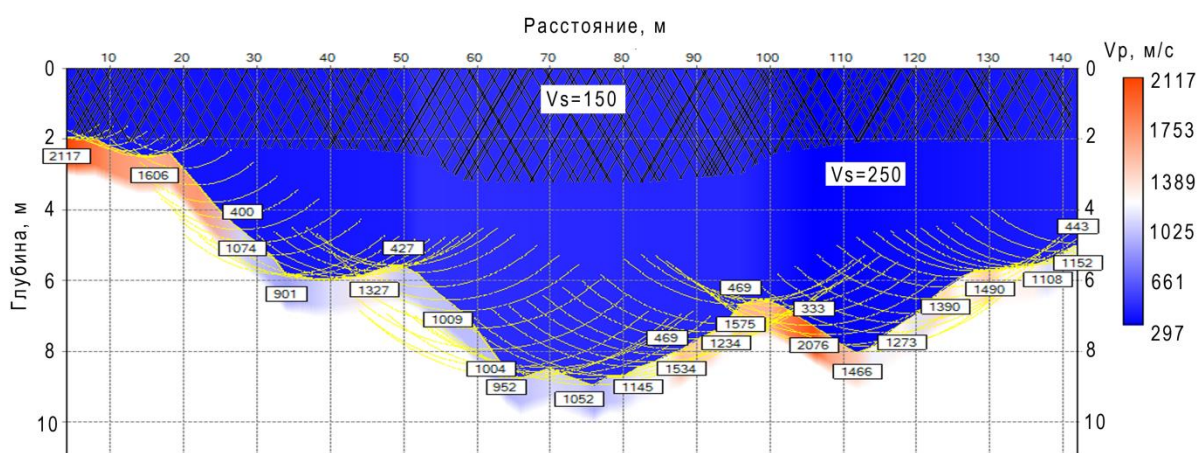


Рис. 2. Обобщенный скоростной сейсмический разрез по профилю I, штрихованные линии – нижняя граница насыпи, выделенная по методу многоканального анализа поверхностных волн

На Рис. 3 представлен скоростной глубинный разрез среды по профилю II (схема на Рис. 1) на участке с нарушениями в системе «насыпь-грунты оснований» по другую сторону от насыпи, чем профиль I. Аналогично профилю I, выделяется слой щебеночно-песчаных отложений по методу MASW, на глубине от 0 до 4 м, средние скорости поперечных волн составляют 150 м/с, отношение  $V_s/V_p = 0.3 - 0.47$ .

Преломляющая граница, согласно обоим методам MASW и МПВ, выделяется на глубине от 8 до 12 м с большим погружением в начале профиля. Средние скорости продольных волн до границы  $V_p = 315 - 495$  м/с, средние скорости поперечных волн ( $V_s$ ) на глубинах от 3 до 13 м в пределах от 250 до 280 м/с, отношение  $V_s/V_p = 0.56$ . Можно предположить, что данные характеристики соответствуют переслаиванию ила суглинистого, супесей, суглинка и песка ледникового возраста.

В нижнем слое отмечаются высокие граничные скорости до 2397 м/с, предположительно соответствующие глинистым водонасыщенным отложениям [7].

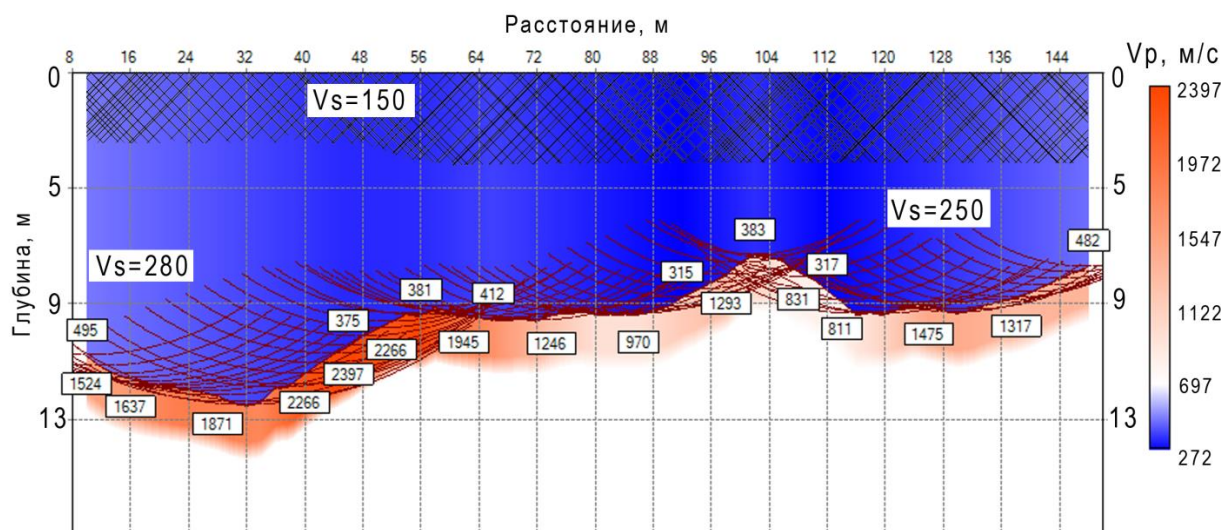


Рис. 3. Обобщенный скоростной сейсмический разрез по профилю II (4-6), штрихованные линии – нижняя граница насыпи, выделенная по методу многоканального анализа поверхностных волн

Таким образом, на неблагоприятном участке выделяется слой грунтов (от 4 до 8 м) с пониженными скоростями, имеющий различный наклон – рельеф, созданный ледниковой аккумуляцией. Данная особенность подчеркивается и повышенными скоростными характеристиками – водонасыщенностью глинистых пород, что, возможно, является одной из причин просадки грунтов на данном участке.

На Рис. 4 представлен скоростной глубинный разрез среды по профилю III для благоприятного участка без нарушений в системе «насыпь-грунты оснований». Слой щебеночно-песчаных отложений по методу MASW выделяется на глубинах около 1.5 м. Преломляющая граница



выделяется на глубинах от 2.5 до 4 м с небольшим прогибанием до 5 м в центре. Средние скорости продольных волн до границы  $V_p = 344 - 702$  м/с. Средние скорости поперечных волн ( $V_s$ ) в верхнем слое от 150 до 250 м/с, отношение  $V_s/V_p = 0.35 - 0.43$ . Можно предположить, что данные характеристики, аналогично и предыдущему участку, соответствуют переслаиванию щебеночно-песчаного слоя, суглинистого ила, супесей, суглинка и песка ледникового возраста [7]. Далее залегает слой, предположительно, глинистых водонасыщенных отложений (скорости от 1212 до 2102 м/с).

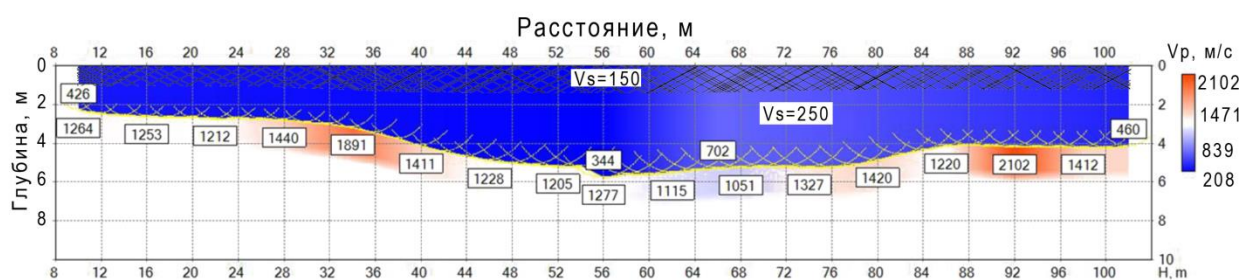


Рис. 4. Обобщенный скоростной сейсмический разрез по профилю Ш (7-8), штрихованные линии – нижняя граница насыпи, выделенная по методу многоканального анализа поверхностных волн

Как видно из Рис. 4, для данного участка слой с пониженными скоростями имеет значительно меньшую мощность и относительно плоскую границу, показатели увеличения скорости единичны. Данный факт является косвенным признаком большей несущей способности грунтов на этом участке.

Таким образом, использование активных сейсмических методов позволило получить скоростную модель системы «насыпь-грунты оснований» до глубин 22.5 м. Существенно, что величины скоростей и форма границ позволяют предположить природу неблагоприятных явлений в грунте полотна.

Проведем комплексирование полученной информации с результатами пассивных сейсмических методов. Рассмотрим результаты спектрального анализа на основе данных пассивных сейсмических методов. Для оценки уровня воздействия поездов для участка исследования сравнивались спектры ускорений до и во время движения грузового состава (Рис. 5). Выделяются два широкополосных пика, соответствующие первой и второй модам колебания системы «насыпь-подстилающие грунты оснований», диапазоны – 1.6-2.4 Гц и 4.7-5.5 Гц. В среднем движение грузовых поездов увеличивает общий уровень колебаний системы в 100 раз (Рис. 5а), при этом наибольшему усилению амплитуд ускорений подвергается вторая мода. Наиболее «ярко» выделяется частота 5.9 Гц, появляющаяся при движении состава и характеризующая максимальную нагрузку на систему «насыпь-

подстилающие грунты оснований». При этом амплитуда поперечной компоненты увеличивается еще в 2 раза по отношению к увеличениям на других компонентах и для других частот, связанными с движением поезда (Рис. 5б). Возможно, это обусловлено кривизной исследуемого участка пути (Рис. 1).

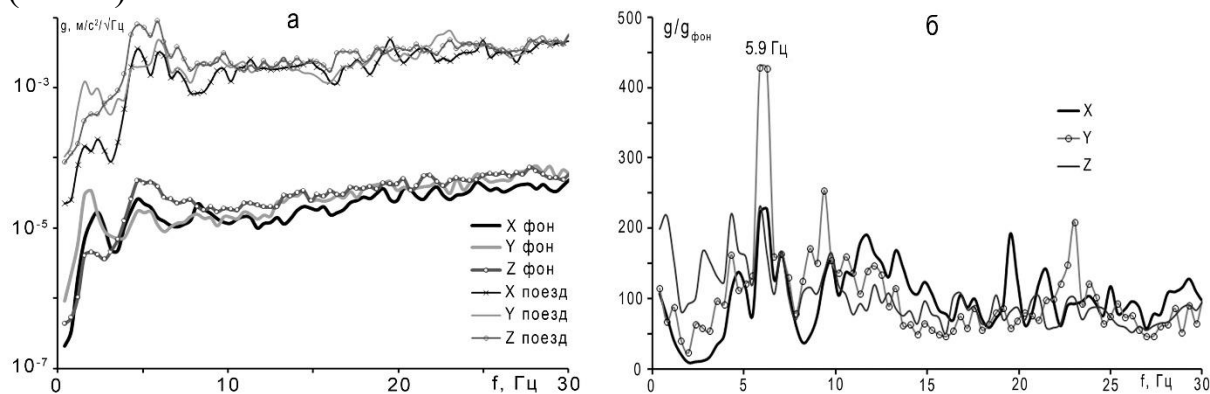


Рис. 5. Спектры воздействия до и во время движения товарного состава для неблагоприятного участка земляного полотна (а) и спектры ускорения при движении поезда (б)

На СВАН-диаграмме спектров мощности скоростей смещений для неблагоприятного участка, представленной на Рис. 6, также выделяется две вертикальные полосы в районе 2 Гц и 5 Гц, отражающие динамику колебаний системы «насыпь-грунты оснований». Наиболее отчетливо проявляется сигнал на частоте 2 Гц (одна из колебательных мод системы) для горизонтальных составляющих (X, Y), что обусловлено конструктивными особенностями насыпи.

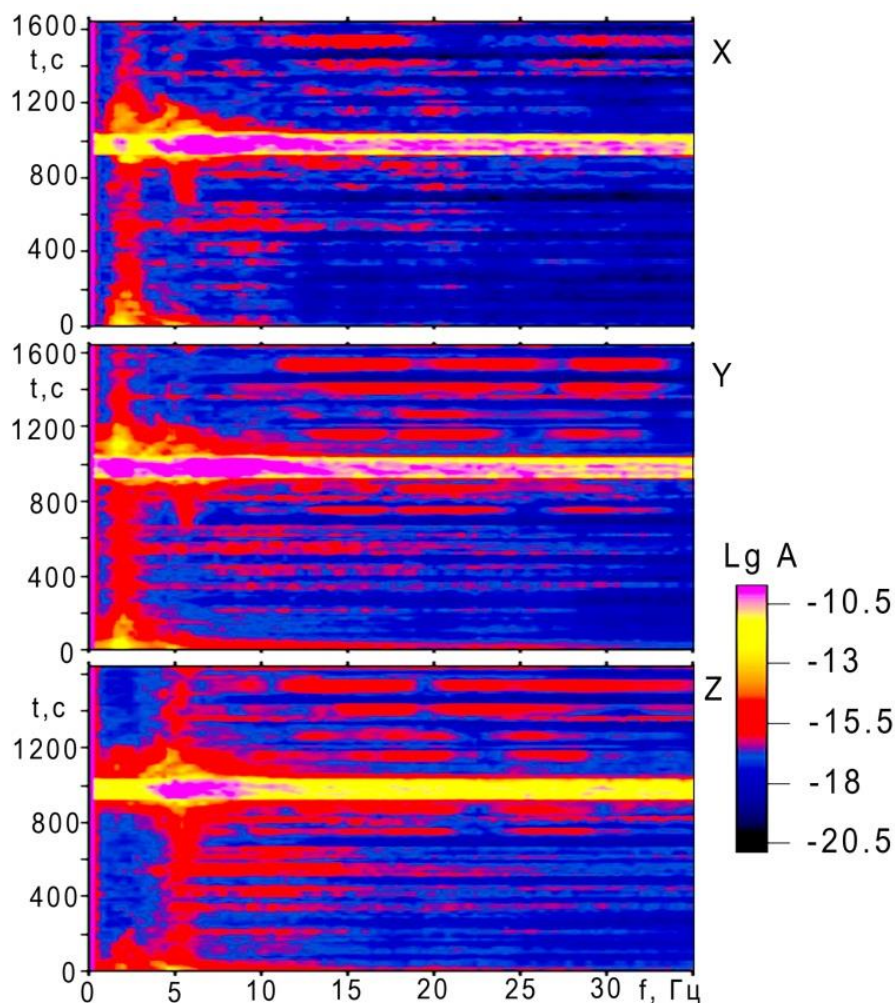


Рис. 6. СВАН-диаграмма системы «насыпь-подстилающие грунты оснований». Яркий широкополосный горизонтальный сигнал – проезжающий грузовой состав

Сигнал на частоте около 5 Гц лучше «виден» на вертикальной компоненте Z, на горизонтальных компонентах сигнал проявляется при воздействии поезда (яркий широкополосный горизонтальный сигнал), что отражает появление резонанса при движении состава с системой «насыпь-грунты оснований».

Для сравнительного анализа рассмотрим аналогичную ситуацию для благоприятного участка (Рис. 1), уровень бровки насыпи не превышает 0.4 м. На Рис. 7 представлены спектры воздействия до и во время движения грузового состава для этого участка земляного полотна и спектры ускорения при движении состава.

Анализ Рис. 7 показывает достаточно равномерное распределение нагрузки по частотам. Разница в уровнях мощности фона микросейсм в спокойное время и при движении поезда больше на три порядка, чем для неблагоприятных участков. В спектрах при движении состава по данному участку наиболее ярко выделяется пик на частоте 2.0 Гц, что, скорее всего, обусловлено явлением резонанса с системой «полотно-грунты оснований».

Однако, абсолютный уровень воздействия мал и не оказывает существенного влияния на состояние рассматриваемой системы.

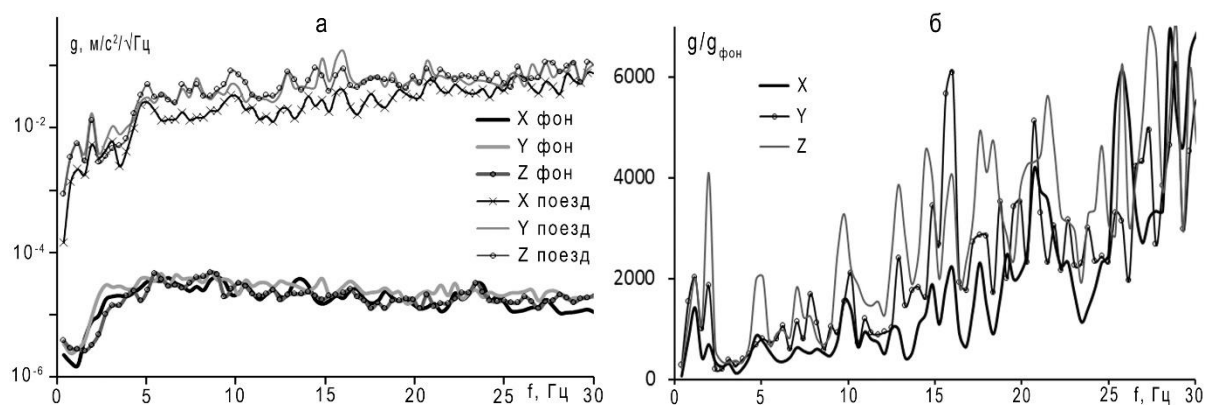


Рис. 7. Спектры воздействия до и во время движения товарного состава для благоприятного участка земляного полотна (а) и спектры ускорения при движении поезда (б)

### Обсуждение результатов

К опасным физико-геологическим процессам на рассматриваемой территории вдоль Северной железной дороги относятся:

- наличие в верхнем слое геологического разреза неустойчивых по физическим характеристикам грунтов;
- заболачивание, вызванное геоморфологическим положением отдельных участков дороги, высоким уровнем грунтовых вод территории, наличием в разрезе рыхлых отложений слабопроницаемых глинистых отложений.

Результаты активных сейсмических методов позволили выявить на исследуемом участке относительно большую мощность ослабленных грунтов до 9 м, возможно с включениями торфа, залегающих под железнодорожной насыпью. Нагрузка от поездов в совокупности с резонансным эффектом, образующимся в ослабленном грунте и обнаруженным пассивными сейсмическими методами, приводят к его повышенным деформациям, что способствует появлению просадок. Деформации, вызванные явлением резонанса, незначительны по сравнению с нагрузкой, создаваемой проезжающими составами.

Мониторинг состояния насыпи (участок длиной до 300 м) для анализа резонансных частот возможен с использованием одного датчика, предпочтительно акселерометра с нижней частотой от 1 Гц, но и использование короткопериодного велосиметра также будет достаточным условием.

Следующим этапом данных исследований является задание расчетной модели и рассмотрение различных ситуаций при изменении физических характеристик подстилающих грунтов и воздействий от поездов.

В конечном результате предполагается создание действующего макета технологии экспресс-оценки, включающего экспериментальную часть: аппаратуру, процедуру сбора, обработки и передачи данных, алгоритма принятия решения. При выполнении теоретической части планируется получение новых представлений о взаимодействии подвижной системы «насыпь-подстилающие грунты оснований» и создание базы данных об изменении несущей способности грунтов при реальных природно-техногенных воздействиях. Необходимо разработать методику прогнозирования поведения полотна при различных вариантах климатических изменений и разных нагрузках.

### **Благодарности**

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-20-02119 «Разработка технологии сейсмического мониторинга и экспресс оценка состояния земляного полотна железнодорожных путей в условиях Крайнего Севера и Сибири».

### **Библиографический список**

1. Евразия Вести IX 2010.  
– URL: <http://www.eav.ru/publs.php?number=2010-09> (28.08.2017).
2. Cheng F. Multichannel analysis of passive surface waves based on cross correlations / F. Cheng, J. Xia, Y. Luo, Z. Xu, L. Wang, C. Shen, R. Liu, Y. Pan, B. Mi, Y. Hu // *Geophysics*. – 2016. – no. 81(5). – pp. 1–10. DOI: 10.1190/geo2015-0505.1.
3. Draganov D. Reflection images from ambient seismic noise / D. Draganov, X. Campman, J. Thorbecke, A. Verdel, K. Wapenaar // – *Geophysics*, 2009. – no. 74(5). – pp. A63–A67.
4. Le Feuvre M. Passive multi-channel analysis of surface waves with cross-correlations and beamforming. Application to a sea dike / M. Le Feuvre, A. Joubert, D. Leparoux, P. Côte // *Journal of Applied Geophysics*, 2015. – no. 114. – pp. 36–51.
5. Схема территориального планирования Онежского муниципального района. Том 1. – Санкт-Петербург, 2014. – URL: [http://www.onegaland.ru/about/gradostroitelstvo/skhema\\_terr\\_plan/](http://www.onegaland.ru/about/gradostroitelstvo/skhema_terr_plan/) (02.10.2017).
6. Зоренко Т. Н., Черемхина Г. М., Корепанов В. С., Вертунова Л. С., Левин В. И, Рыбалко А. Е. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Серия Онежская. Лист Q-37-XXXIII,

XXXIV. Объяснительная записка. Санкт-Петербург, 2000. – 118 с. – URL: <http://www.geokniga.org/sites/.../q-37-xxvii-xxviii-petrominsk-geosudarstvennaya-geologic> (02.10.2017).

7. Ключева В. Н., Покровская М. В., Баранов М. И. Инженерно-геологическая съемка масштаба 1:200000. Листы: Р-37-III, IV, X, XI, XII, XVI, XVII // Производственное геологическое объединение «Гидроспецгеология», Гидрогеологическая экспедиция 29 района. Архангельский филиал ФБУ «ТФГИ по Северо-Западному федеральному округу». – 1984.

8. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Свод правил. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200000255> (28.08.2017).

9. СП 32-104-98 Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм. – М.: ГОССТРОЙ России, 1999. – URL: <http://aquagroup.ru/normdocs/4321#i486962> (28.08.2017).

10. Guralp Systems. – URL: <http://www.guralp.com/> (28.08.2017).

11. Nanometrics. – URL: <http://www.nanometrics.ca> (28.08.2017).

12. Геосигнал. – URL: [www.geosignal.ru](http://www.geosignal.ru) (28.08.2017).

13. RadExPro. – URL: <http://radexpro.com/> (28.08.2017).

14. Lane J. W. Estimation of bedrock depth using the horizontal-to-vertical (H/V) ambient-noise seismic method / J. W. Lane, E. A. White, G. V. Steele, J. C. Cannia // Theses. Near Surface 2008-14th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. – Philadelphia, 2008. – pp. 1–13.

15. Юдахин Ф. Н. Инженерно-сейсмические исследования геологической среды и строительных конструкций с использованием ветровых колебаний зданий / Ф. Н. Юдахин, Н. К. Капустян, Г. Н. Антоновская. – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 156 с.

16. Юдахин Ф. Н. Выявление слабоактивных разломов платформ с использованием наносейсмической технологии / Ф. Н. Юдахин, Н. К. Капустян, Г. Н. Антоновская, Е. В. Шахова // Доклады академии наук. – 2005. – Т. 405. – № 4. – С. 533–538.

17. Nakamura Y. A. Method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // Quarterly Report of Railway Technical Research Institute. – 1989. – vol. 30. – no. 1. – pp. 25–33.

18. Al-Husseini M. I. Dispersion patterns of the ground roll in eastern Saudi Arabia / M. I. Al-Husseini, J. B. Glover, B. J. Barley // Geophysics, 1981. – no. 46(2). – pp. 121–137.

19. Mari J. L. Estimation of static corrections for shear-wave profiling using the dispersion properties of Love waves // Geophysics, 1984. – no. 49(8). – pp. 1169–1179.

20. Gabriels P. In situ measurements of shear-wave velocity in sediments with higher-mode Rayleigh waves / P. Gabriels, R. Snieder, G. Nolet // Geophysical prospecting, 1987. – no. 35(2). – pp. 187–196.

21. Park C. B. Multichannel analysis of surface waves / C. B. Park, R. D. Miller, J. Xia // *Geophysics*, 1999. – no. 64(3). – pp. 800–808.

22. Douze E. J. Seismic array noise studies at Roosevelt Hot Springs, Utah geothermal area / E. J. Douze, S. J. Laster // *Geophysics*, 1979. – no. 44(9). – pp. 1570–1583.

23. Боганик Г. Н. Сейсморазведка: Учебник для вузов / Г. Н. Боганик, И. И. Гурвич. – Тверь: Издательство АИС, 2006. – 744 с.

24. Метод преломленных волн / под ред. А. М. Епинатьевой. – М.: Недра, 1990. – 297 с.

#### **Информация об авторах:**

АНТОНОВСКАЯ Галина Николаевна, к.т.н., заведующая лабораторией сейсмологии, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Российской академии наук, e-mail: [essm.ras@gmail.com](mailto:essm.ras@gmail.com).

АФОНИН Никита Юрьевич, младший научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Российской академии наук, e-mail: [afoninnikita@inbox.ru](mailto:afoninnikita@inbox.ru)

БАСАКИНА Ирина Михайловна, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Российской академии наук, e-mail: [ibasakina@yandex.ru](mailto:ibasakina@yandex.ru)

КАПУСТЯН Наталия Константиновна, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Российской академии наук, e-mail: [nkapustian@gmail.com](mailto:nkapustian@gmail.com)

БАСАКИН Борис Григорьевич, инженер лаборатории сейсмологии, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Российской академии наук, e-mail: [bgborislen@gmail.com](mailto:bgborislen@gmail.com)

ДАНИЛОВ Алексей Викторович, младший научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Российской академии наук, e-mail: [danilov.aleksey.vikt@gmail.com](mailto:danilov.aleksey.vikt@gmail.com).

UDC 550.34.01

**G. N. Antonovskaya, N. Y. Afonin, I. M. Basakina, N. K. Kapustian,  
B. G. Basakin, A. V. Danilov**

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research  
Russian Academy of Science  
(Arkhangelsk, Russia)

**POSSIBILITIES OF SEISMIC METHODS FOR ESTIMATION OF RAILWAY  
SUBGRADE STATE IN CONDITIONS OF FAR NORTH**

Date of receipt 06.10.2017

Decision to publish on 28.10.2017

**Abstract.** The article presents results of monitoring state of railway subgrade using seismic methods in the Far North area.

**Purpose:** The purpose of the studies is to find out reasons of subgrade subsidence in turfed soils of Onezhsky District of Arkhangelsk Oblast.

**Methodology:** Studying soils in foundations of subgrade, a complex of active and passive methods was used, including: seismic exploration of refracted waves, multi-channel analysis of ground waves, and engineering seismic analysis based upon spectrum analysis of seismic noises. This complex enabled considering and estimating the system “subgrade-soils of foundations”.

**Results:** A relative high capacity of weak soils, probably containing turf, lying under subgrade. Sections of increased water saturation in subgrade soils were found out. Loads from passing trains and resonant effect in weak soils cause its compression resulting in emergence of subsidence. Resonant effects whereby are not that strong, whereas passing trains have a more significant impact on the state of subgrades.

**Practical significance:** Elaboration of technology of quick estimation of state of railway subgrade for immediate detection of a dangerous defect at an early stage of its development is a topical and acute challenge.

**Keywords:** railway track subgrade, seismic vibrodiagnostics, passive seismic methods, Far North.

## **Introduction**

In the territory of the Russian Federation, in the regions of permafrost soils, more approximately 5 thousand kilometres (including the Baikal-Amur Mainline and most part of the Trans-Siberian Railway) of railways are operated [1]. Industrial exploration of the Far North and Siberia territories requires extending railway tracks with their simultaneous operation. A distinguished feature of subgrade foundations with permafrost, swampy and karst sections is an increased proneness to deformation of tracks caused by cryogenic, karst and suffosion, and suffosion processes in subgrade soils.

In order to increase traffic safety, JSC “RZD” pays special heed to development and implementation of different methods for monitoring subgrade



by virtue of mobile devices. Order of works in unstable places is set individually basing on data of instrumental and visual monitoring, on-site and engineering and geological (geophysical) investigations, calculations of strength and operation reliability of objects. In recent years, in Russia and abroad field measurements of soils have been gaining their popularity. These are, first and foremost, cone penetration test (CPT) and standard penetration test (SPT). It should be noted that, despite these methods being very efficient, they are not able to perform constant (uninterrupted) control of subgrade and soils under it. It is significant to detect failure at its early stage of development which is complicated when only one single method is used on dangerous/problematic sections. There is a necessity in much deeper study of the issue.

The amount of information about upper part of section (UPS) of the Earth crust could be significantly increased by virtue of new geophysical technologies, employing integration of different methods. In recent time, with development of instrumental and methodological bases, application of passive seismic methods, mainly microseismic, have been gaining more significance in studies [2, 3, 4]. The main advantages of such methods are lack of necessity in special sounding signal sources, relative simplicity and realisation accessibility.

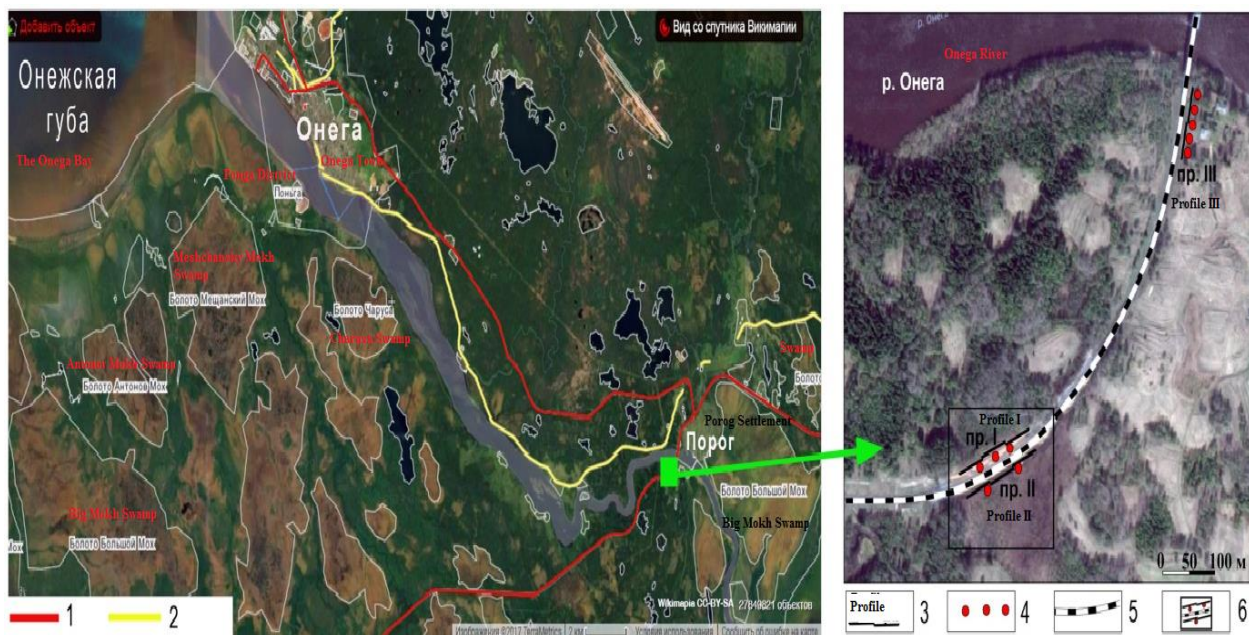
The notion “microseismic monitoring” encompasses a whole range of technologies, based upon analysis of waves of different origins and types (seismic emission, technology-related signals, surface waves, etc.). We are exploring methods of investigating UPS by means of picking out “necessary” signals from microseisms. It is essential to mention, that for getting fundamentally different information about the sphere, the captured wavefield may be simultaneously processed by different methods based on different “useful” constituents of microseisms.

Elaboration of technology of microseismic monitoring may be used either individually for acquiring quick estimation of subgrade state, or in combination with conventional methods for getting a picture of all alterations in the geological terrain in the area of railway construction.

### **Setting of the task**

Mainline operation length of the Severnaya Railway (Northern Railway) makes approximately 1045 km, most of which is located in the conditions of the Far North. Development of issues of technology of microseismic monitoring and methods of data processing was carried out in a section of the Severnaya Railway, Onezhsky District of Arkhangelsk Oblast.

The object for investigation is subgrade of railway in the area of turfed soils. During the investigation, a task was being solved to find out reasons of soil subsidence (pic. 1).



Pic. 1. Scheme of works carried out: 1 – railway line; 2 – automobile mainline; 3 – engineering seismic survey; 4 – places of installment of seismic equipment; 5 – railway in the area of the works; 6 – area of investigation

Engineering and geological conditions of the area near Onezhsky District are dictated by flat and slightly undulating features of terrain, development of sand and clay glacial deposits, sand and clay sediments of latest marine transgressions of different intensity [5, 6, 7].

A significant fact, on which the railway subgrade is dependent, is engineering and geological features of soils, groundwater level, and lithological composition of underlying rocks. Generally, according to Russia's Design and Construction Specifications 11-105-97 (СП 11-105-97) [8], the territory belongs to II category of complication in terms of engineering and geological conditions. It is our believe, that the section under investigation is located in area of depositional plain of glaciolacustrine deposits, seacoast lowland. In the lowland plains, there are basically non-homogeneous, thin-layered, flowing clay water-saturated deposits with the capacity varying from several to 10 metres [7].

Peculiarities of the region (excessive hydration) and lithological composition low permeable blanket deposits characterise shallow deposition of groundwater (less than 2 metres). The surface of groundwater contours outline of undulating relief and at some places, in pits between hills and ridges, converge with swamp water. In wetlands, turf capacity varies, as a rule, from 3 to 6 metres, or even 8-10 metres in some places. Turf is usually underlain by soft soils.

## **Accepted assumptions**

For this section, due to lack of information about engineering and geological surveys and type of subgrade, bearing in mind common data on the region of the work conducted [5, 7] and Construction Specifications 32-104-98 (CII 32-104-98), let us assume that a subgrade is up to 3 metres high. It has been designed and constructed after full or partial removal of turf layers from foundation being later replaced by mineral ground (sand and gravel mixture).

## **Seismic equipment**

Measuring microseisms in the region of subgrade location and traffic-induced impacts on subgrade soils, the Güralp CMG-6TD broadband seismometer (Great Britain) [10] and the Nanometrics Trillium Compact 120s (Canada) [11] were used. The sensors were deployed as in picture 1. Axes were located along (X) and across (Y) the subgrade. The distance between the sensors was set 15 metres on the basis of prospective depth of sounding of the UPS.

For shallow seismic surveys of UPS the “GEOSINGAL Ltd.” TELSS-402 telemetry seismic surveying system was used [12]. Receipt of P-waves and S-waves was carried out by vertical and horizontal sensors. Waves were induced 8 kg hammer being pounded on a flat metal plate. Scheme of profile location can be seen in picture 1. The distance between receiving channels was 2 metres, total length of profile was 15 metres. Processing of received data was carried out in programmes “RadExPro 2016” [13].

## **Materials and methods of studies**

The main source of strong seismic vibrations in the region of the Severnaya Railway track is railway transport. When resonant frequencies of rock system “subgrade and underlying soils” equal seismic vibrations frequencies of passing trains, dynamic load on subgrade significantly rises, which may result in emergency situations.

In the conditions of possible variations of subgrade soils state (karst regions, swamp areas), if it is impossible or not reasonable to carry out its reconstruction works, the most optimal would be to uninterrupted monitoring of resonant frequencies of soils. In this case, changes in resonant frequency would mark processes of changes in soils. Therefore, there arises a necessity of estimation of resonant frequencies of soils, which can be calculated both theoretically and experimentally.

Theoretical calculation of resonant frequency is carried out, provided that the information about speeds of transversal waves in the soils being surveyed is available, according to the formula [14]:

$$f_{rn} = \frac{(2n+1)V_s}{4Z},$$

where  $V_s$  – average speed of waves in the upper layer;  $Z$  – upper layer thickness;  $n$  – mode number.

The main advantage of theoretical calculation is that it provides the possibility of modeling, which allows to estimate alteration of values of natural frequencies when the state of the system “subgrade and underlying soils” changes (for example, because of water saturation, depth of freezing, etc.) and/or (for example, because of alteration of thickness of subgrade, changes of construction material properties, etc.). Thus, results of theoretical calculations could be used while planning works aimed at reconstructing and reinforcing railway subgrades.

The empirical studies were based upon a combination active and passive seismic methods.

For calculation of resonant frequency by passive seismic surveys, there exists a range of methods:

1. Engineering and seismic methods based upon spectrum analysis of seismic noise, allowing us to single out signals from the whole spectrum of microseisms corresponding to harmonic sources of oscillations [15]. Estimation of dynamic property of the record is based upon obtaining power spectrum  $S_{ij}(f)$  for each of components of registration ( $i, j = X, Y, Z$ ) and coherence function  $K_{ij}(f)$  in pairs for components:

$$K_{ij}(f) = \frac{|S_{ij}(f)|}{\sqrt{S_{ii}(f) \cdot S_{jj}(f)}},$$

where  $|S_{ij}(f)|$  – mutual averaged spectrum. Coherence function is practically a correlation coefficient for each frequency constituent, present in registration component [16].

For monitoring dynamics of microseismic process of alterations in time of changes of these estimations are analysed. Calculations are carried out in moving average, spectral time diagrams (STD) are built up –  $S_{ij}(f, t)$  for corresponding records.

2. H/V Methods – the relation of the horizontal to vertical components of microseism. This method has been described in the studies [17] and is based upon the fact that resonant frequency of fundamental mode can be determined from the relation of spectra of horizontal and vertical components of seismic noise:

$$f_{r0} = \sqrt{\frac{S^2(\omega)_{NS} + S^2(\omega)_{WE}}{2S^2(\omega)_V}},$$

where  $S(\omega)_{NS}$ ,  $S(\omega)_{WE}$  – spectra of horizontal components of the record;  $S(\omega)_V$  – spectrum of vertical component of the record.

Thus, bearing in mind dependence upon conditions, we can use either theoretical or empirical approaches to determination of resonant frequencies of railway subgrade soils.

By virtue of multichannel analysis of surface waves on the basis of field records of wavefield, velocity models of alteration of transverse wave speed value have been obtained. This method was first described in the studies [18, 19, 20] and was further improved in the study [21]. The method allows obtaining one dimension velocity models of geological terrain along linear seismic profiles on the bases of analysis of dispersive properties of surface waves. The multichannel method of surface waves analysis is based upon the spectral-wave (f-k) signal transformation followed by its addition in all channels [22].

As the active seismic methods, engineering seismic tomography was used for refracted and reflected waves [23], which was used for geological and geophysical profiles, identification of possible zones of inhomogeneities and determination of velocity properties of terrain. The refracted waves method is based on determination of refracted wave travel time (longitudinal or transverse) from the source of its excitation till the registration point. One of the conditions for this method to be applied is to increase velocity of transverse waves with depth. The depth of occurrence is calculated by the system of catching and counter travel time, combined by methods  $t_0$  and time fields, refracting boundaries are created; boundary velocity in refracting layer and relation  $V_s/V_p$  characterise its lithology [24].

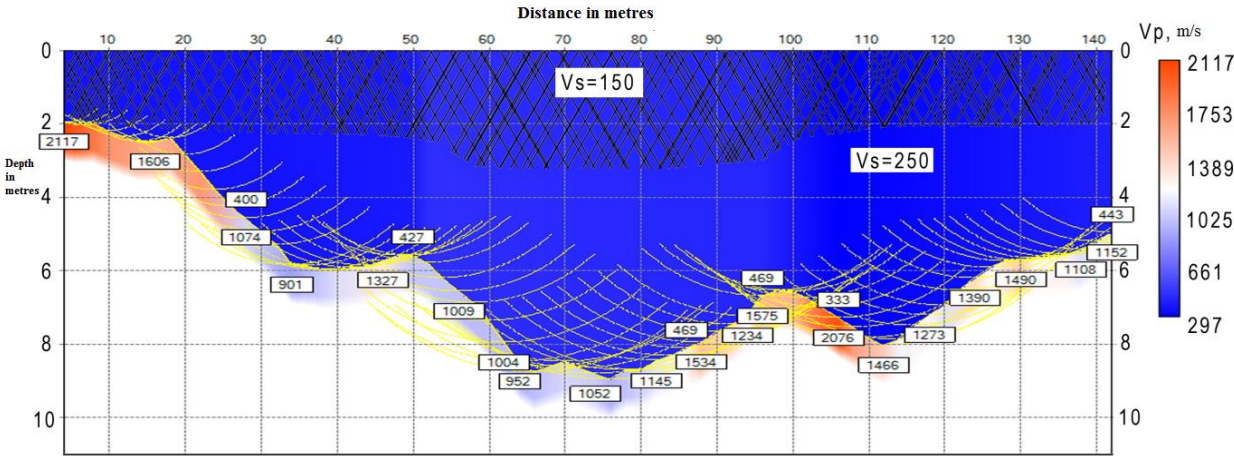
### **Result of the studies**

In the picture 2 the generalised velocity depth profile I (scheme can be seen the picture 1) in the section with “subgrade and underlying soils” system of disturbances is shown. The integration of active seismic methods allows receiving a more detailed velocity profile. Using methods of multichannel analysis of surface waves, we achieved to detect lower boundary of subgrade, which was not possible to do by means of refracted waves method due to excessive noise contamination.

Thus, the first boundary is singled out in the depth from 0 till 3 metres, average transverse waves velocity, determined by method MASW (multichannel analysis of surface waves), made 150 m/s, relation was  $V_s/V_p = 0.33 - 0.4$  and corresponded to sand and gravel layer [5, 7].

Refracted boundary is detected at the depth from 2 till 5 metres, with noticeable immersion in the centre up to 8–9 metres. Average velocity of transverse waves before the boundary  $V_p = 333 - 443$  m/s, thus making it an aerated zone. The relation  $V_s/V_p = 0.56$  makes it possible to assume that this layer is characterised by intercalation of sand, sandy loam and loam of ice age [5, 7].

Further below, there is a layer with increased velocities up to 2117 m/s, which corresponds to clay water-saturated depositions.

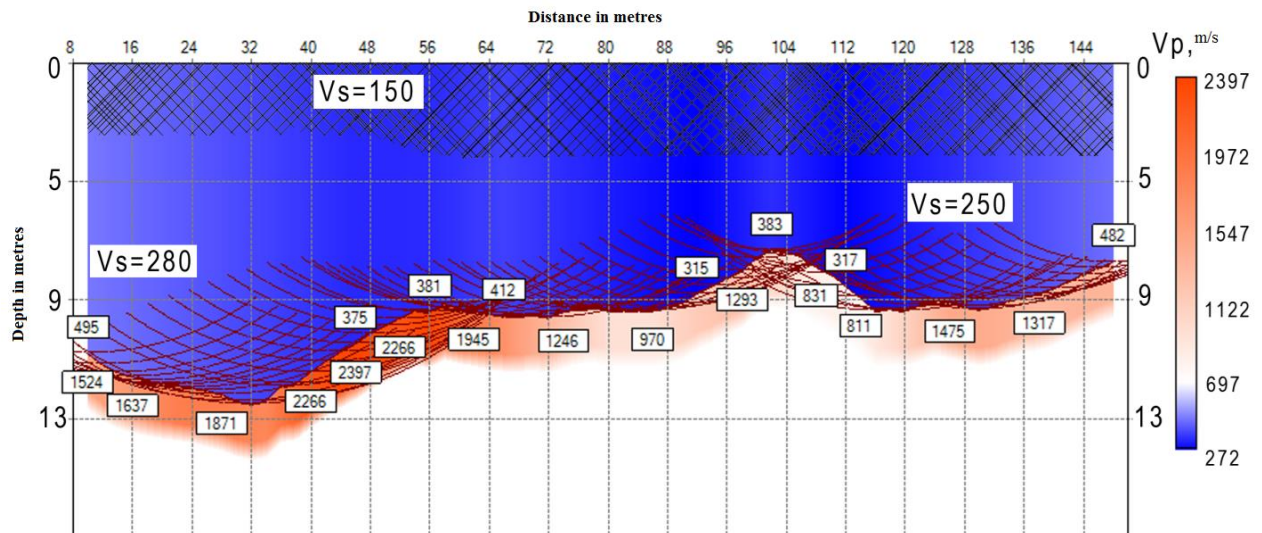


Pic. 2. Generalised velocity profile I. Hatched lines – lower boundary of subgrade, detected by virtue of MASW

In the picture 3, the velocity depth profile II (scheme is in the picture 1) in the section with “subgrade-underlying soils” disturbance system is shown, but on the other side of the subgrade with profile I. Just like profile I, the layer with crushed rock and sand depositions was singled out by means of MASW, at a depth from 0 till 4 metres, whereby average transverse waves velocities make 150 m/s, the relation is  $V_s/V_p = 0.3 - 0.47$ .

Refracted boundary is detected, according to both methods at a depth from 8 till 12 metres with deep submergence at the beginning of the profile. Average transverse waves velocities up to the boundary is  $V_p = 315 - 495$  m/s, average transverse waves velocities ( $V_s$ ) at depths from 3 till 13 metres are from 250 till 280 m/s, the relation is  $V_s/V_p = 0.56$ . It could be assumed that these properties correspond to intercalation of ooze, loam, sandy loam and sand of ice age.

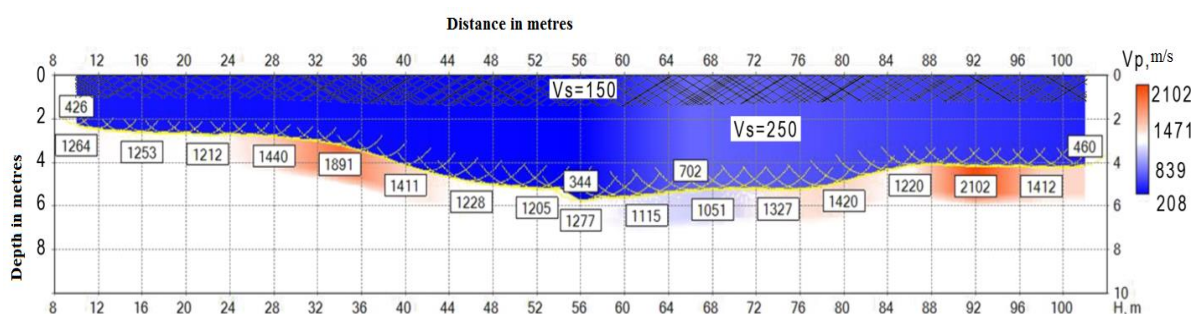
In the lower layer, high boundary velocities up to 2397 m/s are registered, which presumably correspond to clay water-saturated depositions [7].



Pic. 3. Generalised velocity profile II (4-6), hatched lines – lower boundary of subgrade, detected by virtue of MASW

Thus, in an unfavourable section a layer of soils (from 4 till 8 metres) with decreased velocities is singled out; this section has various gradients – relied made by glacial deposits. This peculiarity is also underlined by increased velocity properties – water saturation of clay rock, which is presumable is one the reasons of this sections soils' subsidence.

In the picture 4, one can see the velocity depth profile III for a favourable section without any disturbances in the system “subgrade-underlying soils”. A layer of crushed rock and sand was detected by virtue of MASW at 1.5 metres. Refracted boundary is detected at depths from 2.5 till 4 metres with a slight 5 metres sag in the centre. Average transverse waves velocities up to the boundary are  $V_p = 344 - 702$  m/s. Average transverse waves velocities in the upper level ( $V_s$ ) are from 150 till 250 m/s/, the relation is  $V_s/V_p = 0.35 - 0.43$ . It could be assumed that, these properties, just like in the previous section, correspond to intercalation of crushed rock and sand layer, loamy ooze, sandy loam, and sand of ice age [7]. Below, there lies a layer of presumably water-saturated deposits (velocities from 1212 till 2102 m/s).

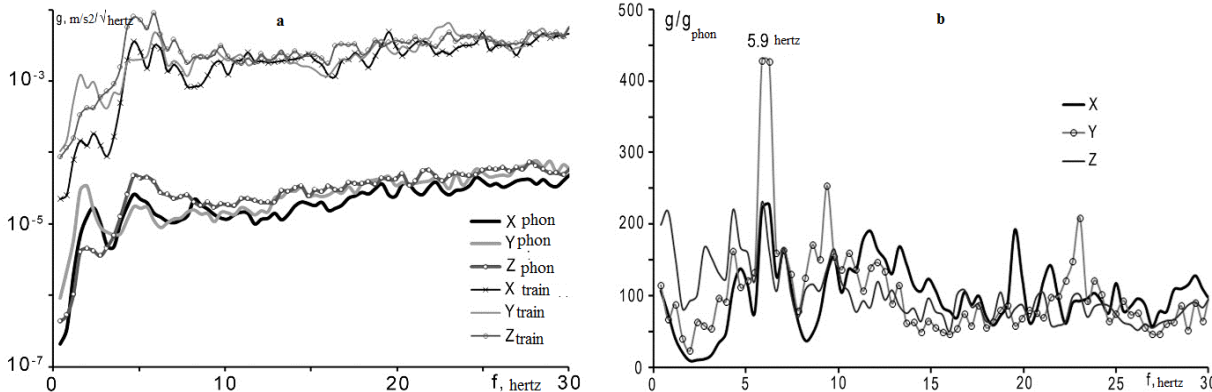


Pic. 4. Generalised velocity profile III (7-8), hatched lines – lower boundary of subgrade, detected by virtue of MASW

As it is seen from the picture 4, this section’s layer with decreased velocity has significantly lower capacity and relatively flat boundary, and values of velocity increase are solitary. This fact indirectly indicates that this section soils have stronger bearing capacity.

Thus, application of active seismic methods enabled obtaining velocity model of the system “subgrade-underlying soils” to a depth of 22.5 metres.

Let us carry out integration of the received information with the results of passive seismic methods. We will consider results of spectral analysis based on the data of passive seismic methods. For evaluation of levels of impact of train for the section of survey acceleration spectrums before and during the train traffic were compared (Picture 5). Two wide-range peaks, corresponding to the first and the second modes of oscillations in the system “subgrade-underlying soils”, are singled out, with their ranges being equal to 1.6-2.4 hertz and 4.7-5.5 hertz. On average, passing freight trains increase general level of the system oscillation 100 times (Picture 5a), whereby the second mode is subjected to the most of the amplification of acceleration amplitude. The most “vivid” is the frequency 5.9 hertz, coming up when the greatest load of the rolling stock is exerted on the system “subgrade-underlying soils”. At the same time, the amplitude of the transverse component increases twice with respect to increases at other components and for other frequencies, related to train traffic (Picture 5b). This is presumably due to curvature of the track section surveyed (Picture 1).

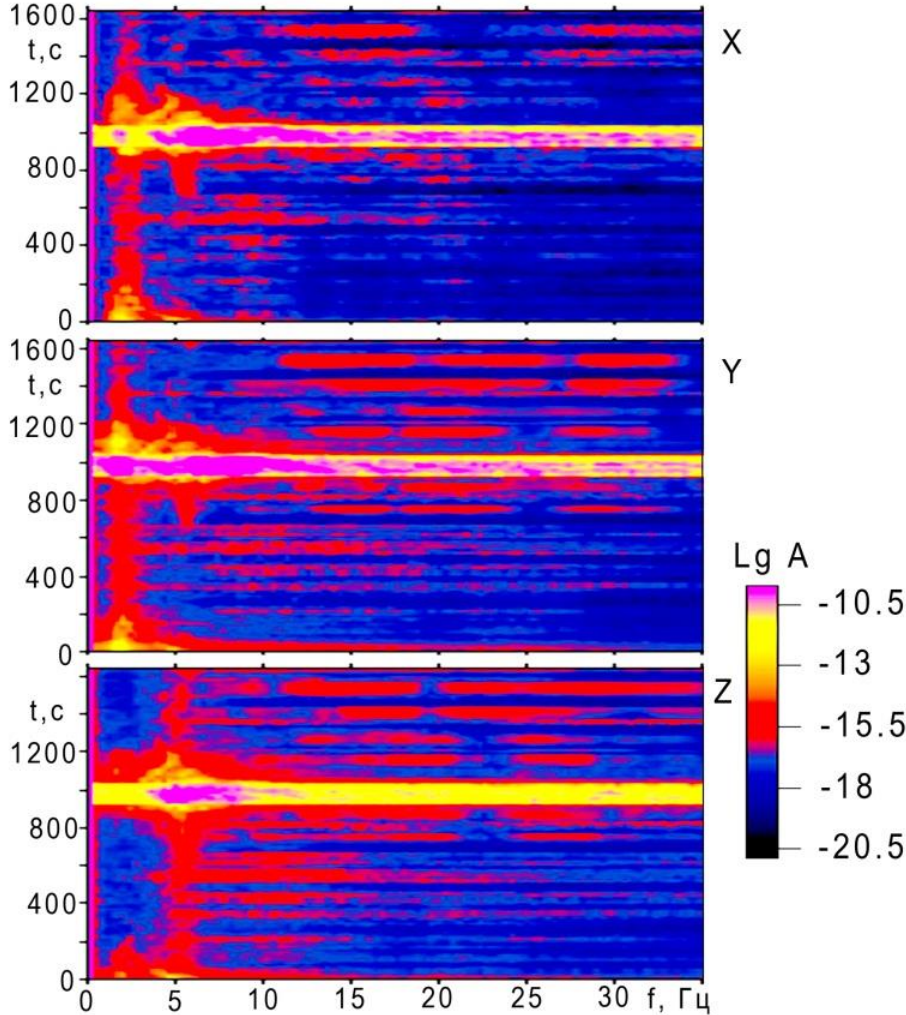


Picture. 5. Spectra of impacts before and during freight train traffic for unfavourable section of subgrade (a) and spectra of acceleration during train traffic (b)

In spectral-time analysis (STAN) diagram of power spectrum of displacement velocity for unfavourable section (show in the Picture 6) two vertical lines of 2 and 5 hertz are singled out. They reflect oscillation dynamics of the system “subgrade-foundation soils”. The signal is most vividly seen at frequency of 2 hertz (one of the oscillation modes of the system) for horizontal constituents (X, Y), which is due to constructive peculiarities of the subgrade. The signal at the frequency of 5 hertz is better seen in the vertical component Z, whereas in the horizontal components the signal comes up during train traffic



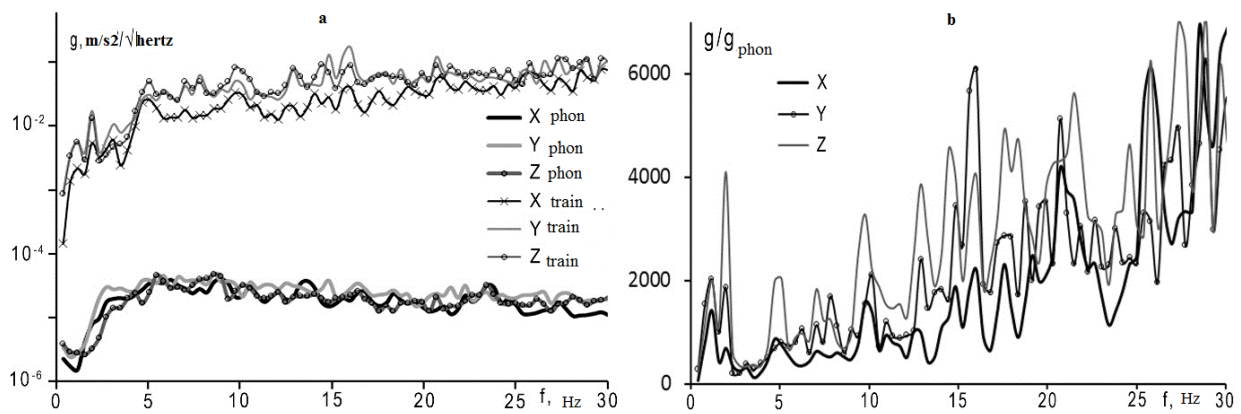
(bright wide-range horizontal signal), which reflects occurrence of resonance during train traffic with the system “subgrade-foundation soils”.



Picture. 6. STAN – diagram of the system “subgrade-underlying soils”. Bright wide-range horizontal signal is the passing train

For comparative analysis, let us consider the same situation but for a favourable section (Picture 1), where the level of the edge of subgrade does not exceed 0.4 metres. In the Picture 7, impact spectra before and during freight train traffic in this section of the subgrade and spectra of acceleration during train traffic.

Analysis in the Picture 7 shows sufficiently equal distribution of load by frequencies. The difference of power levels of microseism phones in the state of rest and during train traffic is more than three orders of magnitude than for unfavourable sections. In the spectra, during train traffic in this section the most vividly seen peak is at 2.0 hertz, which is most like due to resonance with the system “subgrade-foundation soils”. Yet, absolute level of impact is low and does not significantly influence the state of the system considered.



Picture. 7. Spectra of impact before and during freight train traffic for favourable section of the subgrade (a) and spectra of acceleration during train traffic (b)

### Discussion of the results

The dangerous physical and geological processes in the described territory along the Severnaya Railway are:

- presence in the upper layer of geological section of physically unstable oozy sandy loams and sands up to 8-12 metres;
- bog development, caused by geomorphologic location of some track parts, high level of groundwaters, presence of loose depositions of low-permeable clay depositions in the section.

Results of active seismic methods enabled singling out relatively thicker of softened soils, probably with turf, which lie under the subgrade. Sections with excessive water saturation in the foundations soils have been identified. Impact by trains, as well as resonant effect, causes its compression, leading to occurrence of subsidence. At the same time, resonant impact is not significant, whereas loads of passing trains contribute more to the state of soils.

Monitoring of the state of the subgrade for resonant frequency analysis is possible with the use of one sensor, preferably with accelerometer with lower frequency from 1 hertz. At the same time, application of short-range velocimeter will also be sufficient.

Another stage of these surveys will be assigning the calculation model and considering different situations with changes of physical properties of underlying soils and train impact.

The final stage of these studies predisposes creating functional model of technology of express evaluation, including experimental components: equipment, process of accumulation, processing and transmission of data, and decision algorithms. Implementing the theoretical task, we plan to obtain new ideas of interaction of the system “subgrade-underlying soils” and create data base of changes of bearing capacity of soils under real natural and man-caused impacts. It necessary to work out methodology of prognosis of subgrade behaviour in different options of climate changes and different loads.

## Special thanks

The studies were conducted under the support of RFBR grant № 17-20-02119 “Development of seismic monitoring technology and express evaluation of railway subgrade state in the conditions of the Far North and Siberia”.

## References

1. *Sajt Evraziya Vesty IX 2010* [The Site of Eurasia News IX 2010], URL: <http://www.eav.ru/publs.php?number=2010-09> (28/08/2017).
2. Cheng F., Xia J., Luo Y., Xu Z., Wang L., Shen C., Liu R., Pan Y., Mi B. & Hu Y. *Geophysics*, 2016, no. 81(5), pp. 1–10. DOI: 10.1190/geo2015-0505.1.
3. Draganov D., Campman X., Thorbecke J., Verdel A. & Wapenaar K. *Geophysics*, 2009, 74(5), pp. A63–A67.
4. Le Feuvre M., Joubert A., Leparoux D. & Côte P. *Journal of Applied Geophysics*, 2015, 114, pp. 36–51.
5. *Skhema territorial'nogo planirovaniya Onezhskogo municipal'nogo rajona. Tom 1* [Scheme of territorial planning of Onezhsky municipal district. Vol. 1], URL: [http://www.onegaland.ru/about/gradostroitelstvo/skhema\\_terr\\_plan/Tom1.doc](http://www.onegaland.ru/about/gradostroitelstvo/skhema_terr_plan/Tom1.doc) (02/10/2017).
6. Zorenko T. N., Cheremkhina G. M., Korepanov V. S., Vartanova L. S., Levin V. & Rybalko A. E. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii masshtaba 1:200000. Seriya Onezhskaya. List Q-37-XXXIII, XXXIV. Ob"yasnitel'naya zapiska [State geological map Russian Federation, scale 1:200000. A series of Onega Sheet Q-37-XXXIII, XXXIV. An explanatory Memorandum]. St. Petersburg, 2000, pp. 118. URL: <http://www.geokniga.org/sites/.../q-37-xxvii-xxviii-petrominsk-gosudarstvennaya-geologic> (02/10/2017).
7. Klyueva V. N., Pokrovskaya M. V., Baranov M. I. Inzhenerno-geologicheskaya s"emka masshtaba 1:200000. Listy: R-37-III, IV, X, XI, XII, XVI, XVII. Proizvodstvennoe geologicheskoe ob"edinenie “Gidrospecegeologiya”, Hidrogeologicheskaya ehkspediciya 29 rajona. Arhangel'skij filial FBU “TFGI po Severo-Zapadnomu federal'nomu okrugu” [Engineering-geological survey of scale 1:200000. Sheets: R-37-III, IV, X, XI, XII, XVI, XVII. Production Geological Association “Gidrospecegeologiya”, Hydrogeological expedition 29 district. Arkhangelsk branch of Federal State-Funded Institution “Territorial fund of geological information for the North-West Federal District”]. 1984.
8. *SP 11-105-97 Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya dlya stroitel'stva. Svod pravil* [Code of practice 11-105-97. Engineering-geological surveys for construction. A set of rules]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200000255> (28/08/2017).

9. *SP 32-104-98 Proektirovanie zemlyanogo polotna zheleznyh dorog kolei 1520 mm* [Code of practice 32-104-98. Designing of an roadway of railway lines of 1520 mm rut]. Moscow, 1999. URL: <http://aquagroup.ru/normdocs/4321#i486962> (28/08/2017).
10. Guralp Systems, URL: <http://www.guralp.com/> (28/08/2017).
11. Nanometrics, URL: <http://www.nanometrics.ca> (28/08/2017).
12. *Geosignal* [Geosignal], URL: [www.geosignal.ru](http://www.geosignal.ru) (28/08/2017).
13. RadExPro, URL: <http://radexpro.com/> (28/08/2017).
14. Lane J. W., White E. A., Steele G. V. & Cannia J. C. Estimation of bedrock depth using the horizontal-to-vertical (H/V) ambient-noise seismic method. *Theses. Near Surface 2008-14th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. Philadelphia, 2008, pp. 1–13.
15. Yudakhin F. N., Kapustian N. K. & Antonovskaya G. N. *Ingenerno-seismicheskie issledovaniya geologicheskoy srefy I stroitelnih konstruksiy s ispolzovaniem vetrovih kolebaniy zdaniy* [Engineering seismic studies of the geological structure and engineering structures by using wind fluctuations of buildings]. Ekaterinburg: UB RAS, 2007. 156 p.
16. Yudakhin F. N., Kapustian N. K., Antonovskaya G. N. & Shakhova E. V. *Doklady akademii nauk – Reports of the Academy of Sciences*, 2005, no. 405(9), pp. 1356–1360. WOS: 000234672700022, ISSN: 1028-334X.
17. Nakamura Y. A. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, 1989, vol. 30, no.1, pp. 25–33.
18. Al-Husseini M. I., Glover J. B. & Barley B. J. *Geophysics*, 1981, no. 46(2), pp. 121–137.
19. Mari J. L. *Geophysics*, 1984, no. 49(8), pp. 1169–1179.
20. Gabriels P., Snieder R. & Nolet G. *Geophysical prospecting*, 1987, no. 35(2), pp. 187–196.
21. Park C. B., Miller R. D. & Xia J. *Geophysics*, 1999, no. 64(3), pp. 800–808.
22. Douze E. J. & Laster S. J. *Geophysics*, 1979, no. 44(9), pp. 1570–1583.
23. Boganik G. N. & Gurvich I. I. *Sejsmorazvedka: Uchebnik dlya vuzov* [Seismic exploration: a textbook for high schools]. Tver, 2006, 744 p.
24. *Metod prelomlennyh voln, pod red. A. M. Epinat'evoy* [Method of Refracted Waves, ed. A. M. Epinat'eva]. Moscow, 1990, 297 p.

**Information about authors:**

Galina N. ANTONOVSKAYA, PhD., Head of the Laboratory of Seismology, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, e-mail: [essm.ras@gmail.com](mailto:essm.ras@gmail.com).

Nikita Y. AFONIN, Junior researcher of the Laboratory of Seismology, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, e-mail: [afoninnikita@inbox.ru](mailto:afoninnikita@inbox.ru)

Irina M. BASAKINA, PhD., Senior researcher of the Laboratory of Seismology, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, e-mail: [ibasakina@yandex.ru](mailto:ibasakina@yandex.ru)

Natalia K. KAPUSTIAN, Dr of Science, Chief researcher of the Laboratory of Seismology, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, e-mail: [nkapustian@gmail.com](mailto:nkapustian@gmail.com)

Boris G. BASAKIN, Engineer of the Laboratory of Seismology, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, e-mail: bgborislen@gmail.com

Aleksey V. DANILOV, Junior researcher of the Laboratory of Seismology, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, e-mail: danilov.aleksey.vikt@gmail.com