

**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. Лаврова 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.

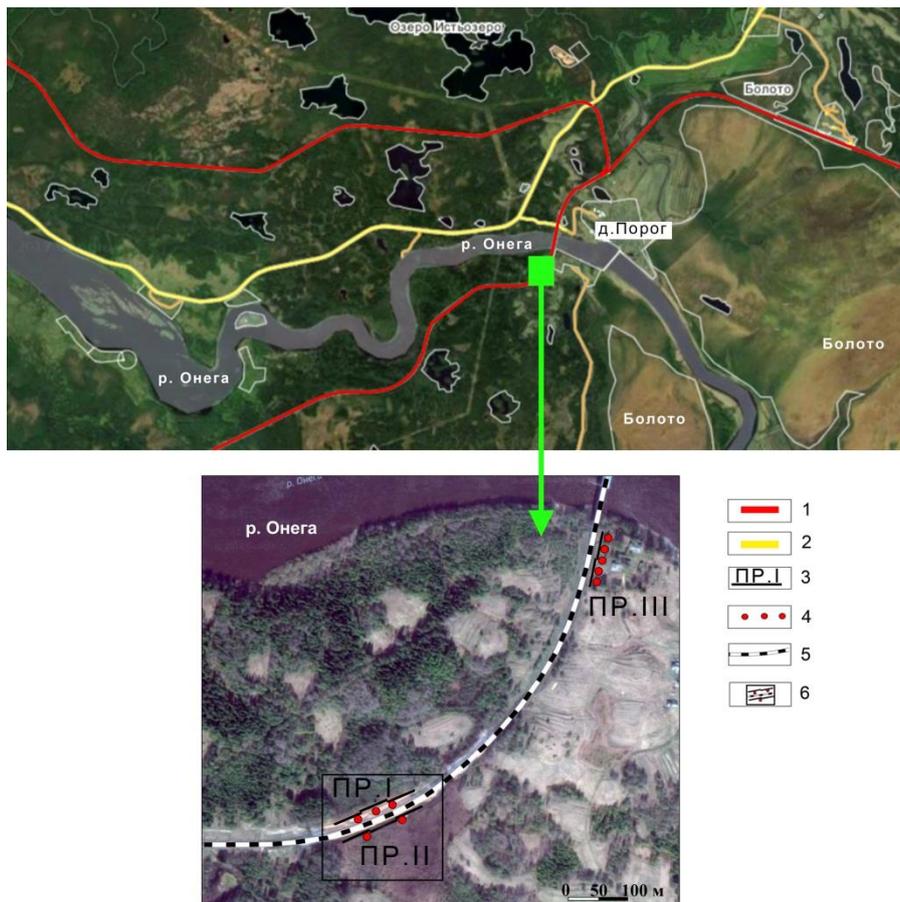


Рис. 1. Схема проведения работ: 1 – линия железной дороги; 2 – автомобильная трасса; 3 – профили инженерной сейсморазведки; 4 – места установки сейсмической аппаратуры; 5 – железная дорога; 6 – участок обследования

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.

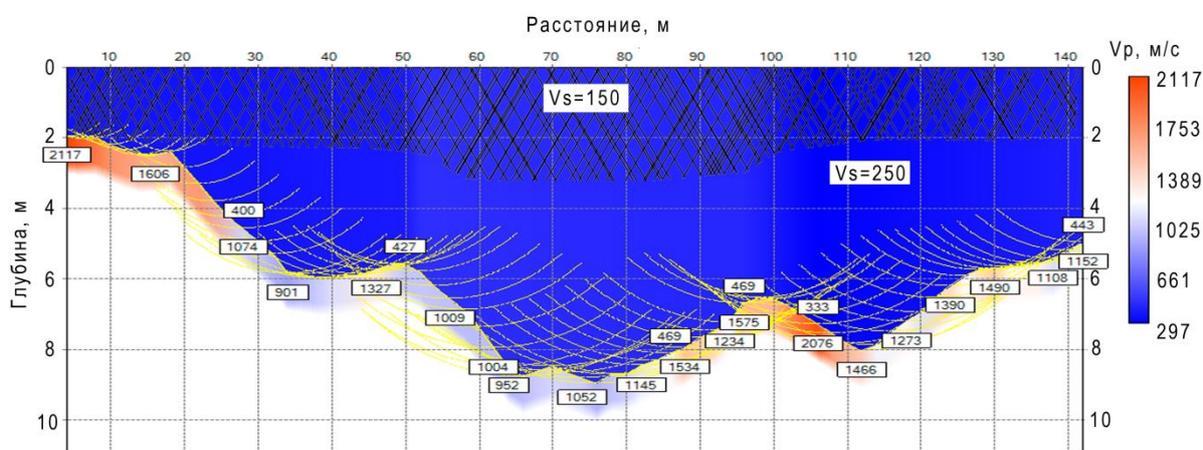


Рис. 2. Обобщенный скоростной сейсмический разрез по профилю I, штрихованные линии – нижняя граница насыпи, выделенная по методу многоканального анализа поверхностных волн

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].

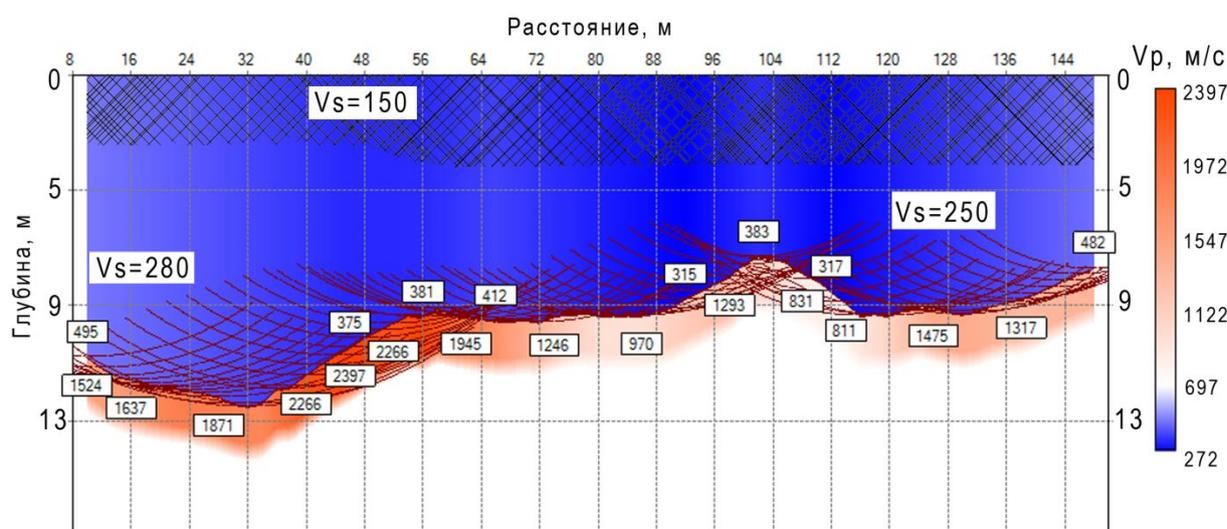


Рис. 3. Обобщенный скоростной сейсмический разрез по профилю II (4-6), штрихованные линии – нижняя граница насыпи, выделенная по методу многоканального анализа поверхностных волн

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).

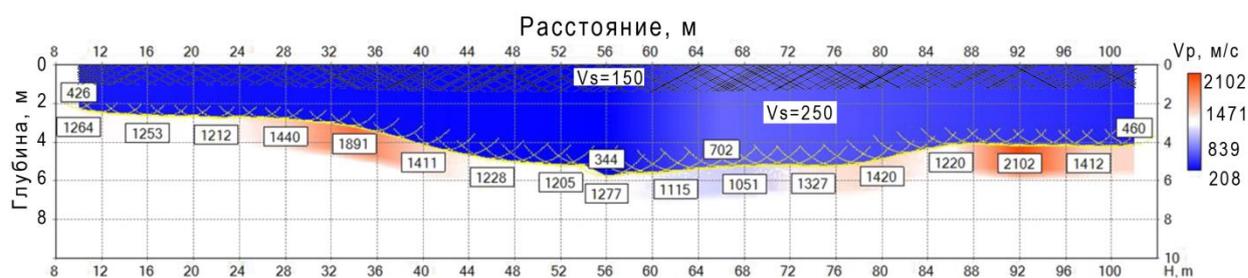


Рис. 4. Обобщенный скоростной сейсмический разрез по профилю III (7-8), штрихованные линии – нижняя граница насыпи, выделенная по методу многоканального анализа поверхностных волн

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).

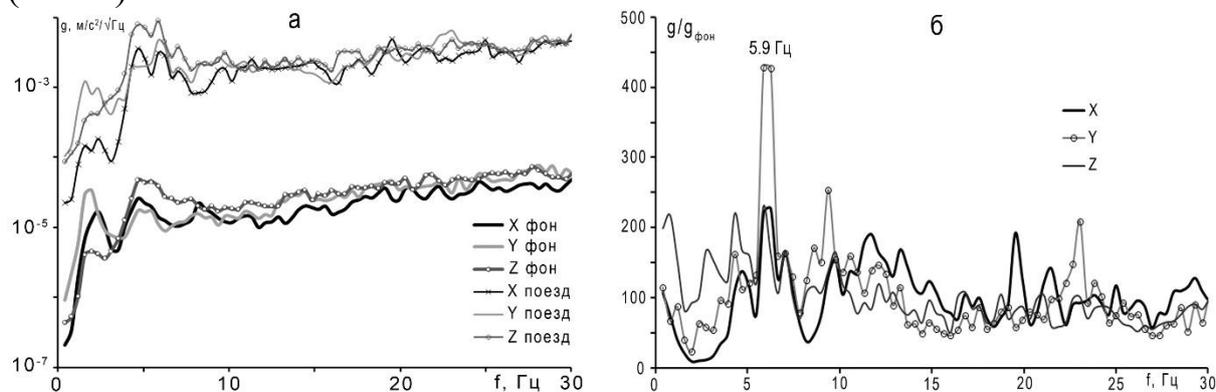


Рис. 5. Спектры воздействия до и во время движения товарного состава для неблагоприятного участка земляного полотна (а) и спектры ускорения при движении поезда (б)

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.

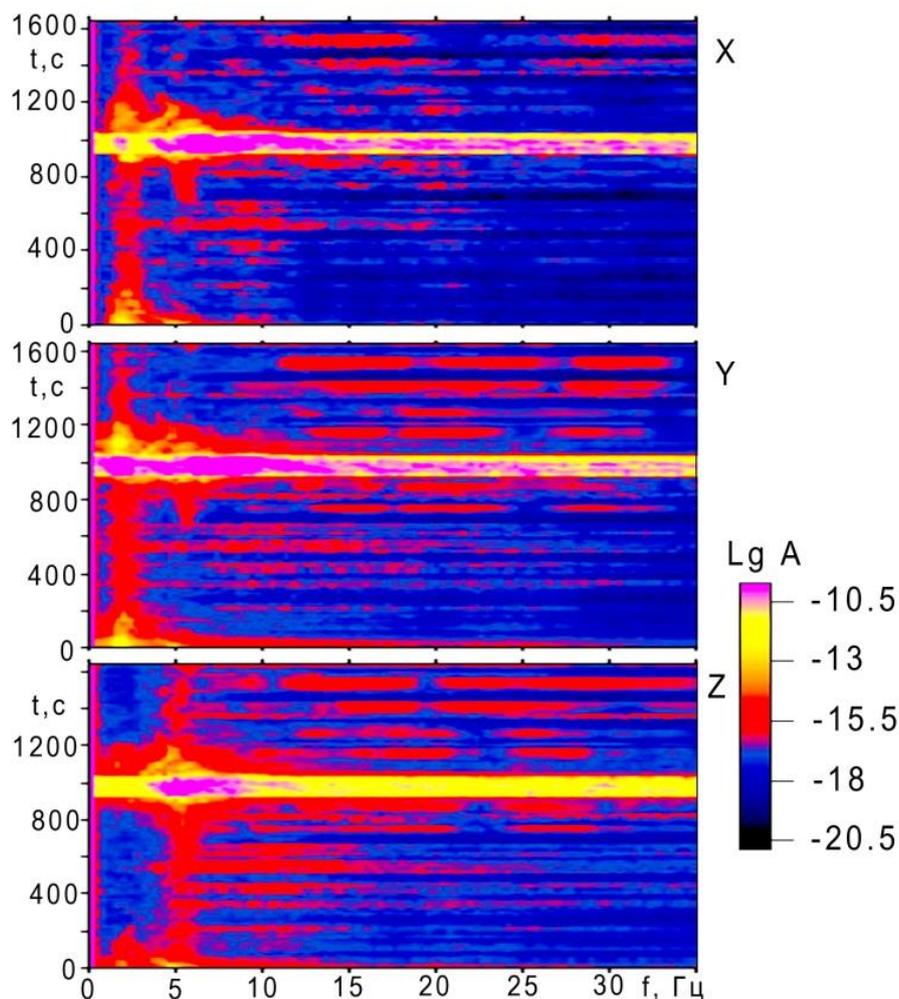


Рис. 6. СВАН-диаграмма системы «насыпь-подстилающие грунты оснований». Яркий широкополосный горизонтальный сигнал – проезжающий грузовой состав

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.

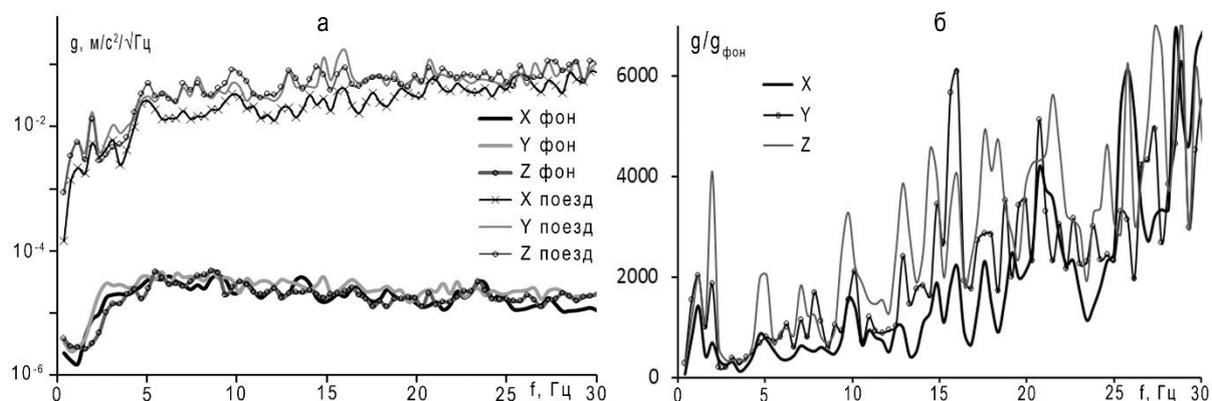


Рис. 7. Спектры воздействия до и во время движения товарного состава для благоприятного участка земляного полотна (а) и спектры ускорения при движении поезда (б)

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/ (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 (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.

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

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

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

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

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.